



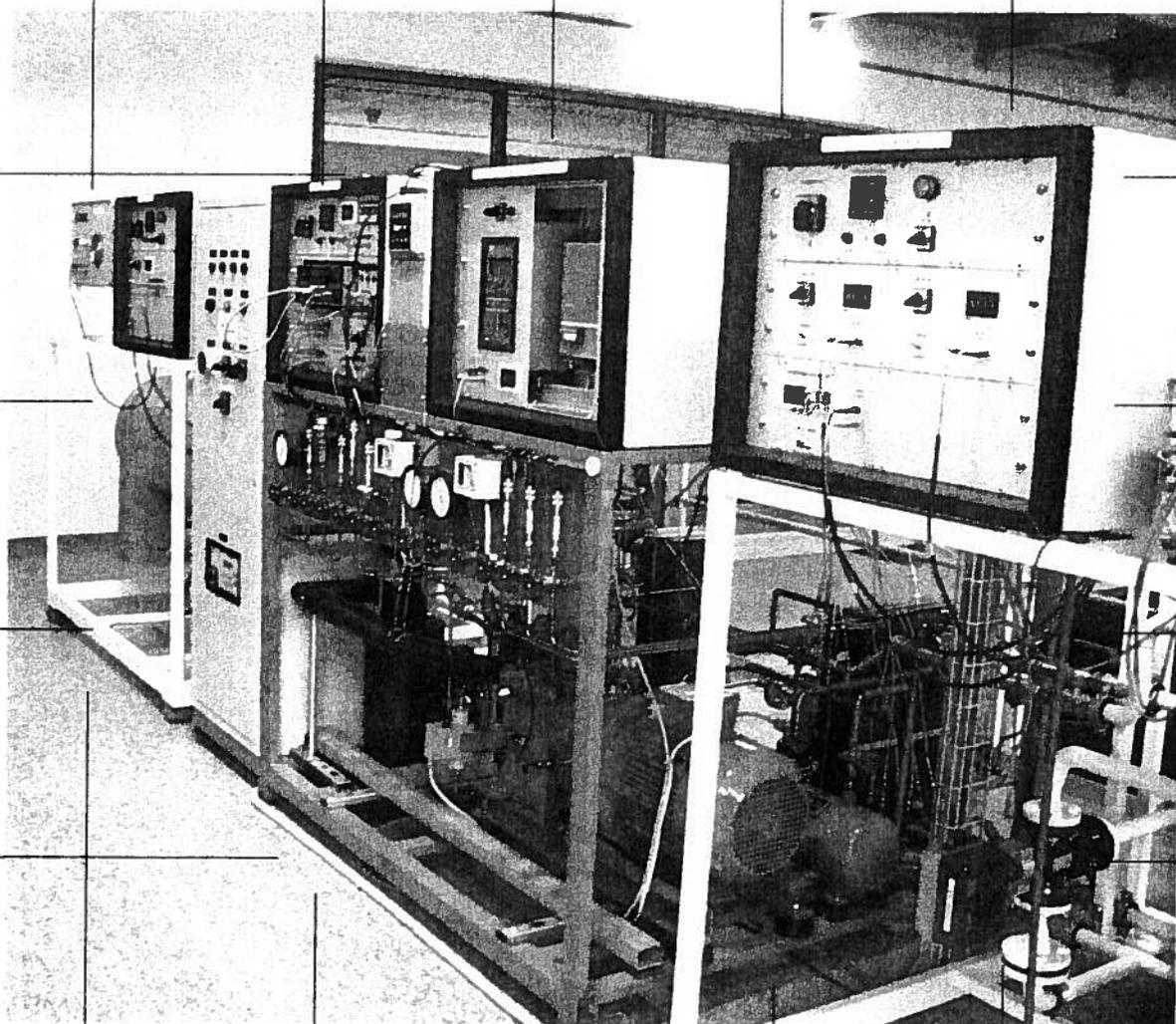
Bundesamt für Energie  
Office fédéral de l'énergie  
Ufficio federale dell'energia  
Swiss Federal Office of Energy

# Recherche énergétique

## Energie - Forschung 1999

Rapports de synthèse des chefs de programme  
Überblicksberichte der Programmleiter

zuverlässig Wärme pumpen



# RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE ENERGIEFORSCHUNG

# 1999

Rapports de synthèse des chefs de programme  
Überblicksberichte der Programmleiter

---

**Vorwort / Avant-propos**

**Zur Energieforschung 1999**

## *Programmes de recherche – Forschungsprogramme*

**Rationelle Energienutzung in Gebäuden**

**Rationelle Energienutzung Warmwasser**

**Solararchitektur**

**Elektrizität**

**Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung**

**Solaire actif: chaleur**

**Photovoltaik**

**Biomasse**

**Geothermie**

**Kleinwasserkraftwerke**

**Windenergienutzung**

**Solarchemie und Wasserstoff**

**Feuerung und Verbrennung**

**Stockage de chaleur**

**Nukleare Sicherheit und Entsorgung**

**Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK**

**Fusion thermonucléaire contrôlée**

**Piles à combustible et Accumulateurs**

**Verkehr**

**Energiewirtschaftliche Grundlagen**

## *Annexe – Anhang*

**Organisation de la Recherche et P+D / Forschungs- und P+D-Organisation**

**Adresses importantes / Wichtige Adressen**

## VORWORT

1999 betragen die gesamten Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung 185 Mio. Franken. Eine detaillierte Zusammenstellung der entsprechenden Geldflüsse ist aus der *Liste der Energieforschungsprojekte der Schweiz* ersichtlich.

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem *Konzept der Energieforschung des Bundes*. Für die Umsetzung des *Konzepts* ist das Bundesamt für Energie (BFE) zuständig. Es verfügt dafür über eigene Fördermittel, die subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und öffentlichen Forschungsstellen eingesetzt werden. Die Betreuung der verschiedenen Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramme obliegt internen und externen Programmleitern, welche verschiedenen Technologiebereichen zugeordnet sind. Eine Übersicht über die Organisation findet sich im Anhang des Berichts.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der BFE-Programmlieferanten. 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. Die gedruckte Version der Jahresberichte beschränkt sich somit auf die Syntheseberichte. Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

April 2000  
BUNDESAMT FÜR ENERGIE

*Zur Illustration auf dem Umschlag:*

### *Zuverlässig Wärme pumpen*

Laborprüfstand für die *FuzzyWatch*-Methode zur einfachen Betriebsüberwachung von Wärmepumpen. (siehe Programm Wärmepumpen WKK, Seite 37)

## AVANT - PROPOS

En 1999, l'ensemble des moyens attribués par les pouvoirs publics à l'ensemble de la recherche énergétique se sont élevés à 185 MCHF. Une revue détaillée des flux financiers peut être faite en consultant la *Liste des projets de recherche énergétique en Suisse*.

Le *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération* est le fil conducteur de la recherche soutenue par les pouvoirs publics dans le domaine de l'énergie en Suisse. La mise en pratique du *Plan directeur* est du ressort de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Il dispose, à cette fin, de moyens propres qui sont engagés de façon subsidiaire à ceux des institutions de recherche tant privées que publiques. La gestion des divers programmes propres de "recherche, développement et démonstration" (RD&D) relève des responsables internes ou externes à l'OFEN. Ils sont répartis en domaines technologiques. On trouvera, en annexe, un survol de l'organisation.

Le présent document comprend les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrit les progrès accomplis dans les divers projets co-financés 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. La reproduction d'extraits du présent volume est autorisée, en indiquant la source.

Avril 2000  
OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

*Illustration de la couverture:*

### *Pompes à chaleur fiables*

Stand d'essai en laboratoire pour la mise au point de la méthode *Fuzzy Watch* qui permettra un suivi simple du fonctionnement optimal de pompes à chaleur (voir programme pompes à chaleur/CCF en page 37)



## SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 1999

Léo Dubal, e-diteur

### Note introductive

*Comment raconter une multitude d'histoires de telle manière que l'ensemble ne forme pas une collection, mais un tout ?* La préface de 1989 au "Manuscrit trouvé à Saragosse" de Jan Potocki (1761-1815) rend ainsi hommage au premier "écrivain-surfeur" de la langue française. Pour moi qui ne suis pas écrivain, c'est un privilège rare...à l'échelle planétaire, qu'à la veille de ma retraite, la technologie du *click souris* me permette, avec ma 22<sup>ème</sup> édition du rapport annuel de l'OFEN sur la recherche énergétique suisse, d'être l'un des premiers à **connecter sur 2 pages, l'accès à 2000 pages** de rapports totalement inédits. Cette année, les hyper-liens de la version électronique rendent la version "unidimensionnelle" – papier – quasi-obsolète !

Les dépenses des pouvoirs publics pour la recherche énergétique, ont continué, en 1999, de décroître. Cependant, l'OFEN, grâce au caractère subsidiaire de son soutien financier, ainsi qu'à l'excellente organisation des ses programmes, est parvenu à maintenir la qualité de très haut niveau des résultats obtenus.	Ce survol <i>critique</i> de la RD&D vise - à l'aide d'un bref commentaire sur chaque domaine d'activité classé selon les vecteurs électricité, hydrogène et chaleur - de donner au lecteur l'envie d'en savoir plus...et de stimuler les synergies entre les organisations concernées, publiques et privées.
--	---

- Dans le secteur des techniques de **production de l'électricité**, la libéralisation du marché offre, certes, de nouvelles opportunités, mais elle exige, en contrepartie, une plus grande transparence des coûts.

- Domaine des **petites centrales hydrauliques**: il est symptomatique. La libéralisation a créé un climat d'insécurité, défavorable aux projets de démonstration. Côté recherche, le "cône-double" (concept émanant de *l'Inselspital*), placé dans le lit des rivières, permet de pomper l'eau jusqu'à 10 m de hauteur, sans la turbiner !

- Domaine **fusion nucléaire**: l'imminence des réacteurs commerciaux - annoncée dans les années 50 du siècle dernier - est reportée, sans fard, aux années 2050. Une installation pilote a produit quelques *flashes* de 16 MW et une centaine de doctorats.

- Domaine **sécurité nucléaire réglementaire**: l'importance du re-calibrage régulier des détecteurs, utilisés lors du contrôle de la contamination des *containers*, est enfin reconnue. Concernant les accidents graves, une collaboration Suisse / États-Unis devrait permettre l'obtention de résultats qui seraient, autrement, hors d'atteinte.

- Domaine **sécurité nucléaire** et gestion des déchets: l'autorisation d'augmenter de 15% la puissance de la centrale nucléaire de Leibstadt a conduit à toute une série de tests. D'autre part, une gestion plus rationnelle des barres de combustible a entraîné des essais variés.

- Domaine **combustion**: là, il y a record mondial. Un moteur à gaz - pour les unités chaleur-force de la classe 200 kW<sub>el</sub> - a été mis au point. Son efficacité atteint 42,5 %, et son taux d'émission de NO<sub>x</sub> est inférieur à la barre des 10 ppm.

- Domaine **pires** au gaz naturel & aux bio-combustibles: l'analyse détaillée des coûts des divers procédés de fabrication développés en Suisse, pour les piles céramiques, révèle que les différences sont minimales en regard de la part "main d'œuvre". Quant à l'énergie grise investie, elle est amortie en moins de dix jours d'opération.

- Domaine **vent**: le parc d'éoliennes s'agrandit. Il atteint 2,8 MW, et pourrait, d'ici 2010, être multiplié par dix, en prenant avantage de l'accès sur Internet des données météo locales.

- Domaine **géothermie**: la localisation en surface du pourtour (de quelques km !) d'un réservoir profond, en région bâloise, est en train d'être réalisée par voie acoustique.

- Domaine **photovoltaïque**: l'identification d'un potentiel de 217 MW<sub>p</sub> le long des voies de communication, ne doit pas occulter le coût encore élevé des installations PV classiques. Le recours aux matériaux exotiques tel le CdTe laisse songeur. Quant aux cellules GRÄTZEL, leur électrolyte liquide reste à gélifier.

- **L'utilisation de l'électricité** la plus rationnelle est celle que l'intelligence a évité de consommer.

- Domaine [fondements de l'économie énergétique](#): des bases solides pour le contre-projet à l'initiative dite *solaire*, ont été élaborées, et ont débouché sur le projet de loi sur une taxe d'encouragement (LTE).

- Domaine [utilisation de l'électricité](#): "To re-boot son PC, c'est toujours bon !", avec, en prime, une meilleure stabilité...50% d'économie de courant, grâce au *e-manager*. Pour les distributeurs de boissons réfrigérées, c'est dans l'éclairage que se trouvent les économies!

- Domaine [accumulateurs](#): sur la ligne de départ pointe le lithium rechargeable, pour NATEL ! Mais la médaille d'or revient au nouveau matériau d'électrode à haute capacité massique, découvert à Zürich. Les batteries seraient-elles enfin pleines ?

- Domaine [trafic](#): avec son design futuriste, le [e-bike](#) (voir première de couverture) fait figure d'archétype de la mobilité du futur....

- Parmi les vecteurs énergétiques secondaires, seule l'électricité s'est fait une place au soleil. Mais jusqu'à nouvel avis, **l'hydrogène** reste candidat.

- Domaine [hydrogène](#): côté production, espoirs déçus, la photo-électrolyse de l'eau de mer, s'accompagne de chlore dont la formation ne peut être réduite. Côté stockage, la nouvelle technique de remplissage rapide de gaz sous pression, combinée aux cylindres en matériau composite avec de la fibre de carbone, progresse...alors que les nanostructures de carbone s'apprêtent à conquérir le devant de la scène....

- Domaine [piles à hydrogène](#): une embarcation électrique biplace, équipée d'une pile "portable" de seulement 300 W, a atteint la vitesse de croisière de 12 km/h, avec le handicap du "stockage de l'hydrogène".

- La **chaleur** est le vecteur qui affecte directement la sensation de confort, mais elle trouve des applications à toute température.

- Domaine [chimie solaire](#): un réacteur donne satisfaction...aux antipodes. Reste à souhaiter à ce domaine un chef de programme résidant en Suisse.

- Domaine [biomasse](#): dynamisée par les projets de démonstration, la contribution à la couverture de l'énergie finale a atteint 2,5%. La gazéification du bois sera prochainement, mise sur orbite.

- Domaine [géothermie](#): les sources de chaleur peu profondes sont "renouvelables" et leur extraction peut, donc, s'effectuer "sans voler les voisins".

- Domaine [solaire actif](#) (chaleur): les installations solaires combinées - eau chaude et chauffage - pour les villas, intègrent, désormais, l'appoint solaire. Les performances obtenues les rapprochent de la rentabilité économique. Des solutions optimales, standardisées, sont à l'étude, au niveau international.

- Domaine [stockage de chaleur](#): les pionniers du stockage solaire saisonnier souterrain, à l'échelle de la villa, sont déçus ! Un stock souterrain ne se justifie qu'au-dessus de 20'000 m<sup>3</sup>, sans utiliser de pompe à chaleur. Par contre, avec 30 m<sup>2</sup> de capteurs solaires et un stock d'eau de 10 m<sup>3</sup>, une "maison Minergie", peut être autonome...

- Domaine [utilisation de l'énergie dans le bâtiment](#): l'échange du vitrage, sans adaptation du cadre de la fenêtre, reste le *hit* en terme de rentabilité économique. Les composants thermoactifs (dont la taille a été réduite par cinq) invitent, eux aussi, à un confort renforcé.

- Domaine [chaleur force & rejets de chaleur](#): les projets de démonstration portent leurs fruits: 30% des nouvelles habitations sont équipées d'une pompe à chaleur ! Par ailleurs, les défenseurs de l'environnement peuvent déjà se féliciter du succès du modèle fonctionnel d'une petite unité à l'ammoniac...

- Domaine [eau chaude](#): c'est l'éternel dilemme entre le savoir-vivre et le savoir-économiser, à savoir, profiter de se baigner à deux, ou appartenir à l'élite des 6%, utilisant une douche équipée d'une tête parcimonieuse....

- Domaine [architecture solaire](#): les progrès des matériaux ont rendu caduques les règles de la SIA, émises à la fin des années 80. La SIA recommandait des valeurs  $k = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ , alors que la technologie offre des valeurs trois fois plus petites !

## Responsables de domaine de l'OFEN et chefs de programme de la recherche énergétique

Sous-domaines	Responsables de domaine à l'OFEN	Chefs de programme	
		R & D	P + D
Bâtiments	Martin Stettler	Markus Zimmermann	
Architecture solaire			
Transports (y compris accumulateurs et super-condensateurs)	Martin Pulfer	Martin Pulfer	
Stockage et transport de l'électricité	Thomas Lang	Roland Brüniger	
Utilisation de l'électricité (appareils)			
Couplage chaleur-force (sans les piles à combustible)	Fabrice Rognon	Martin Zogg	Fabrice Rognon
Procédés (dans l'industrie, les arts et métiers, l'agriculture, ...)			Martin Zogg
Chaleur ambiante (pompes à chaleur)			Martin Zogg
Combustion	Alphons Hintermann	Alphons Hintermann	
Hydrogène / Piles à hydrogène / Chimie solaire		Armin Reller	
Stockage de chaleur	Urs Wolfer	Jean-Christophe Hadorn	
Énergie solaire thermique		Jean-Christophe Hadorn	Pierre Renaud
Énergie solaire photovoltaïque		Stefan Nowak	
Biomasse (sans le bois) et piles aux bio-combustibles et au gaz naturel)	Martin Rüeeggsegger	Martin Rüeeggsegger	Martin Rüeeggsegger
Force hydraulique			Hanspeter Leutwiler
Bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli	Christoph-Walter Rutschmann
Géothermie	Martin Brunner	Harald L. Gorhan	
Énergie éolienne		—	Robert Horbaty
Rejets de chaleur		Martin Zogg	Martin Zogg
Technique et sécurité nucléaire	Christophe de Reyff	Wolfgang Kröger	—
Regulatory Research		Philip Tipping	—
Fusion nucléaire		Stéphane Berthet	—
Politique énergétique	Pascal Previdoli	Ruedi Meier	
Économie, société, environnement			
Transferts technologiques	Gerhard Schriber	Rolf Schmitz & Christophe de Reyff	

## Responsables de domaine à l'OFEN

[Daniel Binggeli](#), tél. 031 / 322 68 23  
[Martin Brunner](#), tél. 031 / 322 56 10  
[Alphons Hintermann](#), tél. 031 / 322 56 54  
[Thomas Lang](#), tél. 031 / 322 53 24  
[Pascal Previdoli](#), tél. 031 / 322 56 05  
[Martin Pulfer](#), tél. 031 / 322 49 06  
[Christophe de Reyff](#), tél. 031 / 322 56 66

[Fabrice Rognon](#), tél. 031 / 322 47 56  
[Martin Rüegegger](#), tél. 031 / 322 56 40  
[Rolf Schmitz](#), tél. 031 / 322 54 61  
[Gerhard Schriber](#), tél. 031 / 322 56 58  
[Martin Stettler](#), tél. 031 / 322 55 53  
[Urs Wolfer](#), tél. 031 / 322 56 39

Adresse commune à tous les responsables : **OFEN, 3003 Berne**  
Fax : 031 / 323 25 00  
E-mail : [prenom.nom@bfe.admin.ch](mailto:prenom.nom@bfe.admin.ch)

## Chefs de programme extérieurs à l'OFEN

**Stéphane Berthet**  
OFES, 3003 Berne  
tél. 031 / 322 99 67 – Fax : 031 / 322 78 54  
E-mail : [stephane.berthet@bbw.admin.ch](mailto:stephane.berthet@bbw.admin.ch)

**Roland Brüniger**  
Isenbergstr. 30, 8913 Ottenbach  
tél. 01 / 760 00 66 – Fax : 01 / 760 00 68  
E-mail : [roland.brueiniger@r-brueniger-ag.ch](mailto:roland.brueiniger@r-brueniger-ag.ch)

**Harald L. Gorhan**  
EWE, Bellerivestr. 36, 8034 Zürich  
tél. 01 / 385 27 33 – Fax : 01 / 385 26 54  
E-mail : [harald.gorhan@ewe.ch](mailto:harald.gorhan@ewe.ch)

**Jean-Christophe Hadorn**  
Ch. des Fleurettes 5, 1007 Lausanne  
tél. 021 / 616 28 31 – Fax : 021 / 616 28 31  
E-mail : [jchadorn@swissonline.ch](mailto:jchadorn@swissonline.ch)

**Robert Horbaty**  
ENCO, Bärenwil 195, 4438 Langenbruck  
tél. 062 / 390 16 53 – Fax : 062 / 390 18 73  
E-mail : [robert.horbaty@enco-gmbh.ch](mailto:robert.horbaty@enco-gmbh.ch)

**Wolfgang Kröger**  
PSI, 5232 Villigen  
tél. 056 / 310 27 42 – Fax : 056 / 310 44 11  
E-mail : [kroeger@psi.ch](mailto:kroeger@psi.ch)

**Hanspeter Leutwiler**  
ITECO, Postfach, 8910 Affoltern am Albis  
tél. 01 / 762 18 18 – Fax : 01 / 762 18 15  
E-mail : [iteco@iteco.ch](mailto:iteco@iteco.ch)

**Ruedi Meier**  
Bolligenstr. 14b, 3006 Bern  
tél. 031 / 633 36 22 – Fax : 031 / 333 24 69  
E-mail : [ruedimeier@bluewin.ch](mailto:ruedimeier@bluewin.ch)

**Stefan Nowak**  
Waldweg 8, 1717 St. Ursen  
tél. 026 / 494 00 30 – Fax : 026 / 494 00 34  
E-mail : [stefan.nowak.net@bluewin.ch](mailto:stefan.nowak.net@bluewin.ch)

**Armin Reller**  
BTW, Schlachthofstr. 1, 8406 Winterthur  
tél. 052 / 209 09 90 – Fax : 052 / 209 09 91  
E-mail : [btwag@dial.eunet.ch](mailto:btwag@dial.eunet.ch)

c/o Universität Augsburg, Universitätsstr. 1,  
D - 86159 Augsburg  
tél. 0049 8215983000 – Fax : 0049 8215983002  
E-mail : [reller@physik.uni-augsburg.de](mailto:reller@physik.uni-augsburg.de)

**Pierre Renaud**  
PLANAIR, Crêt 108 A, 2314 La Sagne  
tél. 032 / 931 88 28 – Fax : 032 / 931 18 68  
E-mail : [info@planair.ch](mailto:info@planair.ch)

**Christoph-Walter Rutschmann**  
VHE, Falkenstr. 26, 8008 Zürich  
tél. 01 / 252 30 70 – Fax : 01 / 251 41 26  
E-mail : [rutschmann@vhe.ch](mailto:rutschmann@vhe.ch)

**Philip Tipping**  
HSK, 5232 Villigen  
tél. 056 / 310 39 26 – Fax : 056 / 310 39 95  
E-mail : [philip.tipping@hsk.psi.ch](mailto:philip.tipping@hsk.psi.ch)

**Markus Zimmermann**  
EMPA-KWH, 8600 Dübendorf  
tél. 01 / 823 41 78 – Fax : 01 / 821 62 44  
E-mail : [mark.zimmermann@empa.ch](mailto:mark.zimmermann@empa.ch)

**Martin Zogg**  
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg  
tél. 034 / 422 07 85 – Fax : 034 / 422 69 10  
E-mail : [martin.zogg@bluewin.ch](mailto:martin.zogg@bluewin.ch)

## RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Markus Zimmermann**

[mark.zimmermann@empa.ch](mailto:mark.zimmermann@empa.ch)

---



### Mit Bauteilen Heizen und Kühlen

Niedrigenergiebauten ermöglichen neue Haustechnikkonzepte. In der Messe Zürich wird über die Betondecken geheizt und gekühlt. Thermoaktive Bauteile sind im Kommen. Sie sind kostengünstig, energieeffizient und bieten einen hohen Komfort. (Bild: Atelier WW)

## Einleitung

Der Gebäudebereich beansprucht 60% des schweizerischen Energieverbrauchs. Rund 50% des Energieverbrauchs setzen wir zum Betreiben von Wohn-, Dienstleistungs- und Gewerbebauten ein. Etwa 10% werden für die Herstellung von Baustoffen und Bauprodukten benötigt. Dadurch ist der Gebäudebereich 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.

Die Verbesserungspotenziale sind noch gross, aber schwierig anzugehen. Die Hindernisse sind sowohl technischer, wirtschaftlicher wie auch gesellschaftlicher Natur. Vor allem die Gebäudesanierung stellt oft schwierige Randbedingungen, die eine rasche Umsetzung der grossen, noch vorhandenen Sparpotenziale erschwert.

Die Forschung kann nur selten fertige, direkt umsetzbare Lösungen entwickeln. Ihre Aufgabe ist es vielmehr, der Bauwirtschaft neue Lösungsansätze aufzuzeigen und die Entwicklungsrichtung im Sinne der Nachhaltigkeit mitzuprägen.

Das Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden" [18] ist Teil des **Bereichsprogramms Gebäude** [19] des BFE, welches auch die Umsetzung im Rahmen von *Energie 2000* festlegt.

Das Programm unterstützt vor allem Vorhaben, welche

im öffentlichen Interesse sind, jedoch von der Privatwirtschaft nicht genügend beachtet werden und es bietet Starthilfen für Entwicklungen, die interessant, aber für private Unternehmungen im Alleingang zu riskant sind.

Die dem Forschungsprogramm 1996 bis 1999 zugrunde gelegten Schwerpunkte waren:

- **Anwendungsorientierte, rechenunterstützte Planungswerkzeuge**, insbesondere zur integralen Optimierung von Energiesystemen und für Standardberechnungen
- **Instrumente für Bauabnahme und Energiediagnose** zur einfacheren und effizienteren Überprüfung der Ausführung resp. des Zustands energierelevanter Bauteile und haustechnischer Systeme
- **Ökologische Beurteilung und Minimierung der Umweltbelastung** bei Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Bauteilen und haustechnischen Anlagen, Verbesserung der Bewertungsmethoden und Datengrundlagen für Ökobilanzen, Rückbaubarkeit energetischer Systeme, energetische Optimierung umweltfreundlicher Bauweisen
- **Passive und energiesparende Raumkühlung** (ohne Kältemaschinen)
- **Energetische Gebäudesanierung**, Verbesserung der Dauerhaftigkeit, Zuverlässigkeit und Kosteneffizienz

## Anvisierte Zielpunkte für 1999

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf die Umweltaspekte des Bauens und auf die energetische Optimierung der Gebäudehülle und der haustechnischen Installationen.

Im Umweltbereich standen Grundlagen und Instrumente zur gesamtheitlichen Optimierung von Bauten im Vordergrund:

- Aufarbeitung methodische Fragestellungen für Bauten (lange Nutzungsdauer)
- Start der Arbeiten für eine nationale, harmonisierte Ökoinventar-Datenbank (EcoInvent 2000)
- Fertigstellung und Einführung des Programms OG-IP zur gesamtheitlichen Optimierung von Kosten, Energieverbrauch und Umweltbelastung von Bauten

Im Bereich Gebäudehülle sollten Fortschritte bei den Dämmsystemen erreicht werden:

- Demonstration von Pilotanwendungen mit teileva-

kuierten Hochleistungsdämmstoffen, auch für haustechnische Systeme

- Vorarbeiten zur thermischen Verbesserung von Unterkonstruktionen im Fassadenbereich
- Demonstration von Sanierungstechniken zur Verbesserung thermisch unbefriedigender Verglasungen

Die Projektziele im Bereich Haustechnik sind breit gefächert:

- Erarbeitung einer Planungsrichtlinie für thermoaktive Bauteilsysteme (Heizen / Kühlen mit Bauteilen)
- Verbesserung der Beurteilungsgrundlagen für Öl- und Gasheizkessel und deren Hilfsenergieverbrauch
- Lösungen für kostengünstige kontrollierte Wohnungslüftungen mit Wärmerückgewinnung
- Vereinfachung von Planungswerkzeugen zur Unter-

stützung des Vollzugs, insbesondere im Lüftungsbereich

- Vereinfachung der Diagnosemethoden im Lüftungsbereich

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### UMWELTTECHNIK

Energetische Prozesse sind bei der Umweltbelastung und insbesondere bei der Emission von Treibhausgasen dominant. Dadurch sind auch Gebäude, sowohl durch die Erstellung wie auch durch ihren Betrieb, mit ihren grossen Energie- und Stoffflüssen wichtige Verursacher von Umweltbelastungen. Verschiedene Projekte befassten sich deshalb mit der Erarbeitung von umweltbezogenen Grundlagen und Optimierungswerkzeugen.

Im Rahmen eines IEA-Projekts wurden die **umweltbezogenen Auswirkungen des Bauens** untersucht [1]. Im Vordergrund stehen methodische Ansätze, die es erlauben, die langfristigen, durch Bauten verursachten Auswirkungen auf die Umwelt zu analysieren. Die Arbeiten haben zu einer Dissertation an der ETH geführt. Sie sind im Schlussbericht [20] zusammengefasst.

Das Programm OGIP [2], welches die **gesamtheitliche Optimierung von Energieverbrauch, Umweltbelastung und Baukosten** zum Ziel hat, konnte fertiggestellt werden [21]. Es basiert auf dem in der Baubranche verbreiteten Normpositionenkatalog und der CRB-Elementmethode. Die *Software* erlaubt es 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. Im Frühjahr 2000 werden vom CRB in Zusammenarbeit mit verschiedenen Fachhochschulen und der EMPA Einführungskurse in die Benützung des Programms angeboten.

Mehrere Institutionen des ETH-Bereichs haben sich zu einem **Zentrum für Ökoinventare** zusammengeschlossen. Sie hatten bereits im Vorjahr ein Konzept erarbeitet, wie zukünftig Umweltdaten für die Ökobilanzierung aufbereitet und einem breiten Anwenderkreis benutzerfreundlich zur Verfügung gestellt werden könnten. Ziel ist ein überarbeitetes, harmonisiertes Ökoinventar *ECOINVENT 2000*, welches auf dem Internet zur Verfügung stehen wird. 1999 konnte die Finanzierung des Projekts weitgehend sichergestellt werden, so dass die Arbeiten im nächsten Jahr unter der Leitung der EMPA in Angriff genommen werden können.

Nachdem sich die Fachhochschule beider Basel vergangenes Jahr mit Nachhaltigkeitsfragen des Bauens intensiv auseinandergesetzt hatte, erarbeitete sie nun aus ökologischer Sicht **Kriterien für einen Abbruch/Neubau-Entscheid** oder für eine Gebäudesanierung im Sinne der Nachhaltigkeit [3a].

Um zukünftig vermehrt auch nachwachsende Rohstoffe im Bauwesen einsetzen zu können, wurde mit der Dämmstoffindustrie ein Projekt gestartet, welches die Einsatzmöglichkeiten von **Hanf- und Grasfasern für Wärmedämmungen** untersucht [4]. Beide Rohstoffe sind aus landwirtschaftlicher Sicht interessant und in genügender Menge verfügbar.

### GEBÄUDESYSTEME / GEBÄUDEHÜLLE

Verschiedene Arbeiten befassten sich mit der Optimierung resp. Verbesserung der Gebäudehülle:

Das Projekt **Optimierte Unterkonstruktionen hinterlüfteter Fassaden** [3b] befasst sich mit neuen Lösungen, die eine kostengünstige und thermisch optimierte Aufhängung von Fassadenverkleidungen – auch bei dicken Dämmschichten – ermöglicht. Es wurden Studienaufträge an 10 interdisziplinär zusammengesetzte Teams erteilt, um solche Lösungen zu erarbeiten. Die besten Lösungen sollen im nächsten Jahr anhand von Pilotobjekten demonstriert werden.

**Hocheffiziente Wärmedämmsysteme** [5a] waren lange kein Thema. Der Preiskampf in der Baubranche war zu gross. Neue Entwicklungen waren vor allem für hochwertige Dämmstoffe kaum möglich. Erst die Aussicht auf neue, mikroporöse und teilvakuierte Dämmstoffe, welche bis zu fünf mal weniger Platz beanspruchen als herkömmliche Dämmstoffe, haben das Interesse der Bauwirtschaft geweckt. Fünf Pilotanwendungen (Speicherisolationen, Fensterverbreiterungen, Türen, Fussbodenheizungen und Innendämmungen) konnten mit Unterstützung der Bauwirtschaft in Angriff und teilweise bereits realisiert werden.

Im Fensterbereich wurden in den vergangenen Jahren grosse Fortschritte erreicht. Trotzdem lohnt es sich bei Sanierungen häufig nicht, mit der Verglasung gleich auch noch einen intakten Rahmen zu erneuern. Aus diesem Grund wurden auch **Sanierungssysteme für Fenster** untersucht [5b]. Im Vordergrund stand dabei der Glasersatz durch modernste Wärmeschutzverglasungen, welche in der Lage sind, die herkömmlichen Wärmeverluste um über 50% zu verringern und gleichzeitig den Komfort zu erhöhen. Die Untersuchungen haben jedoch klar gezeigt, dass einer Fenstersanierung durch die Kosten enge Grenzen gesetzt sind. Im Vordergrund stehen Dichtungsmassnahmen und der Glasersatz ohne Anpassungen am Rahmen.

Bei transparenten Bauteilen sind nicht nur die Wärmeverluste, sondern auch die **solaren Wärmegewinne** von grosser Bedeutung. Für die Messung der Wärmegewinne wurden an der EMPA Testzellen aufgebaut, die in der Lage sind, die Wärmegewinne unter realen

Bedingungen sehr exakt zu messen. 1999 wurde in Zusammenarbeit mit Herstellern von Beschattungssystemen eine erste Messserie durchgeführt [6].

## HAUSTECHNIK

Die energieeffiziente Kühlung von Gebäuden mittels passiver und hybrider Techniken war ein Forschungsschwerpunkt während der vergangenen Jahre. Zum Abschluss der Arbeiten wurden die wichtigsten Ergebnisse im **Handbuch der passiven Kühlung** [22] publiziert.

Ein ergänzendes Projekt befasste sich mit der Kühlung und Heizung durch **thermoaktive Bauteilsysteme** [7]. Bei dieser Technik, die sich vor allem 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. Der im Frühjahr 2000 erscheinende Schlussbericht enthält die wichtigen Planungsgrundlagen für dieses Konzept.

Zur Optimierung des Lüftungswärmeverbrauchs wurde zusammen mit dem SWKI ein **Berechnungswerkzeug für den Energiebedarf von Lüftungsanlagen** [9] realisiert. Damit lassen sich auf einfache Weise der jährliche Hilfsenergie- und Lüftungswärmeverbrauch für zentrale Lüftungsanlagen bestimmen. Zurzeit liegt das Programm als Testversion vor. Die Herausgabe des Programms ist für nächstes Jahr vorgesehen.

Bei der Gebäudesanierung sind zentrale Lüftungsanlagen häufig schwierig zu realisieren. Dezentrale Einzelraumlüftungsgeräte sind oft die einzige Alternative. Basierend auf einem Vorprojekt, welches die Einsatzmöglichkeiten der **Einzelraum-Lüftung** an zwei typischen Geräten untersuchte, werden nun die auf dem Markt erhältlichen Geräte auf ihre Eigenschaften (Hilfsenergieverbrauch, Luftmengen, Wärmerückgewinnung und Lärm) getestet [10].

Ebenfalls neue Wege zur Vereinfachung von Lüftungsanlagen werden mit Kanalwärmetauschern [11] gesucht. Dabei werden Zu- und Abluft über Doppelrohre geführt, so dass automatisch eine effiziente Wärmerückgewinnung erfolgt.

Zwei Projekte aus dem Lüftungsbereich befassen sich mit der **Diagnose von Luftwechselraten** (ATEMAC [12a]) und **Leckagen von Lüftungsanlagen** (MEDITA [12b]). Das Projekt MEDITA diente vor allem dazu, die Messtechnik zur Bestimmung der Wirksamkeit von Lüftungsanlagen und deren Wärmerückgewinnung zu vereinfachen. Das Projekt ist abgeschlossen, der Schlussbericht erscheint Anfang 2000 zusammen mit einer *Software*, die eine einfachere Auswertung der Messungen ermöglicht. Die Umsetzung dieser Technik in die Praxis soll nächstes Jahr erfolgen.

Das Projekt ATEMAC setzt auf sogenannte Passive Tracer, auf Proben, die ein Testgas passiv absorbieren.

Aufgrund der Konzentration des aufgenommenen Testgases können Aussagen über den Luftwechsel in Räumen oder über Falschlufte in Lüftungsgeräten gemacht werden. Die Vorarbeiten hatten ergeben, dass mit dieser Technik ein kostengünstiges Diagnoseinstrument zur Bestimmung des mittleren Luftwechsels entwickelt werden kann. Die laufenden Arbeiten haben nun aber gezeigt, dass die Testgase teilweise durch die Baustoffe absorbiert und dadurch die Resultate verfälscht werden. Die weiteren Arbeiten werden sich deshalb vor allem auf die Eignung der Testgase konzentrieren müssen.

Ein grösseres Industrieprojekt befasst sich, im Rahmen der IEA-Aktivitäten, mit **Methoden zur automatischen Fehlerdetektion in Haustechnikanlagen** [13]. Im Vordergrund der schweizerischen Arbeiten steht zurzeit das automatisierte Auffinden nicht korrekt funktionierender Ventile. Das Projekt hat gezeigt, wie schwierig es ist, Fehler in technischen Anlagen einwandfrei zu identifizieren, ohne neue Sensoren einzubauen. Trotzdem brachte das Projekt einige interessante Erkenntnisse, die teilweise bereits von der Reglerindustrie in ihren Produkten berücksichtigt werden. Das Projekt wird Mitte 2000 abgeschlossen.

In der zweiten Phase des Projekts *NEUROBAT* [14] entwickelt die Industrie zusammen mit dem CSEM und der EPFL einen neuartigen Heizungsregler, der nicht mehr auf physikalischen Zusammenhängen basiert, sondern **neuronale Netzwerke und Fuzzy-Logik** verwendet. 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. 1999 wurde ein Prototyp an einem realen Gebäude getestet und einem konventionellen Regler gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind befriedigend. Es konnten auf Anhieb praktisch durchwegs bessere Resultate als mit dem (optimal eingestellten) herkömmlichen Regler erreicht werden.

Zwei weitere Projekte befassten sich mit der Wärmeerzeugung selbst:

Das eine Projekt befasst sich mit dem Jahres- resp. **Normnutzungsgrad für gleitende und kondensierende atmosphärische Gasheizkessel** [15]. Im Gegensatz zum Kesselwirkungsgrad, der bei Volllast gemessen wird, berücksichtigen Jahres- und Normnutzungsgrade auch Teillastzustände, die dem realen Einsatz eines Heizkessels näher kommen. Um nicht zusätzliche Messungen zu benötigen, wurde eine Rechenverfahren entwickelt, welches die Bestimmung des Normnutzungsgrads für sämtliche einstufige Öl- und Gasheizkessel, auch kondensierende, ermöglicht. In einem letzten Schritt sollen auch noch zweistufige und modulierende Heizkessel angegangen werden. Danach ist die Publikation der Kennwerte (BUWAL Typenliste) und die Abgabe des Berechnungsmodells an Hersteller und Planer vorgesehen.

Parallel dazu wird auch der **Hilfsenergieverbrauch von Heizkesseln** genauer untersucht. Vor allem die vielen kleineren Heizkessel mit Leistungen unter 70

kW verursachen einen nicht zu vernachlässigenden Stromverbrauch, der – wie das durchgeführte Vorprojekt [16] gezeigt hat – noch optimiert werden kann.

## Nationale Zusammenarbeit

Von den 1999 laufenden 20 Forschungsprojekten wurden 6 Projekte mit **Fachhochschulen**, 10 Projekte mit **ETH-Instituten** und 11 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 8 Projekten waren planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 2 Projekten wurde mit **Branchenverbänden** zusammengearbeitet.

Bei den Bundesämtern findet vor allem im Umweltbereich 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.

## Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit konzentriert sich mit wenigen Ausnahmen auf die Programme der **Internationalen Energie-Agentur (IEA)** und zunehmend auf diejenigen der **Europäischen Union (EU)**.

Im IEA-Programm *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* war die Schweiz 1999 an zwei Projekten beteiligt.

- *Energy Related Environmental Impact of Buildings*, demnächst abgeschlossen [1]
- *Computer-aided Evaluation of HVAC Performance*, demnächst abgeschlossen [13]

Im Joule-Thermie Programm der EU wurde insgesamt ein Dutzend schweizerischer Projekte unterstützt, wobei noch neun Projekte nicht abgeschlossen sind.

- *AIRLESS*: Planung, Betrieb und Unterhalt von Lüftungsanlagen
- *ECOCOOL*: Umweltfreundliche Gebäudekühlung (mit Kühltürmen)
- *EDIFICIO*: Konzepte für bessere Regelung und Integration
- *DESICAIR COOLING*: Sorptionsgestützte Kühlung
- *NATVENT*: Natürliche Lüftung von Bürobauteilen

- *Optimal Design of Multi-functional and Ventilated Façades*

- *TOBUS*: Planungswerkzeug für Bürogebäude-Sanierungen

- *TRIPLE-SAVE*: Integrierte Systeme für Tageslicht, Lüftung und Solarheizung

- *TIP-VENT*: Optimierung mechanischer Lüftung

Im 3. Rahmenprogramm wurden nochmals drei letzte Projekte bewilligt:

- *CEPHEUS: Demonstration von Null-Heizenergie-Reihenhäuser gemäss Passivstandard*

- *SMART WINDOW: Intelligente, adaptive Steuerung für Sonnenschutz und Tageslicht*

- *INTECOM: Integrierte Regelstrategien für Energiemanagement in Gebäuden*

Zurzeit läuft noch das Genehmigungsverfahren des 4. Rahmenprogramms. Gegen 20 Gesuche wurden zusammen mit ausländischen Partnern in Brüssel eingereicht. Zwei Projekte sind bereits bewilligt:

- *INVENTNET: Netzwerk für industrielle Lüftung*

- *DIAL-EUROPE: Integrales Tageslicht Design Tool*

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Jahr 1999 konnten weitere Projekte abgeschlossen werden. Bei der Lancierung von neuen Vorhaben war einerseits die Rezession im Baugewerbe weiterhin deutlich spürbar, andererseits sind innovative Elemente bei der Haustechnik und bei der Gebäudehülle viel schwieriger zu lancieren. Projektschwerpunkte liegen vermehrt bei energetisch optimierten Sanierungen

unter Berücksichtigung ökologischer und gesundheitlicher Aspekte.

Das **Sanierungsprojekt Mutschellenstrasse** ist abgeschlossen. Das Projekt wurde in der Fachpresse bereits mehrmals vorgestellt und hat wegen der ökologischen Betrachtungen ein grosses Echo gefunden. Ein Synthesebericht des sehr umfangreichen Schlussberichts

wurde als breiter zu streuende Information aufbereitet [25].

Eine weitere **Sanierung** wurde in Lausanne fertiggestellt und wird bis Frühjahr 2000 mit einer Messkampagne begleitet. Der Zwischenbericht des Projektes *Ventilation contrôlée à débit minimal dans un immeuble rénové* [26] zeigt Trends in der Akzeptanz von Wohnungslüftungen auf. Wie bereits aus anderen Projekten bekannt, stehen nicht energetische Probleme im Vordergrund, sondern Komfortfragen (Schallschutz, Zugerscheinungen), bautechnische Probleme (Platzprobleme, Brandschutz) und Kosten.

Im Schlussbericht **Wohnungslüftung Areal Hölzli** [27] in Amriswil TG konnte aufgezeigt werden, dass eine geschickt geplante Wohnungslüftung eine erhebliche Komfortsteigerung ermöglicht. Eine kostengünstige Anlage lässt sich dann realisieren, wenn anstelle einer Abluftanlage für die Sanitärräume eine mechanische Wohnungslüftung mit Zu- und Abluft eingebaut wird. Die Kosten für Betrieb und Amortisation belaufen sich pro Wohnung auf etwa 400.- Fr./a.

Das Projekt **Ökosiedlung Melchrüti, Wohnpark Balance** in Wallisellen mit 62 Wohneinheiten wurde 1999 bewilligt. Bei diesem Projekt mit Minergie-Standard werden auch die Anforderungen von Rating e-top in allen Punkten erfüllt. Das Raumkonzept erlaubt eine Hochwärmedämmung ohne gravierende Wärmebrücken. Der Wärmebedarf für die Raumheizung wird von einem Kombigerät für Lüftung/ Luftheizung und Warmwasser abgedeckt.

Gestartet wurde die **Erfolgskontrolle kontrollierte Wohnungslüftung und Wohnkomfort** bei Mehrfamilienhäusern in Dällikon ZH, um bessere Aussagen über die kontrollierte Wohnungslüftung zu erhalten.

Wegweisend für nachhaltiges Bauen dürfte eine Reihenhaussiedlung in Nebikon sein. Die Häuser in Holzbauweise sind rein passiv beheizt. Mit weniger als 15 kWh/m<sup>2</sup>a erfüllen sie die Anforderungen des europäischen **Passivhaus-Standards**. 1999 konnten im Rahmen des EU-Projekts CEPHEUS die ersten fünf Reihenhäuser erstellt und die Verbrauchsmessungen gestartet werden.

Im Bürobereich wird ein Geschäftsneubau in Esslingen näher untersucht, bei welchem verschiedene **innovative Technologien und nachhaltiges Bauen** demonstriert werden [17]. Im Vordergrund stehen die Erfahrungen mit Quellluftsystemen, Luftansaug-Erdregistern, intelligenter Regelung und Steuerung sowie adaptiver Tageslicht- und Sonnenschutzsysteme. Die Untersuchungen sind nun weitgehend abgeschlossen und werden im Jahr 2000 publiziert.

In einem Gewerbebau wird über ein unter der Fundamentplatte verlegtes **Flüssigkeitserdregister** der Bürobereich gekühlt. Das Projekt zeigt die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen für die Nutzung des Erdreichs für die Spitzendeckung im Sommer. Der Gestellhersteller misst auf eigene Kosten eine weitere Saison, um genauere Werte zu erhalten.

## Bewertung 1999 & Ausblick 2000

Das Interesse der Gesellschaft an Energie- und Umweltfragen hat in den vergangenen Jahren eher nachgelassen. Die Energiepreise sind nach wie vor tief, die vermuteten Reserven gross. Allein die Umweltkatastrophen werden teilweise mit dem Treibhauseffekt assoziiert.

Die Energieforschung im Gebäudebereich hatte sich in diesem Umfeld eher defensiv ausgerichtet. Im Vordergrund stand oft die Verbesserung von Grundlagen, Messtechniken und Planungsmethoden. Innovationen sind dabei eher zu kurz gekommen. Diese sollen in den nächsten Jahren wieder an Bedeutung gewinnen.

2000 steht im Zeichen der Neuausrichtung des Programms. Die im Vorjahr definierten Forschungsschwerpunkte sollen den Rahmen für das Forschungsprogramm 2000 bis 2003 bilden, welcher nun mit konkreten Inhalten zu füllen ist. Dabei soll der aufkommende Schwung in der Wirtschaft dazu genutzt werden, verstärkt mit der Privatwirtschaft zusammenzuarbeiten und konkrete Lösungen zu realisieren.

Die von der Expertengruppe festgelegten Programmschwerpunkte sind:

- Technologien und Verfahren zur konsequenten Reduktion von Wärmeverlusten. Moderne Verfahren und Werkstoffe, die effizient und umweltfreundlich sind, stehen dabei im Vordergrund.
- Bedarfsabhängige Haustechniksysteme zur Deckung des Restenergiebedarfs und zur Sicherstellung des Komforts. Nebst intelligenten Regel- und Steuerkonzepten wird der Hilfsenergieverbrauch und die Integration erneuerbarer Energien besonders berücksichtigt.
- Verbesserung der Bestellerkompetenz. Vorerst sollen vor allem Energietechniken im praktischen Einsatz überprüft und daraus später Leistungsanforderungen und Diagnosemethoden entwickelt werden.
- Grundlagen und Hilfsmittel zur ökologischen Beurteilung von Bauten und energetischen Massnahmen. Im Vordergrund stehen die Arbeiten zur Aktualisierung und anwendungsorientierten Aufbereitung der Ökoinventare, als Basis für zukünftige Untersuchungen und Umsetzungsprojekte.

## Projektliste

- [1] A. Lalive, ETH-Zürich: *IEA/BCS Annex 31: Energy Related Environmental Impact of Buildings* (JB)
  - [2] H.-P. Goeggel, CRB, Zürich: *OGIP '98: Optimierung von Gesamtanforderungen für Energieverbrauch, Umweltbelastung und Baukosten* (SB)
  - [3] A. Binz, FH-Basel, *Muttenz: a) Ökologische Beurteilung von Erneuerungsstrategien im Wohnungsbau* (SB) • *b) Thermisch optimierte Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden* (JB)
  - [4] U. Baserga, FAL, *Tänikon: Einblasdämmstoff aus Faserhanf und Altpapier* (JB)
  - [5] H.-P. Eicher, EICHER & PAULI, *Liestal: a) Realisierung von Demoprojekten mit Vakuum Dämmelementen* (JB) • *b) Sanierung von einfach- und doppelverglasten Fenstern* (SB)
  - [6] H. Simmler, EMPA-Dübendorf: *Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme* (JB)
  - [7] M. Koschenz, EMPA-Dübendorf: *Planungshilfsmittel für thermoaktive Bauteilsysteme* (JB)
  - [8] V. Dorer, EMPA-Dübendorf: *Energiererechnunterstützung für Gebäude- und Haustechniksimulationen* (SB)
  - [9] A. de Martin, G. Zweifel, SWKI, Bern: *Ein- und Ausgabeprogramm für Berechnung des jährlichen Energiebedarfs von Lüftungstechnischen Anlagen gemäss SWKI-Richtlinie 95-3* (JB)
  - [10] H. Manz, EMPA-Dübendorf: *State of the art von Einzelraumlüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung* (JB)
  - [11] H. Huber, HTA-Luzern: *Luftkanal-Wärmetauscher* (JB)
  - [12] C. Roulet, EPF-Lausanne: *a) ATEMAC, Application des traceurs passifs pour l'étude des mouvements d'air et de contaminants* (JB) • *b) MÉDITA, Méthode de diagnostique des installations de traitement d'air* (SB)
  - [13] P. Gruber, LANDIS & STÄFA, *Zug: IEA/BCS Annex 34: Fehlerdetektion- und Diagnosemethoden* (JB)
  - [14] J. Kraus, CSEM Neuenburg / C. Oberholzer, SAUTER, Basel: *Neurobat, Neurofuzzy-Heizungsregler* (JB)
  - [15] St. Remund / J. Brenn, EMPA-Dübendorf: *Rechenmodell zur Bestimmung des Nutzungsgrads atmosphärischer Gasheizkessel* (SB)
  - [16] P. Graf, B&H, Zürich: *Hilfsenergie Feuerungen – Vorprojekt* (SB)
  - [17] Ch. Filleux, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Demonstration innovativer Technologien und nachhaltigen Bauens am Geschäftshaus Esslingen* (JB)
- (JB) Jahresbericht 1999 vorhanden  
(SB) Schlussbericht vorhanden

## Referenzen

- [18] M. Zimmermann, EMPA-Dübendorf: *Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden*, Januar 1996, rev. Januar 1998
- [19] P. Burkhardt et al, BFE, Bern: *Hauptbereichsprogramm Gebäude 1996 – 1999*, November 1996, rev. September 1997
- [20] A. Lalive d'Épinay, ETH, Zürich: *Schlussbericht IEA-BCS Energy Related Environmental Impact of Buildings* (deutsch), Bezug ab April 2000, Dübendorf
- [21] H.P. Goeggel, CRB, Zürich: *OGIP – Bauplanerwerkzeug zur gesamtheitlichen Optimierung von Baukosten, Energiebedarf und Umweltbelastung*, Beta-Version, Januar 2000
- [22] M. Zimmermann et al, EMPA, Dübendorf: *Handbuch der passiven Kühlung*, Juni 1999
- [23] R. Uetz, INTEP, Zürich: *Messprojekt Luftansaug-Erdregister Centro Tecnico Giubiasco*, 2000
- [24] R. LÜTHI, Regensberg / H. Bertschinger, EMPA-Dübendorf: *Messprojekt Niedrigenergiehäuser Dielsdorf*, 2000
- [25] K. Viridén, Architekt, Zürich: *Mutschellenstrasse 103 – Eine mustergültige Sanierung*, Oktober 1999
- [26] L. KELLER, Lavigny: *Ventilation contrôlée à débits minimal dans un immeuble rénové*, novembre 1999

- [27] P. FORRER, *Oberaach: Bedarfslüftung Areal Hölzli – Schlussbericht über Energieverbrauch, Raumluftqualität, Wirtschaftlichkeit*, Dezember 1999  
Bezug der referenzierten Publikationen soweit nicht anders vermerkt: EMPA ZEN ([ZEN@empa.ch](mailto:ZEN@empa.ch)),  
8600 Dübendorf

## RATIONELLE ENERGIENUTZUNG WARMWASSER

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Thomas Lang**

[thomas.lang@bfe.admin.ch](mailto:thomas.lang@bfe.admin.ch)

---



### **Wassererwärmer auf dem Prüfstand**

Mit einem Ringversuch wurde die Qualität der Werkprüfstände für die energietechnische Prüfung von Wassererwärmern, Warmwasser- und Wärmespeichern untersucht.

# Einleitung

## SCHWERPUNKTE DES PROGRAMMS

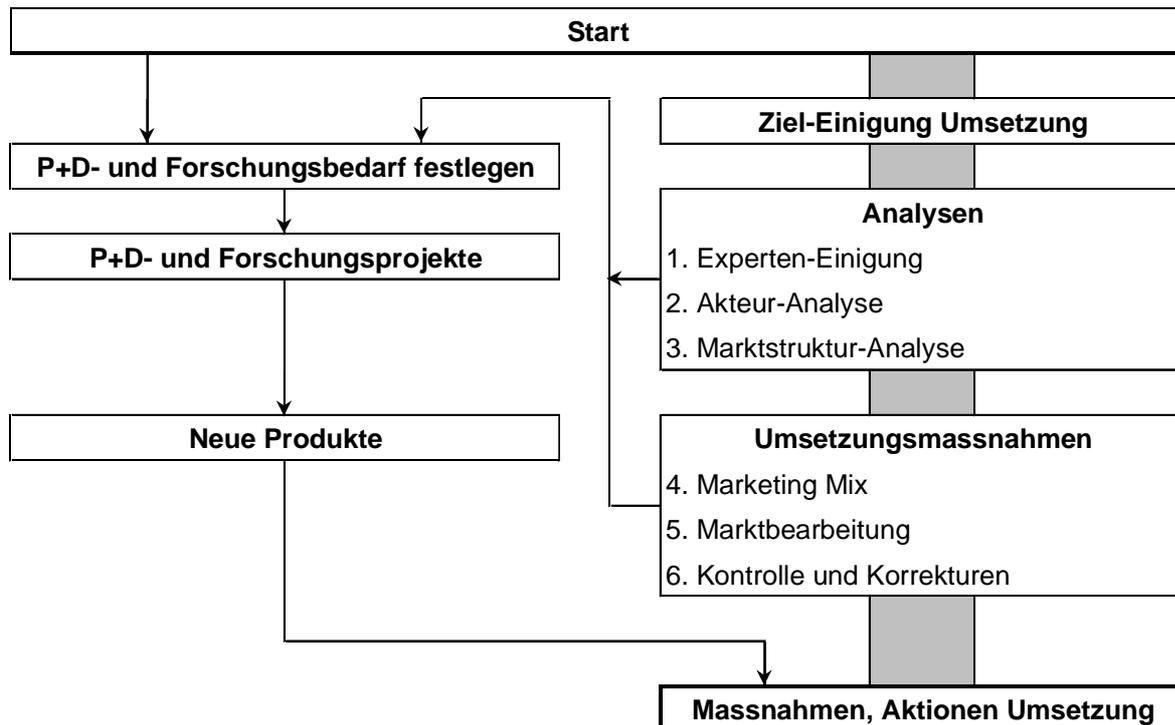
Das Warmwasserprogramm hat folgende Schwerpunkte:

1. Breite Umsetzung des vorhandenen Wissens im Warmwasserbereich mittels Social-Marketing Ansatz
  - bessere Installationen
  - bewussteres Verhalten
2. Bedarfsorientierte Forschung
  - Schwerpunkte bei den Gebäuden sind die Haushalte (MFH, EFH)
  - Schwerpunkte bei der Wassererwärmung sind Öl-, Gas- und Elektro-Wassererwärmer

## SOCIAL-MARKETING ANSATZ

Das Programm wird von der Umsetzung geprägt. Die Idee des Social-Marketing Ansatzes ist, dass der Erfolg einer breiten Umsetzung von folgenden Faktoren abhängig ist:

1. Die Experten müssen sich einig sein, welches die technisch richtigen Lösungen sind. Solange keine Experten-Einigung stattgefunden hat, gibt das BFE keine Empfehlungen ab.
2. Damit eine Verhaltensänderung eingeleitet werden kann, müssen die Akteure erkannt und gefunden werden:
  - Wie weit werden die technisch richtigen Lösungen bereits heute angewendet?
  - Weshalb befolgen die einzelnen Akteure zum Teil die Empfehlungen nicht?
  - Welches sind die möglichen Motive, damit diese befolgt werden?
3. Für eine effiziente Verbreitung der neuen Erkenntnisse muss erforscht werden, über welche Kanäle die Akteure ihre Informationen und Hilfsmittel beziehen. Wenn es gelingt, diese Anliegen über die bestehenden Kanäle zu verbreiten, kann die Information in einem lohnenden Kosten/Nutzen-Verhältnis gestreut werden.



Struktogramm Ablauf Warmwasserprogramm: Aus den Umsetzungsaktivitäten wird der Forschungsbedarf bestimmt.

## Anvisierte Zielpunkte für 1999

Die Ziele des Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramms "Rationelle Energienutzung Warmwasser" sind abgestimmt auf das Haupt-Bereichsprogramm Gebäude, welches auch das Forschungsprogramm Solararchitektur, sowie die Programme des BFE zur Markteinführung (Energie 2000) enthält.

Als übergeordnetes Ziel wurde die verstärkte Umset-

zung der Forschungsergebnisse in die praktische Anwendung angestrebt.

Bei den Pilot- und Demonstrationsprojekten war eine aktivere Programmgestaltung vorgegeben.

Die technologischen Zielsetzungen hatten sich auf die in der Einleitung erwähnten Schwerpunkte zu konzentrieren.

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### **Expertengespräche [1]**

Im Rahmen der Analysen für das Social-Marketing war der Abschluss der Expertengespräche Warmwasser das zentrale Element.

In einer Expertenrunde wurden vorwiegend Thesen bezüglich energetischer Optimierung von Warmwassersystemen diskutiert, zu denen es widersprüchliche Aussagen von Experten oder in der Fachliteratur gibt. Das Resultat dieser Diskussion liegt nun als Zusammenfassung vor und soll in eine breitere Vernehmlassung gegeben werden.

Die Verhaltensregeln für einen sparsamen Umgang wurden nicht bearbeitet, da sie in anderen Energie 2000 Programmen hinlänglich unter Experten diskutiert wurden. Bekannt und unbestritten sein heisst aber noch nicht, im gewünschten Masse in der Praxis umgesetzt. Die steigenden Wasserpreise dürften, vor allem wenn sie in den Medien thematisiert werden, eine Veränderung des Verhaltens beim rationellen Umgang mit dem Warmwasser positiv beeinflussen. Durch die verhaltensbedingten Einsparungen wird der Energieverbrauch für Warmwasser jedoch nicht im selben Mass zunehmen wie die Komfortansprüche bezüglich Warmwasser steigen.

### **Akteur-Analyse [2]**

Die Analyse wird von Netmarketing, Werner Lüthy Dinhard durchgeführt.

In diesem Projekt soll die Frage beantwortet werden: "Wie weit erfüllen heute neu gebaute oder sanierte Warmwasseranlagen die Kriterien, die eine energiesparende Installation auszeichnen, und weshalb sind allfällige Abweichungen heute noch üblich". Das Ziel ist es, genügend genau abzuschätzen, wie gross die Differenz ist, zwischen dem, was installiert werden könnte und was installiert wird. Zudem sollen genügend Kenntnisse zusammengetragen werden, welche Motive die Akteure hindern, eine energetisch bessere Lösung zu wählen. Der Schlussbericht liegt im Frühjahr 2000 vor.

### **Simulation Warmwassersysteme [3]**

Die Arbeitsgemeinschaft ALPHA REAL, ARENA,

CARBOTECH und IC Haustechnikplanung führte das Forschungsprojekt durch. Das Projektziel war, verschiedene Standard-Situationen dynamisch zu simulieren und zu vergleichen. Nebst energietechnischen Betrachtungen wurden die ökologischen und ökonomischen Aspekte der Systeme untersucht. Der Schlussbericht liegt vor.

### **Kennzeichnung energetisch guter Wasserarmaturen, Duschbrausen und Strahlregler [4]**

Mittels Entscheidungshilfen (Labels) soll die Kompetenz der Besteller zur Beurteilung von energetisch guten Komponenten auf einfache Weise verbessert werden. Der Diskussionsvorschlag, welcher die Firma OEKAG für angewandte Ökologie Luzern ausgearbeitet hatte wurde in einer Expertenrunde diskutiert. Die zweite Expertenrunde findet, unter der Leitung von K.M. MARKETING, im Januar 2000 statt, so dass das Projekt bis Ende Februar 2000 abgeschlossen werden kann.

### **Wärmerückgewinnung aus dem Duschenabwasser**

[5]

Für das Duschen wird in einem energieoptimierten Neubau ein erheblicher Anteil der Energie verwendet. Die Dusche ist ein Ort, welcher sich besonders für eine Wärmerückgewinnung eignet. Für das von der Firma AMSTEIN + WALTHERT erarbeitete Konzept wurde ein Industriepartner gefunden, welcher an der Entwicklung und einem späteren Vertrieb interessiert ist. Die Materialwahl, die hohen Anforderungen an die Beschichtungen und an die Dichtungen, stellen eine grosse Herausforderung dar. Ein Prototyp wurde erstellt und kann im Januar 2000 bei der Fachhochschule Luzern geprüft werden.

### **Dusch- und Badeverhalten [6]**

In einer repräsentativen Umfrage wurde das Dusch- und Badeverhalten der Schweizer Bevölkerung analysiert. Die Umfrage zeigt, dass die Schweizer ein Volk von Duschern sind. Dass man duschen statt baden sollte, braucht man nicht mehr zu kommunizieren. Andererseits zeigt die Umfrage auch klar, dass es oft nur beim Vorsatz "sparen" bleibt, denn obwohl 49% schon von Wassersparmassnahmen gehört haben, besitzen nur 6%

eine wassersparende Duschbrause. Betrachtet man die verschiedenen Kategorien, zeigt sich, dass die Jungen (15- bis 30-jährigen) mit Abstand am längsten duschen. Die älteren (51- bis 71-jährigen) Leute gehen andererseits aus "Gewohnheit" und unbewusst sparsam mit dem Wasser um.

#### **Legionellen in Warmwasseranlagen [7]**

Legionellen sind ein Dauerthema beim Warmwasser. Damit hygienetechnisch und energetisch sinnvolle Lösungen möglich sind, werden in einer Expertengruppe verschiedene Fragen zum Thema Legionellen und Energie diskutiert. Das Projektziel ist, für die Installateure einfache und praxisgerechte Empfehlungen zum Thema zu erarbeiten. Das Projekt wird voraussichtlich Mitte März 2000 abgeschlossen.

#### **Ringversuch Wassererwärmer [8]**

Im Rahmen der Typenprüfung Wassererwärmer wurde 1998/99 ein Ringversuch durchgeführt. Alle vom BFE anerkannten Prüfstellen ermittelten die Wärmeverluste des selben Prüflings. Die Ziele waren, die Messmethoden und Messergebnisse der Werkprüfstände untereinander zu vergleichen. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Prüflabors werden als kompetent beurteilt.
- Im energetischen Prüfverfahren sind einige Präzisierungen notwendig, welche bei der laufenden Überarbeitung einfließen werden.
- Die Werkprüfstände ermittelten durchwegs höhere Wärmeverluste des Prüflings als der Referenz-Prüfstand der Lehrwerkstätten der Stadt Bern.

## **Pilot- und Demonstrationsprojekte**

#### **Warmwassersystem mit Temperaturerhaltung ohne Hilfsenergie [9]**

Im Rahmen des Forschungsprojekts Simulation Warmwassersysteme wurde ein Vorschlag erarbeitet, welcher die Temperaturerhaltung der Warmwasserleitung ohne Hilfsenergie gewährleisten soll. Die dynamische Simulation des Vorschlags zeigte, dass dies energetisch eine interessante Lösung darstellen könnte. Der Vorschlag sieht vor, die Temperaturerhaltung der

Warmwasserverteilung in der Steigzone mit einer rohrinternen Zirkulation aufrechtzuerhalten. Dazu wurde die Steigleitung sehr gut wärmegeämmt. Mit einem Messprojekt sollte das reale Verhalten des Systems verifiziert werden. Es zeigt sich, dass die reale Auskühlung des Verteilsystems um 6 °C tiefer liegt als bei der Simulation. Zudem konnten verschiedene Optimierungsvorschläge erarbeitet werden. Der Schlussbericht wird Ende Februar 2000 erwartet.

## **Transfer in die Praxis**

Die Studie zum Dusch- und Badeverhalten zeigte auf, dass im Bereich "Verhalten" ein Handlungsbedarf besteht. Daher wird im 4. Quartal 2000, zusammen mit dem BUWAL (Abteilung Gewässerschutz und Fischerei) und verschiedenen Marktpartnern (Hersteller, Handel) eine gesamtschweizerische Kampagne zum Thema Warmwassersparen durchgeführt. Ziel der Kampagne "Lustvoll sauber und frisch – mit weniger

Energie" ist es, die Bevölkerung zum Thema Energie- und Warmwasser zu sensibilisieren und die Nachfrage nach "energiesparenden" Warmwasserprodukten zu erhöhen. Mit der Durchführung der Kampagne ist die Firma K.M. Marketing, Winterthur beauftragt. Eine Informationsbroschüre, welche die Situation und das geplante Vorgehen beschreibt, kann direkt beim Programmleiter bezogen werden. [10]

## **Ausblick 2000**

Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt Warmwassersysteme sollen in die Praxis implementiert werden.

Sobald die Akteur-Analyse abgeschlossen ist, können im Rahmen des Social-Marketing Konzepts die Umsetzungsaktivitäten genau definiert werden. Ein

Schwerpunkt bei der Umsetzung konnte bereits bestimmt werden: Aufgrund der Analysen wurde ein Sensibilisierungsbedarf der Benutzer und Benutzerinnen zum Thema "Warmwasser und Energie" ermittelt. Mit der Kampagne "Lustvoll sauber und frisch – mit weniger Energie" wird somit der Teil "bewussteres Verhalten" abgedeckt.

## Projektliste

- [1] T. Lang, BFE *Bern* und R. Messmer, K.M. Marketing, *Winterthur*: **Schlussbericht Zusammenfassung der Expertengespräche Warmwasser** (Vernehmlassung-Exemplar 1999 d,f),
- [2] W. Lüthy, Netmarketing: **Akteur-Analyse Warmwasser** (ZB)
- [3] ARGE ALPHA REAL, ARENA, CARBOTECH, IC Haustechnik, *Zürich*: **Forschungsprojekt Warmwassersysteme** (SB) / BBL-EDMZ 805.320 d
- [4] C. Kaspar K.M. MARKETING, *Winterthur*: **Arbeitspapier 1. Workshop**
- [5] J. Ganz, AMSTEIN + WALTHERT, *Zürich*: **Wärmerückgewinnung Duschen-Abwasser**
- [6] J. Honegger, ERNST DICHTER, *Zürich*: **Dusch- und Badeverhalten** (SB) / BBL-EDMZ 805.321 d
- [7] H. Hediger, HEDIGER, *Zürich*: **Legionellen in Warmwasseranlagen**
- [8] T. Lang, BFE, *Bern*: **Ringversuch Wassererwärmer** (SB)
- [9] ARGE ALPHA REAL und IC Haustechnik, *Zürich*: **Messprojekt: Warmwassersystem mit Temperaturerhaltung ohne Hilfsenergie**
- [10] C. Kaspar K.M. MARKETING, *Winterthur*: **Kampagne "Lustvoll sauber und frisch – mit weniger Energie"**

(SB) Schlussbericht 1999 vorhanden

(ZB) Zwischenbericht vorhanden



## SOLARARCHITEKTUR

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**S. Robert Hastings**

[robert.hastings@freesurf.ch](mailto:robert.hastings@freesurf.ch)

---



### **Siedlung GWL-Terrain**

West Park District, Amsterdam NL / Architekt: Christiaanse, De Kovel, Neutelings, Meyer & Van Schooten.  
(ETH-Seminarwoche Solararchitektur, April 1999)

## Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele für 1999

Die Solararchitektur strebt an, Gebäude so zu gestalten, dass die Sonne gezielt als Licht- und Wärmequelle einbezogen wird, um den Verbrauch nicht erneuerbarer Energieträger extrem tief zu halten. Orientierung und Form des Gebäudes, Verhältnis von transparenten zu opaken Teilen in der Gebäudehülle, Zonierung, Materialien und Anordnung der thermischen Masse werden so gewählt, dass möglichst viel der angebotenen Sonnenenergie aufgenommen und sofort oder zeitlich verzögert an das Haus abgegeben wird, um die Komfortansprüche der Bewohner zu erfüllen. Dabei soll im Sommer keine Überhitzung auftreten. Durch Zusammenarbeit mit Industrie, Forschungsinstituten und Schulen werden Grundkenntnisse und praktische Erfahrungen gewonnen, die Kostensenkungen und den Marktdurchbruch erlauben sollen.

Gesucht sind gebäudeintegrierte Systeme: Systeme, die mehrere Funktionen erfüllen, lassen sich schneller amortisieren. Für Sanierungen sind Lösungen mit einem grossen Verbreitungspotenzial anzustreben, bei Neubauten ist eine hochgedämmte, dichte Gebäudehülle eine Voraussetzung. In beiden Fällen ist eine gesamtheitliche Betrachtung des Gebäudes unerlässlich und die Optimierung soll auf Kombinationen von Massnahmen beruhen, nämlich Energiesparmassnahmen, Nutzung von erneuerbarer Energie und effizienten Systemen für die Deckung des kleinen Restbedarfs. Wegen beschränkter, sogar reduzierter Forschungsmittel ist eine starke Zusammenarbeit und Gewinnung von relevanten Erfahrungen mit Partnern im Ausland von grösster Bedeutung.

### Ziele für 1999

- Aufarbeitung methodischer Fragestellungen für Bauten (lange Nutzungsdauer)
- Weiterentwicklung bzw. Überprüfung von Planungsinstrumenten für die Beurteilung von Massnahmen bei Gebäuden mit extrem niedrigem Energieverbrauch
- Erprobung von Konzepten für die Solarnutzung bei Sanierungen
- Weiterentwicklung von Verfahren zur indirekten Nutzung der Sonne (Solarluftsysteme, transparente Wärmedämmung, hybride PV-thermische Systeme)

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### PLANUNGSINSTRUMENTE

#### Praxisnahe Validierung von Simulationsprogrammen [3]

Ziel ist es, die in der Schweiz gebräuchlichen Gebäudesimulationsprogramme einer praxisnahen Validierung anhand von Messdaten zu unterziehen. Im Berichtsjahr wurde der auf das neue Simulationsprogramm IDA von Bris Data AB, Stockholm (Schweden) verlagert. Es soll auf seine Eignung für eine Anwendung in der Schweiz hin untersucht und soweit nötig den schweizerischen Bedürfnissen angepasst und optimiert werden. IDA ist ein auf Komponenten basierendes Gebäudesimulationsprogramm. Es bietet dem Benutzer eine Standardoberfläche, die aus einer beschränkten Anzahl von Systemkomponenten und einem Gebäudemodell besteht. Der Vorteil von IDA ist, dass das Standardmodell problemlos mit Komponenten erweitert werden kann. Die Tests sind im Gange. Bereits kann gesagt werden, dass es sich bei IDA-ICE um ein Simulationsprogramm mit hohem Anwendungspotenzial handelt. In der Europäischen Normen-Arbeitsgruppe werden neue Normen erarbeitet betreffs Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen sowie der sensiblen Raumkühllast. Die Tests

der beiden Normen mit DOE und IDA-ICE sind weit fortgeschritten und können mit kleinem Aufwand abgeschlossen werden. Gewisse Unklarheiten müssen jedoch noch von Seite der Normenkommission behoben werden. Das Projekt ist verknüpft mit dem IEA-Projekt, *Building Energy Analysis Tools*, der Abschluss ist für September 2000 vorgesehen.

#### *Développement d'une méthode de planification pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire* [10]

Das Projekt hat als Ziel, Werkzeuge für den Planungsprozess grosser Gebäude im Hinblick auf optimale Nutzung der Sonnenenergie zu entwickeln. Zunächst wurde der Bestand von Hilfsmitteln für die Planung grosser Gebäude im Hinblick auf geringen Energieverbrauch aufgenommen. Die gefundenen Planungswerkzeuge wurden analysiert und auf Schwachstellen untersucht. Diese Analyse zeigte, dass für den Bereich integrale Energieplanung geeignete Werkzeuge fehlen. Weitere Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, Regeln aufzustellen, welche gewährleisten, dass vom Entwurfsstadium bis zur Feinplanung die energetischen Aspekte berücksichtigt werden. Ein Teil der künftigen Arbeit wird es sein, diese Regeln zu formulieren.

### *DIAL Etude des performances d'un dispositif anidolique* [4]

Das Projekt hatte zwei unterschiedliche Ziele. Eine Erweiterung von DIAL sowie Studien über anidolische Systeme. DIAL ist ein Informatikwerkzeug, das den Planer beim Entwerfen von Tageslichtsystemen unterstützt. DIAL wurde durch Einfügen einer Schnittstelle zu ADLINE, durch Einbau von Atrien und angrenzenden Büroräumen sowie eine Erweiterung der interaktiven Wahlmöglichkeiten aufgewertet. Im Weiteren wurde eine englische und deutsche Version angefertigt. Das Programm steht in einer neuen Version 3a zur Verfügung. An anidolischen Lichtlenkvorrichtungen wurden Leistungsmessungen vorgenommen und zwei Varianten von fassadenintegrierten Anordnungen untersucht.

### *Chaîne de mesure de lumière naturelle – Analyse de bâtiment* [6]

Es wurde eine Vorrichtung gebaut, mit der Tageslichtfaktoren in Gebäuden vollautomatisch gemessen werden können. Sie besteht aus acht Beleuchtungsmessern für den Einsatz im Innern und einem zur Messung der horizontalen Aussenhelligkeit. Die Messdaten werden auf einem Computer gespeichert. Im abgelaufenen Jahr wurden die elektronischen Schaltkreise entwickelt und gefertigt. Mit Hilfe des Geräts wurden zwei Gebäude ausgemessen und dokumentiert. Das Projekt ist abgeschlossen.

## **ERPROBUNG VON KONZEPTEN FÜR DIE SOLARNUTZUNG BEI SANIERUNGEN**

### **Nutzung der Sonnenenergie bei Gebäudesanierungen** [5]

Während fünf Jahren untersuchten Experten aus sechs IEA Ländern Potenzial und Möglichkeiten zum Einbezug der Nutzung der Sonnenenergie bei Sanierungsmassnahmen. Als Resultat liegen ausführliche Dokumentationen für folgende Massnahmen vor: Solare Warmwasserkollektoren, Balkonverglasungen und solare Wandheizung mit transparenter Wärmedämmung.

### **Solarluftsysteme mit geschlossenem Kreislauf für die Sanierung von Wohnbauten** [9]

Mit diesem Projekt wurde ein Musterkonzept für ein solares Doppelfassadensystem entwickelt, das sich auch bei Sanierungen einsetzen lässt. Die wesentlichen Erkenntnisse sind (gültig für Klima im Mittelland)

- Die Kollektorfläche sollte ca. 20% der Fassadenfläche betragen
- In den Wintermonaten ist der Wärmeertrag bescheiden, im März und April optimal
- Optimaler Neigungswinkel 45° bis 60°, bei vertikaler Montage resultiert ein Verlust von 20%
- Orientierung Süd  $\pm$  30°, bei 30° Abweichung resultiert eine Einbusse von 7% bei 45° Neigung
- Die optimale Spaltdicke liegt zwischen 5 und 6 cm
- Es soll bei einer Sanierung mit Doppelwandfassade ein höherer Wärmedämmstandard angestrebt werden als nach Musterverordnung MVO92 verlangt
- Fassaden mit vielen Auskragungen oder Balkonen eignen sich nicht für dieses Prinzip

### **Kollektorfassade und Kollektordach als Luftsystem bei einer Gebäudesanierung** [13]

Das ganze Süddach eines renovierten Einfamilienhauses ist als Luftkollektor (40m<sup>2</sup>) ausgebildet und an der Südfassade sorgt ein verglaster Rücklaufkanal (5 m<sup>2</sup>) für zusätzliche Solarenergienutzung. Die solar erwärmte Luft durchströmt zuerst einen Luft – Wasser Wärmetauscher zur Brauchwarmwasservorwärmung, dann die Wände (Murokausten) und die Böden (Hypokausten).

Heizperiode (Oktober bis April): **Solarer Deckungsgrad: 58% (Heizung) / 30% (WW)**

- Ertrag solares Luftsystem, Ventilatorbetrieb, Heizung: 3400 kWh / Warmwasser: 300 kWh
- Zusatzwärmebedarf Raumheizung: 1,6 Ster Buche: 2500 kWh
- Elektrobedarf Warmwassernacherwärmung: 700 kWh

Sommerperiode (nur Warmwasser): Solarer Deckungsgrad: **75%**

- Ertrag solares Luftsystem, ohne Ventilator, Warmwasser: 400 kWh
- Elektrobedarf Warmwassernacherwärmung: 135 kWh

Durch einen leicht grösseren Wärmetauscher mit stärkerer Gegenstromcharakteristik könnte der Deckungsgrad Warmwasser im Winter auf 50% und im Sommer auf 90% angehoben werden. Im Sommer, bei mit Aussenluft frei durchströmten Kollektoren wurden 20% der Ventilatorluftleistung gemessen.

Die gemessenen Kollektorwirkungsgrade liegen erwartungsgemäss etwa 30% unter jenen von Hochleistungskollektoren. Geht man aber von der doppelten Kollektorfläche aus, welche immer noch deutlich weniger Kosten verursacht, so ergibt sich ein wesentlich höherer Ertrag und wirtschaftliche kWh-Preise. Im Weiteren unterstreichen die Ergebnisse das schon länger bekannte Phänomen, das vertikale Kollektorflächen (Trun) deutlich in einem höheren Wirkungsgradbereich arbeiten als geneigte (Horw). Das Projekt konnte eindeutig die sehr gute technische und wirtschaftliche Eignung solarer Luftsysteme für (umfassende) Gebäudesanierungen nachweisen.

## **VERFAHREN ZUR INDIREKTEN NUTZUNG DER SONNE**

### **Tageslichtnutzung in Tunnels** [1]

In diesem Projekt wurde untersucht, wie Tageslicht mittels anidolischer Lichtlenksysteme in den Einfahrtbereich von Tunnels eingebracht werden kann und ob sich damit Elektrizität sparen lässt. Die Beleuchtungsverhältnisse wurden mit Simulationsrechnungen und Modellmessungen untersucht. Das Sparpotenzial für alle einschlägigen Tunnels in der Schweiz wird auf 20 bis 24 MWh/a geschätzt. Verglichen wurden auch Systeme, bei denen Photovoltaikanlagen aufgestellt und mit dem Strom Lampen gespeist werden. Zwar besteht eine grosse Unsicherheit in den Herstellungskosten anidolischer Systeme, doch kann gesagt werden, dass die optische Lösung günstiger oder höchstens gleich teuer zu stehen kommt wie die photovoltaische. Neben dem

energetischen Aspekt spielen auch Sicherheitsaspekte eine Rolle, da sich das Auge bei Tageslicht im Bereich der Tunneleinfahrt schneller an die Dunkelheit anpasst.

### Solare Luftsysteme für Gebäude [14]

Ein IEA-Forschungsprojekt unter schweizerischer Leitung bei dem ein *Engineering* Handbuch erstellt worden ist. Es besteht aus einer Vielzahl von Faustregeln, um grob mittels Nomogrammen und um genauer mit einem komplementären PC Programm (TRNSAIR) sehr fallspezifisch den Energieertrag abzuschätzen. Sechs Arten von Systemen sind im Detail vorgestellt und bieten unterschiedliche Lösungen um dem Raum zugeführte Frischluft und sogar Verbrauchswasser zu erwärmen. Die Unterlagen basieren auf hunderten von detaillierten Computersimulationen mit TRNSYS von einem Team von Experten in zehn europäische Ländern. Das Buch soll Anfang des Jahrs 2000 erhältlich sein.

### Messprojekt WASAG, Photovoltaik- und Luftabsaugfassade [7]

Das Energiekonzept des Produktions- und Verwaltungsgebäudes WASAG für Wärme und Stromversorgung will durch optimale Nutzung von Solarenergie und weiterer vorhandenen Energien einen möglichst hohen Eigendeckungsgrad erreichen. Kernpunkt der Anlage sind die 500 m<sup>2</sup> grosse SOLARWALL und die 640 m<sup>2</sup> grosse hybrid genutzte Photovoltaikanlage. Diese SOLARWALL ist die erste in der Schweiz, damit sollen Erfahrungen gesammelt werden über Ertrag und Effizienz. Für eine hybrid betriebene Photovoltaikanlage ist die Luftmenge der Hinterlüftung ein wichtiger Parameter. Sie beeinflusst einerseits die Temperatur der Photovoltaikmodule, andererseits die gewonnene Wärmeenergie. Die Luft von Photovoltaikanlage und SOLARWALL werden vor Eintritt in den Lüftungsmo- noblock gemischt. Ein Schwerpunkt des Projekts ist es deshalb, die Betriebsstrategie für das Verhältnis der beiden Luftmengen festzulegen. Leider verhinderten Datenverluste, das Ziel zu erreichen.

Ein Luftkollektor kann mit einer wichtigen Kenngrösse beschrieben werden, nämlich mit dem spezifischen Luftvolumenstrom, das heisst dem Luftvolumenstrom pro Quadratmeter Luftkollektor. Die Werte liegen gemäss neueren Erkenntnissen zwischen 40 und 120 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>. Die SOLARWALL der WASAG liegt mit 19,4 recht deutlich unter diesem Wert. Beim Analysieren der Werte fällt auf, dass das theoretische Maximum der Auslegung, nämlich ein Volumenstrom von 19,4 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup> praktisch nie erreicht wird. Die meiste Zeit liegen die Werte zwischen 6,0 und 8,0 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup>. Dadurch lässt sich jedoch das Verhalten der SOLARWALL nur ungenügend beschreiben, weil die Werte eine zu geringe Streuung aufweisen. Als Beispiel wurde bei einer Einstrahlung von rund 825 W/ m<sup>2</sup> der Wirkungsgrad errechnet, der jedoch lediglich gute 2,5% erreichte. In der Regel liegt der thermische Wirkungsgrad im Bereich zwei- bis dreimal des elektrischen Wirkungsgrads der Photovoltaik. Aufgrund des geringen Luftvolumenstroms kann geschlossen werden, dass die SOLARWALL im Spargang betrieben wird und wesentlich leistungsfähiger wäre. Aufgrund der grossen Menge an Messpunkten mit einem Luftvolumenstrom um 7 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup> kann davon ausgegangen werden, dass sich die Regelung der Luftmenge noch optimieren lässt.

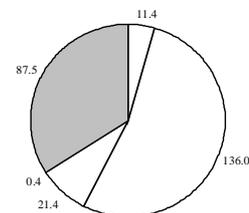
Dann liesse sich der ganze Bereich bis zum Maximum bei rund 18,5 m<sup>3</sup>/h m<sup>2</sup> nutzen. Dies ist im Messprojekt unter dem Stichwort "Optimierung der Regelstrategie" vorgesehen, konnte aber leider bis jetzt noch nicht umgesetzt werden.

### Messungen und Simulationsrechnungen MFH Holinger [8]

Mittels Messungen und Simulationsrechnungen soll untersucht werden, inwieweit sich die im Solarhaus Holinger installierten Heizsysteme ergänzen oder konkurrenzieren. Die Wohnungen werden über ein Luftsystem geheizt; die Wärmeabgabe erfolgt über ein bodenverlegtes Hypokaustsystem. Als Zusatzheizung steht in jeder Wohnung ein mit Stückholz betriebener Speicherofen. Eine kontrollierte Lüftung, die pro Wohnung manuell geschaltet wird, saugt aus Küche und Nassräumen die Luft ab. Die Abwärme wird der Zuluft zugeführt, die zuvor über ein Erdregister vorgewärmt worden ist.

Von Oktober 1998 bis April 1999 wurden alle für die Raumheizung wichtigen Grössen messtechnisch erfasst. Die Auswertung der monatlichen Energiebilanzen ergab, dass der Ertrag des Luftkollektorsystems anteilmässig recht klein ist: Der Hauptteil der Heizwärme wurde durch die Holz-Speicheröfen in den Wohnungen erbracht. Das Luftkollektorsystem liefert einen kleinen, die Wärmerückgewinnung einen vernachlässigbaren Anteil. Da der Ertrag der Luftkollektoren wesentlich kleiner ist als geplant, ist auch der Verbrauch an Brennholz höher als vorgesehen.

### Energiekennzahlen in MJ/m<sup>2</sup>a



- Ertrag von Fenster- und Dachluftkollektor
- Zugeführte Energie in den Holzöfen EG und OG
- Zugeführte elektrische Energie EG und OG
- WRG EG und OG: Gesamte rückgewonnene Wärme
- Passiv solare Energie und Rest

Die Gründe dafür liegen zu einem grossen Teil beim Benutzerverhalten, indem offensichtlich die Absorberstoren zu wenig konsequent gesenkt werden. Dies hat weiter zur Folge, dass die Luftventilatoren nicht starten, obwohl unter Umständen auch der Ertrag des Dachluftkollektors allein genutzt werden könnte.

Der ausführliche Schlussbericht wird voraussichtlich im Februar 2000 erhältlich sein.

### Hinterlüftete, transparent wärmedämmte Vorhangfassadenelemente [5]

An Prototypen wurden Messungen durchgeführt welche folgende Aussagen ermöglichen:

- Mit konvektiver Hinterlüftung kann sommerliche Überhitzung in Räumen mit solarer Wandheizung mit TWD verhindert werden.
- Mit geringen Einschränkungen können dabei auch

kostengünstige Absorber ohne spezielle Strahlungscharakteristiken eingesetzt werden.

- Die Messungen haben die theoretischen Rechenwerte insbesondere im Fall des Metallabsorbers nicht erreicht. Dafür sind folgende Gründe (mit-) verantwortlich:
  - Wärmebrücken
  - zusätzliche Strahlungsverluste
  - Verluste über die Ventile
  - ungenügende Wärmeübertragung
- Inwieweit das Ziel bei den Energiegewinnen im Winter mit Optimierungen erreicht werden kann, ist wegen eines undicht gewordenen Ventils nicht abschliessend zu beurteilen.

Kommerzielle Machbarkeit:

- Kostenoptimierungen sind noch nötig.
- Für Luftventile konnte kein marktgängiges System gefunden werden, das den Anforderungen entspricht.
- Technisch einwandfreie Lösungen sind sicher möglich; die notwendigen Investitionen stellen aber in Anbetracht des noch sehr kleinen Markts ein grosses finanzielles Risiko dar.
- Wegen der Problekomponente Ventil sind im Moment die Voraussetzungen sowohl für die Planung und Ausführung eines Pilot- und Demonstrationsprojekts als auch für eine Weiterentwicklung zu einem Produkt auf der Basis der TWD-Vorhangfassadenelemente nicht gegeben.

#### **Optimierung der Steuerung von TWD-Fassaden mit gleichzeitiger Schaltung des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Gesamtenergiedurchlassgrads [11]**

Ziel des Projekts war die Optimierung der Klappensteuerung einer hinterlüfteten TWD und die Erarbeitung einer Regelungsstrategie. Verifizierung an einem Objekt, Verallgemeinerung der Ergebnisse und Erstellung von Planungshinweisen. Es traten diverse Schwierigkeiten mit den Klappen auf, die teils nicht richtig schlossen, teils als unliebsame Wärmebrücken wirkten. Vor der Erarbeitung einer Regelstrategie müssen diese Mängel behoben werden.

#### **Erfassen der Energie- und Stoffflüsse der solaren Komponenten in Solar-Niedrigenergiebauten [12]**

Die Frage lautete, ob der energetische Aufwand für den Bau von Solar-Niedrigenergie-Häusern höher ist als die während des Betriebs eingesparte Heizenergie. Anhand von vier realisierten Häusern wurden die Stoffflüsse und die damit verbundenen Herstellungsenergien und die zur Beheizung der Gebäude notwendige Betriebsenergie ermittelt und mit denjenigen von Referenzhäusern ohne solarwirksame Komponenten verglichen für die Klimaregionen Tessin, Mittelland und alpine Region. Neben der Energie wurden die ökologischen Kriterien Treibhauseffekt, Versauerung, Ökoindikator und Stofffluss je m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche bestimmt. Folgende Systeme wurden für diesen Vergleich gewählt: Direktgewinn, Wintergarten mit Ventilator, Solarwarmwassersystem, transparente Speicherwand. Bei den vier untersuchten Häusern variiert die Energie für die Herstellung von 90 bis 220 MJ/m<sup>2</sup>a und für den Betrieb in den verschiedenen Klimaregionen von 40 bis 510 MJ/m<sup>2</sup>a, die Stoffflüsse variieren von 18 bis 33 kg/m<sup>2</sup>a (Nutzungszeit 80 Jahre).

Das Direktgewinnhaus weist sowohl für die Energie als auch in der Gesamtbeurteilung Amortisationszeiten auf, die unter der Nutzungszeit (80 Jahre) liegen.

Für das Wintergartenprinzip können keine Amortisationszeiten angegeben werden, da das Solarhaus sowohl in der Herstellung/Erneuerung als auch im Betrieb mehr Energie verbraucht als das Referenzhaus.

Bei transparenter Wärmedämmung zeigt sich, dass der Ertrag durch die TWD-Wand nur an sehr einstrahlungsreichen Standorten ausreicht, um die Herstellungsenergie zu kompensieren. Die Ökoindikatorpunkte hingegen amortisieren sich an keinem der Standorte.

Mit dem Solarwarmwassersystem dagegen werden an allen Standorten bezüglich der Energie Amortisationszeiten erreicht, die unter der Nutzungsdauer liegen. Die Ökoindikatorpunkte weisen auch hier keine Amortisation auf.

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine Amortisation für Solarkomponenten im Bereich Energie und Treibhauspotential leichter möglich ist, als im Bereich einer Gesamtbewertung nach Ökoindikatorpunkten. Die hohen Amortisationszeiten für Ökoindikatorpunkte werden wesentlich beeinflusst von den verwendeten Materialien. Dabei kann die Materialgruppe (Mineralien, Metalle, etc.) einen grösseren Einfluss haben als die Menge.

## **Transfer in die Praxis**

Die Verknüpfung Forschung/Praxis wird schon bei der Projektkonzeption eingeplant und im Vertrag verankert. Es wird gefordert, die Ergebnisse in der Fachpresse in kurzen, gut lesbaren Beiträgen zu veröffentlichen und spezielle Workshops zu veranstalten.

Das halbjährlich herausgegebene Bulletin SOLAR-ARCHITEKTUR informierte etwa 950 Abonnenten über Neues im Sektor Solararchitektur sowie Neuerscheinungen von Publikationen und Tagungsankündigungen.

Die Verknüpfung Forschung/Ausbildung geschieht auf direkterem Weg durch die Beteiligung von Hochschulen und Fachhochschulen an Forschungsprojekten. Im Jahr 1999 betraf dies die EPFL, die ETHZ und die FH Zentralschweiz.

An der ETHZ geschah dies 1999 durch:

- die wöchentlich je einstündige Vorlesung "Bauen und Sonnenenergienutzung" welche durchschnittlich von ca. 35 StudentInnen und einzelnen in der Praxis tätigen Architekten besucht wurde
- eine Seminarwoche im Frühjahr zum Thema "Neues Bauen in Holland – innovativ und umweltgerecht". Die Reise wurde mit 30 StudentInnen durchgeführt.
- Diplomwahlfacharbeiten: Insgesamt haben 27 StudentInnen eine Diplomwahlfacharbeit abgegeben
- und mit einer bestandenen Prüfung abgeschlossen.
- Nachdiplomstudium: Ein Nachdiplomstudent

schloss mit dem Thema "gesamtenergetische Wirksamkeit von luftgekühlten PV-Panelen, simuliert mit TRNSYS basierend auf bestehenden Messdaten" ab.

Im Rahmen des P+D-Programms Solararchitektur liefen folgende Aktivitäten:

- In Moris: Neubau mit einem kostengünstigen Luftkollektorsystem, einfachverglastem Fassadenkollektor und Betonspeicherdecke
- Auf dem Hosenruck: Ein mit Kartonwaben isoliertes Wohnhaus
- In Herisau: Ein Einfamilienhaus mit transparenter Wärmedämmung

## Bewertung 1999

Im abgelaufenen Jahr konnten zehn Forschungsprojekte erfolgreich abgeschlossen und eines neu gestartet werden. Die Erkenntnisse werden eingebaut in einfach handhabbare Planungshilfsmittel. Dadurch sollte auch für Anfänger die Hemmschwelle so tief zu liegen

kommen, dass sie vor der Planung von Solarbauten nicht mehr zurückschrecken.

Auch über das P+D-Programm konnten mit drei unterstützten Projekten Impulse hinausgetragen werden.

## Ausblick 2000

Drei Schwerpunkte sind vorgeschlagen:

### - **Anwendung von erneuerbarer Energie in hochgedämmten Wohnbauten:**

In Zusammenarbeit mit Serienhausbauern und Herstellern von Komponenten für Wohnhäuser werden neue Konzepte mittels Computeranalyse entwickelt und an Pilotprojekten erprobt. Die Arbeit soll stark von einer engen Zusammenarbeit mit Instituten in europäischen Nachbarländern profitieren. Im Jahr 1999 wurde das Gerüst für eine internationale Kollaboration festgelegt, und ein fünfjähriges Projekt unter schweizerischer Leitung von der IEA genehmigt. Es soll als Joint-Task unter: Solar Heating and Cooling und Energy Conservation in Buildings and Community Systems laufen.

### - **Solarnutzung im städtebaulichen Massstab sondieren:**

Bis heute hat die Solarnutzung vor allem auf der Massstabebene von einzelnen Gebäuden stattgefunden. Unter diesem Schwerpunkt sollen Konzepte entwickelt werden, die zur Sanierung, Umbau und Abbruch/Neubau von Stadtquartieren dienen. Dabei soll ein breites Spektrum von Solarnutzungskonzepten analysiert werden. Ein Beispiel wäre die passive Solarnutzung durch die Verglasung von Höfen oder Fussgängerzonen, um attraktive solar temperierte Räumlichkeiten zu schaffen. Dabei sollen nicht nur die energetisch/ökologischen Aspekte untersucht werden, sondern auch die sozialen Aspekte und vor allem die Wirtschaftlichkeit abgeschätzt werden. Die Wertsteigerung von Liegenschaften, das Zurückgewinnen von Kunden aus umliegenden Einkaufszentren und eine Erhöhung der Lebensqualität in Städten sind einige angestrebte Ziele. 1999

wurde ein internationaler Workshop in Zürich durchgeführt, was zu einer Projektdefinitionsphase geführt hat. Im Jahr 2000 soll die Schweiz mindestens bei den nächsten Planungsworkshops dabei sein. Die Schweiz besitzt heute schon eine Vielfalt von numerischen Methoden um die Geometrie einer Stadt aufzunehmen, meteorologische Daten sind vorhanden und die Wirkung verschiedenster Solarsysteme ist bekannt. Allerdings ist der zu erwartende Beitrag von passiven oder hybriden Nutzungskonzepten auf diesem Massstab noch unbekannt, jedoch vielversprechend.

### - **Erstellung von Planungshilfsmittel:**

Das Handbuch der passiven Solarnutzung D 010 ist veraltet. Die U-Werte von neuen, hochentwickelten Baukomponenten (von Fenstern bis Dämmsystemen) liegen heute viel tiefer als damals als D 010 geschrieben wurde. Ein Beispiel: als das Handbuch Ende der 80er Jahre geschrieben wurde, war Isolierverglasung ( $k=3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) üblich, ausnahmsweise gab es die schwere Dreifachverglasung. Heute gibt es sogar Fenster samt Glas und Rahmen mit U-Werten unter  $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf dem Markt. Auch die Energiekennzahlen als Ausgangslage für einen Entwurf liegen massiv tiefer als damals. Fazit: die alten Faustregeln und Ausnutzungskurven des passiven Solargewinns können sehr irreführend sein. Eine total neues Erarbeiten von einem Handbuch um nachhaltige Solarwohnbauten zu planen ist längst fällig. Dabei sollen drei Kriterien beim Optimierungsverfahren berücksichtigt werden: Energie, Ökologie und Ökonomie. Die Ergebnisse sollen in Form eines neuen Handbuchs, eines PC-basierten Planungsinstruments und als Lehrmittel für die Aus- und Weiterbildung erscheinen. Die Arbeit soll in

engem Kontakt mit Herstellern von Baukomponenten sowie Planern von Niedrigenergie-Häusern gesehen. Zeitrahmen: Skelett Ende 2000, Entwurf

Ende 2002, Fertigstellung Ende 2003, gedruckt und Workshops 2004.

## Liste der 1999 gelaufenen Projekte

- [1] N. Hopkirk, EMPA, *Dübendorf: Tageslichtnutzung in Tunnels (Daylighting of tunnels)* (SB)
- [2] H. Bertschinger EMPA, *Dübendorf: Praxistauglichkeit transluzenter Latentspeicherwände* (JB)
- [3] G. Zweifel, HTA, *Luzern: Praxisnahe Validierung von Gebäude- und Haustechniksimulationsprogrammen* (JB)
- [4] J-L. Scartezzini, LESO/EPFL-Lausanne *Extension du programme DIAL - Etude des performances d'un dispositif anidolique* (SB)
- [5] A. Haller, ERNST SCHWEIZER, *Hedingen: Nutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen* (SB)  
*Hinterlüftete, transparent wärmegeämmte Vorhangfassadenelemente* (SB)
- [6] S. SIMOS, *Carouge: Chaîne de mesure de lumière naturelle - Analyse de bâtiment* (SB)
- [7] P. BERCHTOLD, *Sarnen: Messprojekt WASAG, Photovoltaik und Luftabsaugfassade* (SB)
- [8] M. BLATTER-SPALINGER, *Münchenstein: Messungen und Simulationsrechnungen MFH Holinger, Oberdorf BL* (JB)
- [9] K. FORT, *Volketswil: Solarluftsysteme mit geschlossenem Kreislauf für die Sanierung von Wohnbauten* (SB)
- [10] P. Jaboyedoff, SORANE, *Lausanne: Développement d'une méthode de planification pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire* (JB)
- [11] D. SCHWARZ, *Domat-Ems: Optimierung der Steuerung von TWD-Fassaden mit gleichzeitiger Schaltung des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Gesamtenergiedurchlassgrades* (SB)
- [12] D. Gerber, ETRON, *Brugg: Energie- und Stoffflüsse von Solar-Niedrigenergiebauten im Vergleich mit Standardbauweise nach SIA* (SB)
- [13] A. Gütermann, AMENA, *Winterthur: Kollektorfassade und Kollektordach als Luftsystem bei einer Gebäudesanierung* (JB)
- [14] *IEA-Task 19: Solare Luftsysteme für Gebäude*

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

# ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Roland Brüniger**

[roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch](mailto:roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch)

---



## **"Booten" ist immer gut ... dazu 50% Stromeinsparung**

Mit dem AC-Manager können Server zeitlich gesteuert, ein- und ausgeschaltet werden, wodurch der Server-Stromverbrauch um ca. 50% gesenkt wird. Zudem erhöht sich durch das tägliche "Booten" die Server-Stabilität.

## Programm-Schwerpunkte und anvisierte Ziele 1999

Das Forschungs-Programm **Elektrizität** unterstützt mit seinen Aktivitäten einen optimierten Einsatz der elektrischen Energie von der Erzeugung über die Verteilung bis zur rationellen Verwendung, wobei sich alle Arbeiten letztendlich auf die *effiziente und rationelle Elektrizitätsnutzung* konzentrierten. Dies trotz oder gerade wegen des zunehmend schwierigeren Umfelds der Marktliberalisierung, in dem Elektrizität vermehrt mit modernen und aggressiven Marketingmethoden verkauft wird und die Energieeffizienz weder beim Verbraucher noch beim Verkäufer im Vordergrund steht.

Im Vorjahr stand die sukzessive Konzentration der Programm-Aktivitäten auf die **vier Schwerpunkte** *Energie- und Informationstechnik, elektrische Antriebe und Motoren, elektrische Verteilung* sowie *Hochtemperatur-Supraleitung* im Vordergrund. Es galt diese im Rahmen der Gesamtkonzeptüberarbeitung schrittweise umzusetzen, wobei anzumerken ist, dass aufgrund des breiten Programm-Spektrums trotz der vorerwähnten Fokussierung mehrere Projekte im allgemeinen Bereich *rationelle Nutzung von Elektrizität* zu positionieren sind.

Die **oberste Zielsetzung** lag in der Ausarbeitung eines abgestimmten Forschungs- und P+D-Konzepts für den Zeitraum 2000 bis 2003. Ein Miteinbezug der vier etablierten *Trendwatching*-Gruppen sicherte dabei die er-

forderliche Abstützung seitens Industrie und Hochschule.

Im Schwerpunkt **elektrische Verteilung** galt es, ein tragfähiges und zweckmässiges Forschungs- und P+D-Konzept auszuarbeiten. Zudem wurde insbesondere bei Fachhochschulen abgeklärt, ob die erforderliche Fachkompetenz für die Durchführung anspruchsvoller Projekte auf diesem Gebiet vorhanden ist.

Im Gebiet **Hochtemperatur-Supraleitung in der Energietechnik** wurde neben dem intensiven Begleiten laufender Projekte vor allem angestrebt, fundierte Grundlagenerkenntnisse für die zukünftige Stossrichtung aufzuarbeiten sowie der Schweizer Forschung erweiterte Informationsquellen zur Verfügung zu stellen.

Im Schwerpunkt **Energie- und Informationstechnik** stand als Ziel die Schaffung eines anerkannten Kompetenzzentrums sowie das Initiieren neuer Projekte im Vordergrund.

Da die Vermarktung des vom Bund mitfinanzierten Auslegetools OPAL nicht wie erwartet vorankam, wurden im Bereich **Antriebe/Motoren** verstärkte Anstrengungen vorgesehen, den Bekanntheitsgrad von OPAL im europäischen Raum zu steigern und mit den EU-Aktivitäten abzustimmen.

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### ELEKTRISCHE VERTEILUNG

**Konzeptionell** wird im Teilgebiet *Verteilung* die Erreichung bzw. Erhaltung der hohen Netzverfügbarkeit, gekoppelt mit einer maximalen Netzqualität sowie die Minimierung der Transportverluste angestrebt. Schwerpunktmässig werden dabei einerseits die technischen Auswirkungen des vermehrten Einsatzes dezentraler Erzeugungsanlagen (erneuerbare Energien) untersucht, da mit deren vermehrtem Einsatz die Anforderungen an die Betriebsführung der Verteilnetze zunehmend steigen. Andererseits stehen Untersuchungen von technischen Auswirkungen der in der Schweiz anstehenden Marktliberalisierung im Vordergrund.

Mit der wachsenden Zahl dezentraler Erzeuger steigt die Wahrscheinlichkeit des unerwünschten Entstehens von Inselnetzen. Im Projekt **Zuverlässigkeit von Sicherheitsschaltungen gegen Inselbildung** [1] wurde eine Übersicht und Bewertung der weltweit bestehenden Detektionsverfahren erarbeitet. Ebenfalls wurden die zugrunde liegenden Messverfahren anhand von Tests, Simulationen sowie verschiedenen weltweiten Erfahrungsberichten untersucht und gegenübergestellt. Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen auf, dass in der

Schweiz zur Zeit aufgrund der beschränkten Anzahl dezentraler Erzeugeranlagen die bestehenden Normen und Vorschriften ausreichen. Bei zunehmender Durchdringung von dezentralen Erzeugern drängt sich aber eine Überprüfung der heutigen Vorschriften auf.

Im Vordergrund der Arbeiten im Projekt **Entwicklung von systemorientierten FACTS-Elementen** (*Flexible AC Transmission System*) stand der Aufbau einer 3-kVA-Laboranlage einer *transformatorlosen reaktiven Seri kompensierung mit einem 2-Punkt-Wechselrichter* [2]. Zudem wurde die Implementierung eines *Leitungsmodells* vorangetrieben. Parallel dazu erfolgten umfangreiche Wirtschaftlichkeitsüberlegungen. Diese stellen eine grosse Herausforderung dar, ist doch eine Monetarisierung des Nutzens von FACTS-Komponenten (bessere Steuerung und Ausnutzung der Übertragungsnetze) gerade im Umfeld der Marktliberalisierung ziemlich anspruchsvoll und komplex. Ergänzend wurden zudem *Realisierungskonzepte* zur optimalen Einbindung von FACTS-Elementen in bestehende Anlagen studiert.

Das Ziel des im Rahmen des europäischen JOULE-Programms durchgeführte Projekt **FlyWiP** (*Flywheel*

*Energy Storage for Wind Power Generation*) [3] umfasst die Entwicklung eines Schwungrad-Energie-Speichers zur Netzstabilisierung für dezentrale Erzeuger (Wind, Photovoltaik) mit einem Energieinhalt von 15 kWh, einer max. Leistung von 1 MW und einer Drehzahl von 15'000 U/min. Schwerpunktmässig wurden 1999 die Systemkomponenten entwickelt und konstruiert, sodass im Jahr 2000 der Zusammenbau zu einem Gesamtsystem erfolgen kann. Zur Zeit steht zudem zur Diskussion, dass die Pilotanlage anstatt in Holland u.a. in der Schweiz installiert werden soll.

### HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG (HTSL)

Mit der Systemstudie **Hochtemperatur-Supraleitung im Netz** [4] wurden fundierte Grundlagen für die Beantwortung der Frage geschaffen, welche Vorteile und Hemmnisse für die Stromerzeugung, -übertragung und -verteilung durch die zukünftige Anwendung der Hochtemperatursupraleitung resultieren. Der Wirtschaftlichkeit wurde dabei grosses Gewicht beigemessen. Das Ergebnis dient als Basis für die zukünftige Forschungsstossrichtung und insbesondere für die Formulierung des Konzepts 2000 bis 2003.

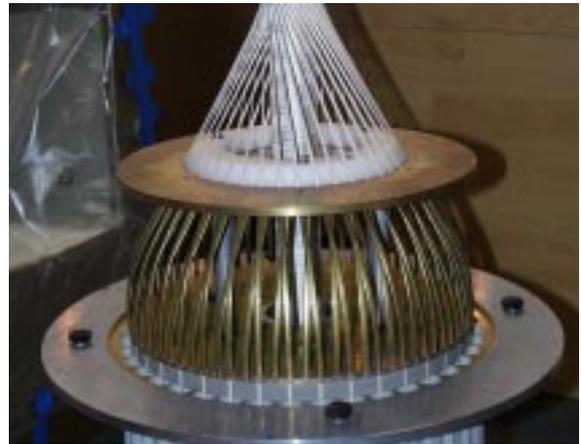
1999 erfolgten im Projekt **10 MVA-Hochtemperatur-Supraleiter-Transformator** [5] zahlreiche Versuche in Bezug auf die resistive Strombegrenzer-Funktion. Ferner wurden dielektrische und mechanische Modellversuche unternommen, um das endgültige Trafo-Design festzulegen. Auch ein neues Kryostatkonzept wurde ausgearbeitet, sodass nun im 2000 mit der Produktion des HTSL-Transformators begonnen werden kann.



**Produktionshalle des HTSL-Trafos**

Im Rahmen des Projekts **Hochtemperatur-Supraleiterkabel für die Energietechnik** [6a] wurde gemeinsam mit der Industrie und der Hochschule ein 5 m langes, einphasiges supraleitendes Prototypen-Kabel ausgelegt, gebaut und ausgetestet. Vorangegangene Designstudien zeigten, dass die optimale Betriebstemperatur bei einem Leiter mit warmem Dielektrikum in der Nähe von 60 K liegt, weshalb ein neu entwickelter Neonkreislauf für die Kühlung benutzt wurde. Mit dem gleichzeitig aufgebauten Kabelstand steht nun eine leistungsfähige Experimentiereinrichtung zur Verfügung.

Im IEA-Programm *Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [6b] steht ein Report im Bereich der HTSL-Energie-Speicherung kurz vor dem Abschluss. Ferner



**Verseleinrichtung für das HTSL-Kabel**

wurde im Rahmen einer Studie die möglichen Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Effekt in dem Sinn geschätzt, dass langfristig die HTSL-Technik ca. 3 - 4% zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen könnte. Schliesslich sind zur Zeit Vorabklärungen bezüglich einer allfälligen internationalen Zusammenarbeit im Bereich einer hardwaremässigen Installation im Gange.

### VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

#### a) *Energie- und Informationstechnik*

Der Anteil der Informationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz liegt heute bei etwa 10% und weist von allen Stromanwendungen die höchsten Zuwachsraten auf. Konzeptionell stehen in diesem Teilbereich schwerpunktmässig das Sammeln, Aufbereiten und Weiterverbreiten von einschlägigen Informationen, die Umsetzung der Zielwerte und des Labelings sowie die Erprobung neuartiger technischer Lösungen zum Energiesparen im Vordergrund.

Die etablierte *Begleitgruppe Energie und Informationstechnik* stellt unverändert eine für alle Beteiligten wertvolle Informationsdrehscheibe für Forschung, Industrie und Anwender dar.

Die Arbeiten des **Kompetenzzentrums Energie- und Informationstechnik** [7a] konzentrieren sich auf das Sammeln, Aufbereiten und Verbreiten von einschlägigen nationalen und internationalen Informationen über dieses Thema. In einer Kurzuntersuchung an der ETH-Zürich wurde zudem der Stromverbrauch von Netzwerkkomponenten analysiert und u.a. festgestellt, dass die meisten Kommunikationsräume nicht klimatisiert werden und die Raumtemperatur auf die in einer früheren Studie empfohlenen 26 Grad eingestellt ist.

Mit dem Projekt **Vernetzung im Haushalt** [7b] sollen die Auswirkungen auf den Strombedarf durch die absehbare Vernetzung von Kommunikations-, Haushalts- und Gebäudeanlagen untersucht werden. Zudem wird abgeklärt, welche Massnahmen zur Eindämmung eines mutmasslichen Verbrauchszuwachses möglich sind und ob die *Homeautomation* sogar eine rationelle Energienutzung unterstützen könnte.

Mit dem Projekt **Bestimmung des Energieverbrauchs von Unterhaltungselektronikgeräten, Bürogeräten und Automaten in der Schweiz** steht nun aktualisiertes, statistisches Datenmaterial über die Thematik zur Verfügung [8].

Mit dem Projekt **Untersuchung des Verhaltens von EndbenutzerInnen bezüglich Ein- und Ausschalten von PCs** sollte untersucht werden, inwiefern die Endbenutzer ihre PCs am Abend ausschalten, resp. inwiefern ein automatisches Ausschalten durch verfügbare Technologien (z.B. *Wake on LAN*) Energieeinsparungen ermöglichen. Leider ergaben sich im Projekt personelle Probleme, die zu einer vorläufigen Sistierung des Projekts geführt haben. Zur Zeit wird versucht, das Projekt neu zu starten.

Im Rahmen des Projekts **Gekühlte Verpflegungsautomaten** [9a] wurden der Stromverbrauch und die Temperaturverhältnisse eines Kaltgetränke- und eines gekühlten Warenautomaten gemessen.



**Ausgemessener Kaltgetränkeautomat**

Dabei wurde festgestellt, dass wider Erwarten der Einfluss der Besonnung in der Schweiz bei einer typischen Halbbeschattung klein ist, der Kühlanteil des Stromverbrauchs etwa 30% beträgt und das grösste Potenzial in der nicht optimierten Geräte-Beleuchtung vorliegt.

#### **b) Kraft / elektrische Motoren**

Verschiedene Schätzungen gehen davon aus, dass in der Schweiz etwa 45 – 50% des Stromverbrauchs durch elektrische Antriebe verursacht werden, was un- vermindert auf ein grosses Einsparpotenzial hinweist.

Verschiedene Studien untermauern dies, wobei der grösste Effekt bei der Optimierung des gesamten Antriebssystems liegt. Dies stellt deshalb neben Aktivitäten im Bereich von Querschnittstechnologien (z.B. Frequenzumrichter, *Auslegetools*) die konzeptionelle Hauptstossrichtung für die nächsten Jahre dar. Diese Stossrichtung findet ihre Bestätigung durch ähnlich gelagerte internationale Aktivitäten, die in konzentrierter Form anlässlich einer EU-Fachtagung in London [18] präsentiert wurden.

Nachdem die Erweiterung des *Auslegetools OPAL um die Funktion des Frequenzumrichters* abgeschlossen wurde, stand 1999 dessen Vermarktung im Vordergrund. Leider war der bisherige Erfolg ziemlich bescheiden, nicht zuletzt deshalb auch, weil in der Zwischenzeit die EU gratis ein ähnliches *Tool* vertreibt. 1999 wurden deshalb insbesondere mit der EU und dem deutschen Bundesministerium intensive Diskussionen in Richtung Vereinheitlichung geführt. Leider führte dies bis anhin nicht zum gewünschten Erfolg.

Antriebssysteme (Motor und Regelgerät) sind energetisch kaum miteinander vergleichbar. Eine unabhängige Prüfstelle könnte diese neutral und einheitlich prüfen und damit mehr Transparenz im Markt schaffen. Im neuen Projekt **Marktuntersuchungen für ein Prüfinstitut Antriebssysteme** [10] wird abgeklärt, welche Anbieter und Anwender an einem entsprechenden Institut interessiert sein könnten und ob dieses langfristig finanziell eigenständig werden könnte.

Druckluftanlagen gehören in Industrie und Gewerbe zur Grundinfrastruktur und beanspruchen je nach Branche 1 bis 20% des betrieblichen Stromverbrauchs. Mit dem Projekt **Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz** [10] sollen konkrete Projektvorschläge für branchengerechte Massnahmen zur Effizienzverbesserung im Druckluftbereich erarbeitet werden.

Nach einem längeren, personell bedingten Projektunterbruch konnte das Projekt **Compressur hydraulique-isothermique** [11] abgeschlossen werden. Mit einem neuartigen Kompressorkonzept lässt sich der Wirkungsgrad zur Druckluftherzeugung gemäss durchgeführten Messungen an einem mehrmals modifizierten Funktionsmuster substanziell erhöhen. Ungewiss ist aber, ob das System letztendlich zur kommerziellen Reife weiterentwickelt werden kann.

#### **c) Diverses**

Informationen über das europäische Kooperationsprogramm *COST 244: Biomedizinische Effekte elektromagnetischer Felder* sind abrufbar [20].

Ferner hat das *Forum Medizin und Energie (FME)* unter dem Patronat der schweiz. Akademie der medizinischen Wissenschaften und der schweiz. Akademie der technischen Wissenschaften den aktuellen Wissensstand auf dem Gebiet der nichtionisierenden Strahlung zusammengetragen.

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die periodischen Treffen der *Trendwatching- / Begleitgruppen* tragen massgebend dazu bei, dass die Koordination und Zusammenarbeit zwischen Industrie, Hochschule und dem BFE gut funktioniert und beinahe institutionalisiert ist.

Gleichermassen sind in praktisch allen Projekten die Industrie, welche letztendlich die Forschungsergebnisse umzusetzen hat, sowie Forscher von Hoch- und Fachhochschulen eingebunden.

Ebenfalls wurde der Pflege der Kontakte zu *anderen schweizerischen Geldgebern im Bereich Elektrizität* besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Dies betrifft insbesondere den *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)* [19] und die *Commission recherche, développement, prospective de la Chambre romande d'énergie électrique (RDP-CREE)*.

Etwa 25% der gesprochenen Gelder des PSEL wurden bisher für Arbeiten im Bereich der elektrischen Übertragung/Verteilung verwendet.

Mit der Teilnahme am *IEA-Programm Hochtemperatur-Supraleitung* bleibt auch der internationale Infor-

mationsaustausch auf diesem Gebiet erhalten. Zwar hat sich die Schweiz letztes Jahr am internationalen *Online-Forum Supraleitung*, welches eine internationale Informationsdrehscheibe darstellt, beteiligt. Die inhaltliche Qualität entsprach nicht den Vorstellungen der Schweizer Benutzer, sodass eine Verlängerung in Frage gestellt ist.

Im Bereich *Energie und Informationssysteme* wird unverändert ein grosser Informationsaustausch im internationalen Umfeld gepflegt. Das Kompetenzzentrum *Energie und Informationstechnik* trägt massgebend dazu bei. Auch als aktives Mitglied der internationalen *Group of Efficient Appliances*, welche auf dem Gebiet der Heimelektronik und der Bürogeräte die effiziente Stromnutzung fördert, ist die Schweiz aktiv und hat sogar 1999 den Vorsitz übernommen.

Im Bereich der *elektrischen Antriebe/Motoren* wurden grosse Anstrengungen unternommen, bezüglich dem schweizerischen Auslegetool OPAL international und insbesondere mit der EU eine Harmonisierung anzustreben. Dies ist bis anhin nicht gelungen.

## Umsetzung in die Praxis, P+D-Projekte

### ÜBERTRAGUNG / VERTEILUNG HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG

Die Forschungsergebnisse mehrerer BFE-Projekte wurden nach deren Abschluss durch Fachartikel und Fachvorträge einem breiten Fachpublikum präsentiert.

Mit der fortschreitenden Marktliberalisierung ist es zur Zeit relativ schwierig, Umsetzungsprojekte mit der einschlägigen Industrie anzugehen. Dies ist auch der Grund, weshalb die Umsetzung des Projekts **Elektronischer Verteiltransformator** noch nicht fortgeführt werden konnte.

### VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

#### a) *Energie und Informationstechnik*

An den halbjährlichen Treffen der *Begleitgruppe Energiemanagement in vernetzten Systemen* können stets wertvolle Inputs für die weiteren Arbeiten gewonnen sowie Informationen ausgetauscht werden.

Die Programmleitung hat Mitte 1999 einen Artikel über die Thematik *Energie und Informationstechnik* verfasst und in mehreren Zeitschriften publiziert.

Zwar war beabsichtigt, dass gemeinsam mit einem Betreiber im Rahmen eines P+D-Projekts der Betrieb eines neuen *energieeffizienten Geldausgabeautomaten* geprüft wird. Leider scheiterte das Projekt bis anhin, weil der Hersteller als Tochtergesellschaft eines Kon-

zerns veräussert wurde. Es ist zur Zeit ungewiss, ob das Projekt durchgeführt werden kann.

Im Projekt **AC-Manager: P+D-Projekt in der Bundesverwaltung** [9b] wird eine Steuerung für das automatische Schalten von Servern entwickelt. Eine Labor-Version steht zur Zeit beim BFE im Einsatz. Damit kann 50% des Stromverbrauchs von Servern eingespart werden und zudem wird die Systemstabilität durch das tägliche Herunterfahren erhöht. Ebenfalls kann damit ein hardwaremässiges *Booten des Servers* aus Distanz erfolgen.

Eine ähnliche Zielsetzung weist das Projekt **Schalten von Servern** [9c] auf (siehe Titelbild), wobei im Gegensatz zum vorangegangenen AC-Manager die Lösung rein softwaremässig auf NT-Server basiert und für kleinere Netzwerke vorgesehen ist. Die erarbeitete Lösung bewährt sich im installierten Umfeld. Eine Kommerzialisierung steht zur Zeit nicht im Vordergrund, obwohl diesbezügliche Abklärungen noch vorgesehen sind. Vielmehr soll das Projekt dazu dienen, dass die Industrie den Gedanken aufnimmt und direkt in die Server integriert.

Als Nebeneffekt des vorgängig beschriebenen Projekts wurde festgestellt, dass die beschaffte *Offline-USV-Anlage* einen *Standby-Verbrauch* von 25 W aufweist, was viel zu hoch ist. Es ist vorgesehen, diese Thematik nächstens in einem separaten Projekt aufzurollen.

### b) Kraft / elektrische Motoren

Das P+D-Projekt **Druckluftoptimierung in der Verpackungsindustrie** [12] hat aufgezeigt, dass mit einer fachgerechten Sanierung einer alten Druckluftanlage über 30% Energie eingespart werden kann. Dies wurde anhand einer durchgeführten Sanierung durch die Aufteilung in ein Hoch- und Niederdrucknetz, durch eine bedarfsabhängige Regelung, durch Netzabdichtungen sowie durch Leistungsverbesserungen der Kompressoren erreicht.

Mit dem abgeschlossenen P+D-Projekt **Felderprobung einer Stromspar-Kleinumwälzpumpe** [13a] konnten mit ausgiebigen Tests in über die ganze Schweiz verteilten zwanzig Wohnungen die technischen Voraussetzungen für eine Weiterentwicklung Richtung Serienfertigung geschaffen werden. Die Industrie ist nun gefordert, diese gegenüber herkömmlichen Pumpen bis zu dreimal effizientere Kleinumwälzpumpe zur Serienfertigung weiterzuentwickeln und zu vermarkten.

### c) Diverse

Die nun seit über einem Jahr aufgeschaltete Webseite zum Thema Elektrizitätsforschung [21a] wird gemäss Statistikauswertungen rege besucht. Es werden dabei allen Interessierten Informationen inklusive allen Jahresberichten über das Programm verfügbar gemacht. Auch aktualisierte Informationen sind über das *Energielabel* [21b] verfügbar.

Bundesintern wurden in den letzten Jahren verschiedene Projekte im Bereich Energiesparen und Ökologie eingeleitet. Mit dem Projekt **Umsetzung des Projekts UKES in eine Access-Datenbank** sollen für alle Projekte einheitliche Checklisten zur Überprüfung der durchgeführten Massnahmen erstellt werden.

Im Rahmen der zwei Projekte **Ausarbeitung eines Messverfahrens für Raumluf-Wäschetrocker** [13b] und **Prüfung von Raumluf-Wäschetrockern** [13c] wurde als Grundlage für eine Energie-Deklaration ein Messverfahren für Raumluf-Wäschetrockner (mit Wärmepumpen) ausgearbeitet. Dies war erforderlich, weil Raumluf-Wäschetrockner im Vergleich zu herkömmlichen Tumblern zwar einen günstigen spezifi-

schen Energieverbrauch aufweisen, eine Norm für energetisch vergleichende Aussagen aber fehlte.

Mit dem Projekt **Wärmepumpen-Tumbler für gewerbliche Anwendungen** [14] wurde erfolgreich der Nachweis erbracht, dass die Wäschetrocknung im Vergleich zur Trocknung ohne Wärmepumpe *bei unveränderter Trocknungsdauer* mit nur halbem Energieeinsatz möglich ist.



Versuchseinrichtung des Wärmepumpen-Tumblers

In den zwei eng miteinander verflochtenen Projekten **Energiesparen bei Reisezugwagen** [15] und **Messungen an Reisezugwagen in der Klimakammer Olten** [16] konnte die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Sparmassnahmen mit Messungen nachgewiesen werden. Die SBB beabsichtigen aufgrund dieser Ergebnisse eine Umsetzung in allen gleichartigen Wagentypen.

Wegen Problemen mit dem Industriepartner konnte das Projekt **Öko-Kühlschrank** nicht erfolgreich fortgeführt werden, sodass das Projekt nun endgültig abgebrochen wurde.

Zwar konnten die geplanten Feldtests im Projekt **Feldtest von Hochleistungskochsystemen** [17] nicht wie vorgesehen 1999 durchgeführt werden. Zudem musste ein neuer Topfhersteller gesucht werden, da der bisherige die geforderten Töpfe nicht termingerecht liefern konnte. Neu ist nun die Fertigstellung des endgültigen Designs und der anschliessende Feldtest im Jahr 2000 geplant.

## Bewertung 1999 und Ausblick 2000

Das Ziel der *konzeptionellen Überarbeitung der vier Schwerpunkte* unter Miteinbezug der entsprechenden Trendwatching-/Begleitgruppen konnte erreicht werden. Diese Teilkonzepte dienen nun als Grundlage für die im 2000 vorgesehene Erstellung *des Gesamtkonzepts Elektrizität*.

Mit der *Systemstudie Hochtemperatursupraleitung* steht zudem eine ausgezeichnete Grundlage für die

Definition der zukünftigen Stossrichtung auf diesem Gebiet zur Verfügung. Diese dürfte auch beim mitfinanzierenden PSEL richtungsweisenden Charakter aufweisen.

Der Bereich *Übertragung/Verteilung* ist stark von der Marktliberalisierung beeinflusst. Dies ist für die Programmarbeiten eher beschwerlich, da Arbeiten im Forschungs- und P+D-Bereich durch die Elektrizitätswirt-

schaft nicht mehr als vordringlich betrachtet werden und deshalb auch nicht mehr ohne weiteres unterstützt werden.

Insbesondere im Bereich *Übertragung/Verteilung*, aber auch in anderen Sparten wird vermehrt angestrebt, die sich etablierenden Fachhochschulen in Forschungs- und P+D-Arbeiten einzubinden.

Wie vorgesehen, konnte 1999 das *Kompetenzzentrum*

*Energie und Informationstechnik* geschaffen werden. Es ist zu hoffen, dass damit die Grundlage für eine längerfristige Institutionalisierung geschaffen werden konnte.

Die Vermarktung des Auslegetools OPAL konnte in Europa nicht vorangetrieben werden. Die Bemühungen mit der EU zeigten zudem bis anhin nicht die gewünschten Ergebnisse und es ist zu hoffen, dass erneute Anstrengungen im 2000 fruchtbarer verlaufen.

## Liste der Projekte

- [1] M. Real, R. Schmid, L. Tanner, ALPHA REAL, Zürich: *Zuverlässigkeit von Sicherheitsschaltungen gegen Inselbildung* (SB)
- [2] Ch. Schäfer, ABB HOCHSPANNUNGSTECHNIK, Zürich: *Entwicklung neuer systemorientierter FACTS-Elemente* (JB)
- [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* (JB)
- [6] G. Véscey, EPF-Lausanne: *a) Entwicklung eines HTS-Kabels für die Energietechnik* (SB) • *b) Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* (JB)
- [7] B. Aebischer, ETH-Zürich: *a) Betreuung des Kompetenzzentrums Energie- und Informationstechnik* (JB) • *b) Vernetzung im Haushalt* (JB) <http://www.cepe.ethz.ch>
- [8] B. Schaltegger, MEYER & SCHALTEGGER, St. Gallen: *Bestimmung des Energieverbrauchs von Unterhaltungselektronikgeräten, Bürogeräten und Automaten in der Schweiz* (SB)
- [9] A. Huser ENCONTROL, Niederrohrdorf: *a) Gekühlte Verpflegungsautomaten* (SB) • *b) AC Manager: P&D-Projekt in der Bundesverwaltung* (JB) • *c) Schalten von Servern* (SB)
- [10] R. Gloor, GLOOR ENGINEERING, Sufers: *Marktuntersuchung für ein Prüfinstitut Antriebssysteme* (JB) • *Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz* (JB)
- [11] L. SIMON, Genf: *Compresseur hydraulique-isothermique* (SB)
- [12] K. Frei, A-Z PLANUNG, Diepoldsau: *Druckluftoptimierung in der Verpackungsindustrie* (SB)
- [13] J. Nipkow, ARENA, Zürich: *a) Felderprobung einer Stromspar-Kleinumwälzpumpe* (SB) • *b) Prüfung von Raumluft-Wäschetrocknern* (SB) • *c) Ausarbeitung eines Messverfahrens für Raumluft-Wäschetrockner* (SB)
- [14] E. Schwarzwald, THERMODUL CONSULTING, Curio: *Wärmepumpen-Tumbler für gewerbliche Anwendungen* (SB)
- [15] C.U. BRUNNER, Zürich: *Enper: Energiesparen bei Reisezugwagen* (JB)
- [16] F. Thomi, SBB, Bern: *Messungen an Reisezugwagen in der Klimakammer Olten* (JB)
- [17] M. Erb, ECOWATT, Basel: *Feldtest von Hochleistungskochsystemen* (JB)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

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

## Referenzen

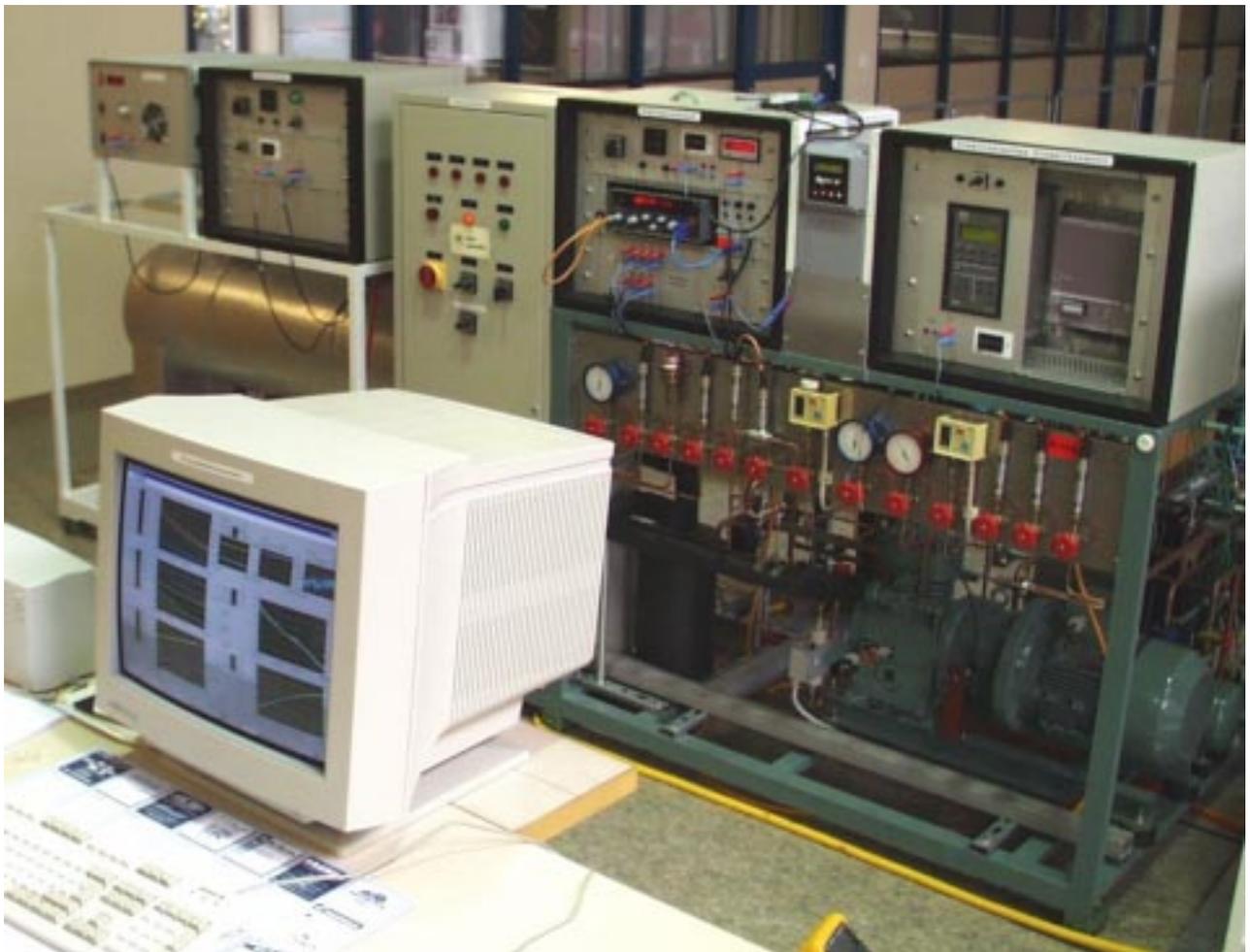
- [18] R. BRÜNIGER, Ottenbach: *Reisebericht* über die EU-Fachtagung 2<sup>nd</sup> *International Conference of Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, September 1999
- [19] <http://www.psel.ch>
- [20] <http://www.radio.fer.hr/cost244/>
- [21] a) <http://www.electricity-research.ch> • b) <http://www.energielabel.ch>

## UMGEBUNGS- UND ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Martin Zogg**  
[martin.zogg@bluewin.ch](mailto:martin.zogg@bluewin.ch)

---



### Betriebsüberwachung

Versuchsanlage zur Erprobung von *FuzzyWatch*, einer neuen Methode zur Betriebsüberwachung und Fehlererkennung mit minimalem Messaufwand für Wärmepumpen und Kältemaschinen.

## Programmübersicht und Programmziele

Über 50% des gesamten Endenergiebedarfs der Schweiz werden als Niedertemperaturwärme für Raumheizung, Warmwasserbereitung und industrielle Prozesse benötigt. Dieses Forschungsprogramm will die Wissenslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich **höheren Anteil der Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme** (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) **oder aus Abwärme gewinnen** zu können. 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% an Brennstoffen einsparen** und damit die **CO<sub>2</sub>-Emissionen** entsprechend **reduzieren**. In Zukunft sind noch deutlich höhere Einsparungen möglich. Die Wärmepumpentechnologie in Kombination mit effizienter Stromproduktion hat deshalb nichts an Aktualität eingebüsst. Zur Verbesserung der Effi-

zienz und der Betriebssicherheit und zur Reduktion der Kosten diese Systeme und einer energieoptimalen Konzeption industrieller Prozesse wurden im Jahr 1999 die folgenden Hauptziele verfolgt:

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

## Durchgeführte Forschungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

### WÄRMEQUELLEN UND WÄRMEÜBERTRAGUNG

Erdwärme ist nach Umgebungsluft die wichtigste Wärmequelle für Wärmepumpen. Für eine fundiertere Auslegung von **Erdwärmesondenanlagen** wurden im Vorhaben **Geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens** [8] das PC-Programm *SwEWS* für die Berechnung der benötigten geothermischen Stoffwerte Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte des Erdbodens für die typischen Gesteine des Schweizer Molassebeckens entwickelt. Das in einem früheren Vorhaben für einzelne Erdwärmesonden ausgearbeitete **Berechnungsmodul EWS** wurde zum Erfassen von Erdwärmesondenfeldern ausgebaut und validiert [10b]. Damit lässt sich das zeitliche Verhalten von Erdwärmesondenfeldern mit frei wählbarem Wärmeentzugsprofil über Jahrzehnte in kurzer Zeit berechnen. In einem weiteren Schritt ist der Einbau dieser Programme ins BFE-Auslegungsprogramm für Wärmepumpenheizanlagen *WPCalc* geplant. Zur **hydraulischen Auslegung** von Erdwärmesondenkreisläufen wurde eine Exceltabelle bereitgestellt [10a].

### WÄRMEPUMPEN UND BLOCKHEIZKRAFTWERKE

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. Diese muss grosse Temperaturunterschiede zwischen der Wärmequelle und den Wärmebezügern mit hoher Effizienz bewältigen kön-

nen. Sie muss auch bei tiefen Aussentemperaturen eine hohe Wärmeleistung aufweisen, um einen monovalenten Betrieb zu gewährleisten. Zur Erfüllung des BFE-Pflichtenhefts für die Entwicklung einer **Swiss Retrofit Heat Pump** sind deshalb Verbesserungen in Richtung eines zweistufigen Kreisprozesses nötig. Sie werden in mehreren Forschungsprojekten parallel angegangen. **Kreisprozesse mit Zwischeneinspritzung** wurden mit einem kommerziellen Scrollkompressor [15] und mit einem Prototypen eines neuen Scrollkompressors [17] untersucht. In [18b] wurden unterschiedliche **Enteisungsarten** an einer Luft/Wasser-Versuchswärmepumpe mit Zwischeneinspritzung verglichen. Der Lösung des Problems der **Schmierölwanderung** insbesondere in Kreisprozessen mit zwei Kompressoren wird in einem Folgeprojekt nachgegangen [18a]. Nach den vielversprechenden Ergebnissen einer Computersimulation wurde ein Funktionsmuster eines Wärmepumpenprozesses mit **separatem Kreislauf zur Kondensatunterkühlung** gebaut und in Betrieb genommen. Diese Variante brachte gegenüber konventionellen Kleinwärmepumpenprozessen bei grossen Temperaturhüben eine Erhöhung der Leistungszahl um 5 bis 10% und der Wärmeleistung um gut 20% [20]. Nach zahlreichen Rückschlägen wurde ein neues Funktionsmuster einer **Kleinwärmepumpe mit Ammoniak** als Arbeitsmedium gebaut und erfolgreich in Betrieb genommen. Ammoniak weist bei ökologischer Unbedenklichkeit ausgezeichnete Stoffwerte auf. Den Eigenschaften und der optimalen Betriebsweise des hier eingesetzten drehzahlvariablen **Flügelzellenverdichters** mit Zwischeneinspritzung wird in [5] auch für andere Arbeitsmittel nachgegangen.

Die Forderung nach der Verwendung natürlicher Kältemittel wurde in zwei Projekten hinterfragt. In einer

umfassenden Ökobilanz [3] wurde die **Umweltverträglichkeit natürlicher Kältemittel** mit den heute üblichen Fluorkohlenwasserstoffen (FKW) für Wärmepumpen [32], Kaltwassersätze, Solesätze und die Supermarktkühlung verglichen. Dabei werden die Kältemittelverluste, die Stromerzeugung für den Betrieb, die Herstellung sowie die Entsorgung der Anlagen einschliesslich der Kältemittel und der Transporte berücksichtigt. Im zweiten Vorhaben [1] wurden die mit der Verwendung von Ammoniak oder Kohlenwasserstoffen in Wärmepumpen und Kälteanlagen verbundenen **Risiken analysiert**. Daraus werden die **rechtlichen Konsequenzen** bei der Verwendung dieser Kältemittel für die schweizerische Gesetzgebung abgeleitet.

Viele BHKW-Anlagen erreichen die bei der Planung vorausgesetzte Jahresbetriebszeit nicht. Im Projekt zur **Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken** [2] verdeutlichte eine Sensitivitätsanalyse den dominierenden Einfluss des bei der Planung oft überschätzten Wärmeleistungsbedarfs. Die eigentliche Betriebsoptimierung nach dem vorgeschlagenen Vergleich zwischen den Planungs- und den realen Betriebsdaten kann erst nach einem entsprechenden Ausbau des Programms *WKKCalc* erfolgen.

## SYSTEMOPTIMIERUNG

Beim üblichen taktenden Betrieb von Wärmepumpen (und Kältemaschinen) können erhebliche Leistungs- und Leistungszahleinbussen auftreten. Diese sollen künftig bei Wärmepumpentypenprüfungen ebenfalls erfasst und in Auslegungsprogrammen berücksichtigt werden. Als Grundlage zum Verständnis dieser Taktverluste wurde eine detaillierte physikalische Modellierung der sich beim **An- und Abfahren von Wärmepumpen** abspielenden Vorgänge durchgeführt [4]. Aus den gefundenen Abhängigkeiten wurde eine empirische Funktion für die Taktverluste vorgeschlagen. Modell und Näherungsfunktion werden in der Folgephase [13] getestet. In dieser wird auch ein einfaches, aus der Kurztestmethode entwickeltes Modell mit wenig Anpassungsparametern erprobt werden. Dabei soll ein **Vorschlag für ein Testprozedere** ausgearbeitet werden. Für die entsprechenden Versuche wird eine Doppel-Klimakammer gebaut.

Ziel des Forschungsvorhabens **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen** [21] ist es, die wichtigsten Anlagekenngrössen von Heizungssystemen mit Wärmepumpen aus möglichst wenigen, kostengünstigen Betriebsmessungen an installierten Anlagen in kurzer Zeit zu bestimmen. Damit soll eine bessere Betriebsoptimierung und Regelung sowie die laufende Betriebsüberwachung mit Fehlererkennung erreicht werden. Für spätere Phasen ist die Umsetzung in die Praxis durch die Spezifikationen eines Einbausets für Wärmepumpen und eines Diagnosesets für den temporären Anschluss eines externen Computers für weitergehende Diagnosen geplant. In der 4. Projektphase [14] wurde mit *FuzzyWatch* eine neue Methode zur Betriebsüberwachung von Wärmepumpen und Kältemaschinen entwickelt und an einer Wärmepumpe in einem Laborprüfstand erprobt. Dabei konnten mit einem Minimum an

Temperatursensoren durch manuelle Eingriffe in der Versuchsanlage erzeugte Fehler (siehe Titelbild) zuverlässig erkannt werden.

Versuche über eine Heizperiode in einem Einfamilienhaus bestätigten die folgenden Vorteile der modellbasierten **Pulsbreitenmodulation** [7] gegenüber einer konventionellen aussentemperaturgeführten Rücklaufregelung: längere mittlere Laufzeit der Wärmepumpe, höherer Betriebsanteil bei Niedertarif, gezielter Wärmepumpeneinsatz für die Warmwasserbereitung zwischen den Heizbetriebsperioden, einfachere Benutzereingriffsmöglichkeit, Betrieb der Umwälzpumpe nur bei eingeschalteter Wärmepumpe, als externer Sensor genügt ein Aussentemperaturfühler – ein Raumtemperatursensor wird nicht benötigt. Fernziel ist eine Regelung, welche die massgebenden Einflussgruppen nach einer Inbetriebnahmephase selbst identifiziert und dann die Wärmepumpe automatisch mit diesen Parametern optimal regelt.

**Niedrigenergiehäuser** zeichnen sich durch einen hohen Wärmebedarfsanteil für die Warmwasserbereitung aus. Auch grosse Fensterflächen gegen Süden zur Erhöhung der passiven Solarenergienutzung wirken sich stärker aus als bei konventionellen Bauten. Um das Ziel eines hohen Komforts kostengünstig und mit möglichst geringer Umweltbelastung zu erreichen, werden im Projekt **Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpen** durch Gesamtsystemüberlegungen entsprechende Lösungen für die Praxis aufgezeigt [24]. Aufgrund der theoretischen Überlegungen und der Laborversuche in den Phasen 1 und 2 wurden in der laufenden Phase 3 drei Funktionsmuster (Sole/Wasser-, Luft/Wasser- und Luft/Luft-Wärmepumpe) mit neuen Niedrigenergiehäusern gebaut und in der Heizsaison 98/99 detailliert ausgemessen [11b]. Nach den ersten Erfahrungen wurden diverse Verbesserungen angebracht. Die Versuche werden mit den drei modifizierten Anlagen in der Heizsaison 99/00 weitergeführt. Die resultierenden verallgemeinerbaren Aussagen werden in der parallel laufenden Phase 4 in einem technischen **Handbuch für Planer** von Wärmepumpenheizungsanlagen für Niedrigenergiehäuser [12] zusammengefasst.

In der Erzeugung von **Gewerbekälte** steckt ein erhebliches Energiesparpotenzial. Es lässt sich nutzen durch direkte Verwendung der Abwärme der Kältemaschinen und saisonal verschobene Nutzung über Wärmepumpen durch Pufferung der Kältemaschinenabwärme in Erdwärmespeichern. Eine entsprechende Pilotanlage wurde analysiert und mit Computersimulationen nachgebildet [22]. Im kommenden Jahr wird ein Planungshandbuch zur Konzeption und Auslegung solcher Anlagen ausgearbeitet.

Im Bereich der **Abwärmenutzung** konzentrierten sich unsere Forschungsbemühungen auf die energetische Integration von Batch-Prozessen, die komplexere Haustechnik und die Lösungsmittelbewirtschaftung. Bei der **Integration von Batch-Prozessen** [16] wurden vorhandene Methoden (Omnium Verfahren, Permutationmethode, Pinch-Methode) anhand industrieller Fallbeispiele verglichen. Für die in Batch-Prozessen oft nötige indirekte Wärmeübertragung wurde die Pinch-

Methode erweitert und die Modellierung mit den mathematischen Methoden der nichtlinearen Programmierung und durch genetische Algorithmen angegangen. Die systematische Konzipierung thermischer Anlagen der **komplexeren Haustechnik** mit der in der Prozesstechnik bewährten Pinch-Methode wurde am Beispiel eines Laborbaus entwickelt und erprobt [9]. Sie hat sich über die Erfassung typischer Betriebszustände als durchführbar – aber auch als recht aufwändig erwiesen.

Lösungsmittel sind in der Prozesstechnik energetisch besonders relevant. In einem neuen Projekt wird deshalb ein Leitfaden zur **energetisch und ökologisch optimalen Behandlung verbrauchter Lösungsmittel** ausgearbeitet [19]. Im Berichtsjahr wurde eine systematische Analyse des Ist-Zustands der Behandlung von Abfall-Lösungsmitteln in der schweizerischen chemischen Industrie durchgeführt.

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die bedeutenden Forschungsaktivitäten des Energieforschungsfonds der Schweizerischen Gasindustrie **FOGA** wie auch der Forschungsfonds der Erdölvereinigung **FEV** im Bereich der Wärme-Kraft-Kopplung erlaubte uns eine Konzentration der verfügbaren Mittel auf den Wärmepumpenbereich. Unsere Anstrengungen für eine thermodynamisch sinnvollere Erzeugung der Nieder-temperaturwärme wird auch mit dem Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft **PSEL** koordiniert. Der **PSEL** unterstützte mit dem BFE, den Nordostschweizerischen Kraftwerken **NOK** und dem Elektrizitätswerk der Stadt Zürich **EWZ** die Qualitätssicherung bei Wärmepumpen durch Beiträge an das **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss**. In der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz **FWS** arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Installateuren, Hersteller von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger und effizienter Wärmepumpenheizungsanlagen zusammen. 1999 wurde das Gütesiegel für Wärmepumpen erstmals verliehen. Der Qualitätssicherung dienen auch die diversen Weiterbildungskurse der **FWS**. Die Herbsttagung 1999 des **WKK-Fachverbands** befasste sich mit den Chancen und den Problemen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie in liberalisierten Märkten.

Die **internationale Zusammenarbeit** erfolgte vorwiegend durch **bilaterale Kooperation** mit Nachbarländern und durch Mitarbeit in Projekten der **Internationalen Energieagentur IEA**. Zwischen der **FWS** und den entsprechenden Organisationen in Deutschland und Österreich finden regelmässige **Dreiländertreffen** statt. Das Interesse der *Electricité de France* **EdF** an unserer Wärmepumpentechnologie konkretisierte sich durch die Übernahme des BFE-Planungsprogramms **WP-Calc** und die Erprobung unserer Heizkörperwärmepumpe. Eine weitere Zusammenarbeit bahnt sich im Bereich der Wärmepumpenentwicklung für den Sanierungsmarkt an. Eine **englische Delegation** liess sich in der Schweiz

über die Aktivitäten der **FWS** und des **BFE** zur Förderung der Wärmepumpenheiztechnologie orientieren. Im Rahmen der schweizerischen Beteiligung am **IEA Heat Pump Programme HPP** fand 1999 in Berlin die sechste **IEA Heat Pump Conference** statt [28]. Wir konnten dabei ein internationales Publikum über unserer Forschungstätigkeiten im Bereich der Systemoptimierung orientieren [26]. Am Workshop zum Thema *Natural working fluids – a challenge for the future* stellte die Schweiz die Ergebnisse zur Diskussion [1]. Innerhalb des **Swiss National Teams** [11a] fand wiederum ein reger nationaler und internationaler Informations- und Gedankenaustausch auch im Bereich der für Wärmepumpen relevanten Normung statt. Die im HPP-Projekt **Compression Systems with Natural Working Fluids** unter aktiver Beteiligung der Schweiz erarbeiteten Planungsgrundlagen für die Anwendung natürlicher Kältemittel sind nun im Schlussbericht [27] verfügbar. Eine Teilnahme schweizerischer Firmen an den verstärkten internationalen Anstrengungen um CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium [30] und um die Verbesserung der Absorptionsaggregate [29] war bisher nicht zu initiieren. Entsprechend kam ein Beitritt der Schweiz zu den vielversprechenden neuen HPP-Projekten **Advanced Supermarket Refrigeration** und **Selected Issues on CO<sub>2</sub> as a Working Fluid in Compression Systems** noch nicht zustande. Nebst diesen IEA-Aktivitäten sichert das **BFE** die Teilnahme der Schweiz an dem für die Forschung und Entwicklung in der Wärmepumpen- und Kältetechnik wichtigen **International Institute of Refrigeration IIR**.

Im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit im **IEA-Implementing Agreement on Process Integration** fand unter aktiver schweizerischer Beteiligung die erste **internationale Konferenz zur Prozessintegration** statt [31]. Leider konnte das Schweizer Projekt **Process Integration Methodologies accounting for Sustainability Factors** infolge zu unterschiedlicher Auffassungen der Teilnehmerländer noch nicht gestartet werden.

## 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 1999 bearbeiteten Forschungsarbeiten

sind **gute Grundlagen für eine industrielle Weiterentwicklung zu neuen Produkten**, dienen einer **besseren Auslegung** und einem **optimaleren Betrieb** von Wärmepumpenheizungssystemen. Die Arbeiten zur

Prozessintegration ermöglichen die **Reduktion des Energiebedarfs verfahrenstechnischer Prozesse** und komplexer haustechnischer Anlagen. Mit den in der Fachpresse und in der **Internetseite** des Forschungsprogramms publizierten **Kurzfassungen** des Programmleiters wird laufend auf die Resultate abgeschlossener Vorhaben hingewiesen. Zahlreiche P+D-Projekte helfen, das in der Forschung Erarbeitete in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen. Der Umsetzung von F+E sowie von P+D-Ergebnissen dienen auch die gut besuchte **6. UAW-Tagung des Bundesamts für Energie** vom Mai 99 [25], die gemeinsam mit dem BUWAL durchgeführte Herbsttagung 1999 **Natürliche Kältemittel – jetzt oder später?** des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik SVK und die gemeinsam mit dem Forschungsbereich "Rationelle Energienutzung in Gebäuden" durchgeführte Veranstaltung **Passive Kühlung mit Lufterdregistern und Erdwärmesonden** mit Berichten aus [8] und [10b].

Das auch vom BFE unterstützte **Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss** leistet einen erheblichen Beitrag zur Sicherung der Wärmepumpenqualität und zur Erhöhung der Effizienz der im Handel angebotenen Wärmepumpen. Die von der FWS organisierte **Sonderschau für die Wärmepumpenheizung** an der 30. Fachmesse für Altbaumodernisierung mit flankierenden Workshops in Zürich bot erneut eine ausgezeichnete Gelegenheit, die Vorteile der Wärmepumpenheizung einer grossen Besucherzahl zu zeigen. Die FWS sorgt durch **Ausbildung** der entsprechenden Fachleute, **Berater**, die Verleihung des **Gütesiegels** und die Herausgabe diverser **Dokumente** und Formulare für eine Erhöhung der Qualität der Wärmepumpentechnik. Der immer noch geringe Bekanntheitsgrad der Methoden der **Prozessintegration** wurde durch die Lancierung eines vierten BFE-Kurses für Energiefachleute aus der Prozessindustrie begegnet.

## Ausblick auf 2000

Entsprechend dem **Konzept für die Jahre 2000 bis 2003** [33] dienen die für 2000 geplanten Forschungsarbeiten in erster Linie dem Schliessen von Wissenslücken zur Entwicklung einer effizienten und kostengünstigen **Wärmepumpe für den Sanierungsmarkt** sowie dem Testen und dem Vergleich erster Funktionsmuster der *Swiss Retrofit Heat Pump*. Ebenfalls hohe Priorität wird der **Systemoptimierung** beigemessen. Nebst den oben beschriebenen laufenden Forschungsarbeiten wird dazu die Standardisierung der hydraulischen Schaltungen von Kleinwärmepumpenanlagen mit Luft, Erdreich

und Solarwärme als Wärmequelle in Angriff genommen. Auch das BFE-Auslegungsprogramm für Wärmepumpenheizungen WPCalc soll einer gründlichen Überarbeitung unterzogen werden. Neue nationale und internationale Projekte sind für das Einbringen ökologischer Aspekte in die Prozessintegration vorgesehen. Am 9. Mai 2000 führen wir die 7. öffentliche **UAW-Tagung** mit dem Thema **"Effizientere Wärmepumpenheizungen durch Optimieren des Gesamtsystems"** durch. Programm und Anmeldung bei ENET.

## Projets P+D

Fabrice Rognon, chef du programme P+D

### CHALEUR AMBIANTE (POMPES À CHALEUR)

Durant l'année écoulée, nous avons enregistré 6 demandes nouvelles dont 4 ont été acceptées. Pour les 2 restantes, nous attendons des compléments d'information avant de statuer définitivement. Le nombre de requête est en recul par rapport à l'année passée, mais le nombre de contacts pour des nouveaux projets est en nette augmentation, surtout en Suisse romande. Outre deux mandats, 30 installations se trouvent à des stades divers de réalisation. Elles se répartissent de la manière suivante:

Les rapports suivants sont parus en 1999 et sont disponibles auprès de Nova Energie:

- 10575: Messungen an drehzahlregulierter Wärmepumpenanlage im Unterwerk SAK Bronschhofen
- 00377: Umbau einer Ölheizung auf eine Wärmepumpenanlage hoher Leistungszahl
- 29145: Gasmotor-Wärmepumpe mit Aarewasser in Hinterkappelen, langfristige Erfolgskontrolle
- 26524: Centre de développement pour pompes à chaleur d'Yverdon

Afin de susciter des projets, nous avons lancé en coordination avec l'action d'Energie 2000 "Energie dans les STEP" un mandat de recherche de sites pour l'implantation de pompes à chaleur utilisant la chaleur résiduelle des stations d'épuration des eaux. Un second mandat analyse les potentiels technico-économiques des pompes à chaleur de grandes puissances. Trois projets ont ainsi vu le jour en 1999.

A l'avenir, les priorités restent: la rénovation de chauffages existants, l'utilisation de fluides frigorigènes neu-

Sources de chaleur	air	sondes géothermiques	nappe phréatique	lac, rivière / STEP
Nombre	7	10	6	3/2

Systèmes principaux	CCF+P AC	air/eau monovalente	air/eau avec appoint	Nappe phréatique/eau
Nombre dont CAD	7	5	2	11
dont réseau de source de chaleur	4	0 0	1 0	7 2

tres pour l'environnement, l'amélioration du coefficient de performance et l'abaissement des coûts.

## COUPLAGE CHALEUR-FORCE

Durant l'année écoulée, nous avons enregistré 5 demandes nouvelles. 2 sont acceptées, 2 sont refusées et 1 est en discussion. Afin de stimuler le programme, nous avons octroyé un mandat de recherche de sites démonstratifs d'implantation dans des STEP de petites et très petites installations de cogénération (puissance électrique de quelques kW à quelques dizaines de kW) fonctionnant au biogaz. Cette étude est menée conjointement avec l'action d'Energie 2000 "Energie dans les STEP". Un premier projet a été mis en chantier fin 1999.

Outre le mandat susmentionné, les 3 des 4 projets en cours fonctionnent au gaz nature et un utilise du biogaz

de STEP. Dans tous les cas, la chaleur est utilisée. Les rapports suivants sont parus en 1999 et sont disponibles auprès de Nova Energie:

- 15568: Couplage chaleur-force de l'école hôtelière de Lausanne, mesures et transfert, rapport final
- 00026: Wärmeverbund Sarnen, Erfolgskontrolle

Afin d'encourager l'utilisation de groupes chaleur-force en combinaison avec des pompes à chaleur, nous avons en outre publié un cahier d'aide à la planification destiné aux ingénieurs [23].

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

## Liste der Projekte

- [1] M. Wolfer, E. Seitz, BASLER & HOFMANN, Zürich & H-J. Seiler, LEGAL R&C, Münsingen: *Ammoniak und Kohlenwasserstoffe als Kältemittel: Risikoanalyse – Produkthaftpflicht und Strafrecht* (SB) / ENET 9934024
- [2] M. Erb, DR. EICHER + PAULI AG, Liestal: *Betriebsoptimierung von Blockheizkraftwerken, Phase 1: Vergleich von Planungs- und Betriebskenngrößen* (SB) / ENET 9826563
- [3] R. Frischknecht, ESU-SERVICES, Uster: *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel – Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen* (SB) / ENET 9933303
- [4] B. Gubser, L. Wirth, M. Ehrbar, FH-Buchs: *Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 1, Etappe 2 Modellbildung* (SB) / ENET 9720132
- [5] A. Zingerli, M. Ehrbar, FH-Buchs: *Dynamische Charakteristiken von Vielzellen- und Scrollkompressoren Wärmepumpentest* (JB) / ENET 9720132
- [6] Th. Kopp, FH-Rapperswil: *Kleinwärmepumpen mit Ammoniak – Phase 2: Kompressor- und Ammoniakfallentest* (JB) / ENET 9719746
- [7] H.R. Gabathuler, H. Mayer, GABATHULER, Diessenhofen & E. Shafai, R. Wimmer, IMRT/ETH-Zürich: *Pulsweitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Phase I* (SB) / ENET 9723972
- [8] W. Leu, GEOFORM, Winterthur & B. Keller, MENGIS+LORENZ, Luzern & Th. Mégel, MEGEL GEO-WATT, Zürich & U. Schärli, L. Rybach, IFG / ETH-Zürich: *PC-Programm für geothermische Eigenschaften des Schweizer Molassebeckens – Benutzerhandbuch zum Programm SwEWS* (SB) / ENET 9723763
- [9] U. Hofstetter, HELBLING, Zürich: *Einsatz der Pinch-Methode in der Haustechnik* (SB) / ENET 9825230; *Foliensammlung Haustechnik* (SB) / ENET 9919272
- [10] A. Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich: a) *Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen* (SB) / ENET 9934023 • b) A. Huber, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & D. Pahud, LASSEN / EPF-Lausanne: *Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder* (SB) / ENET 9819227
- [11] Th. Afjei, INFEL, Zürich: a) *Internationale Zusammenarbeit im Rahmen des IEA Heat Pump Centre* (JB) / ENET 986187 • b) *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3: Test an Funktionsmustern* (JB) / ENET 986187
- [12] Th. Afjei, INFEL, Zürich & W. Betschart, M. Dürig, P. Keller, G. Zweifel, HTA-Luzern, Horw & A. Bühring, ISE, D-79100 Freiburg & S. Ginsburg, IMRT / ETH-Zürich & A. Huber, P. Widmer, HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 4: Technisches Handbuch* (ZB) / ENET 9816187
- [13] E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich: *Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 1, Etappe 3 Messverfahren, experimentelle Erprobung* (JB) / ENET 9933684
- [14] D. Zogg, E. Shafai, IMRT / ETH-Zürich: *Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen – Phase 4: Parameteridentifikation und Fehlerdiagnose für das Teilsystem Wärmepumpe* (SB) / ENET 9817822

- [15] D. Trüssel, KÄLTE-WÄRME-TECHNIK, *Belp: Wärmepumpe mit Zwischeneinspritzung und Zwischen-druckkühlung* (JB) / ENET 9931783
- [16] P. Krummenacher, LENI / EPF-Lausanne: *Energy Integration of Industrial Batch Processes, phase 2*, (SB) / ENET 9655360
- [17] F. Brand, LENI / EPF-Lausanne: *Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 1* (JB) / ENET 9934445
- [18] M. Zehnder, D. Favrat, LENI / EPF-Lausanne: *a) Migration d'huile dans les pompes à chaleur* (JB) / ENET 9933683 • *b) Pompe à chaleur biétagée à haute performance, phase 2* (SB) / ENET 9710478
- [19] Ch. Jahn, LTC / ETH-Zürich: *Lösungsmittelbewirtschaftung in der chemischen Industrie* (JB) / ENET 9931269
- [20] G. Reiner, SULZER FRIOTHERM, *Rothenburg*, M. Zehnder, D. Favrat LENI / EPF-Lausanne, E. Zahnd, J. Cizmar, FH-Burgdorf, C.Brugnoli, CRYOTHERM, *Toffen*, P.Reis, REIS ENGINEERING, *Sutz-Lattrigen: Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung, Phase 2: Experimentelle Untersuchung* (SB) / ENET 9824787
- [21] G. Reiner, SULZER FRIOTHERM, *Rothenburg* & E. Shafai, R. Wimmer, D. Zogg, IMRT/ETH-Zürich & H.R. Gabathuler, H. Mayer, GABATHULER, *Diessenhofen* & H.U. Bruderer, SATAG THERMOTECHNIK, *Arbon: Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen – Phase 3: Messung, Modellierung und Erprobung der Parameteridentifikation* (SB) / ENET 9657407
- [22] J. Good, VERENUM, *Zürich: Systemauslegung für Gewerbekälteanlagen mit Erdwärmenutzung* (JB) / ENET 9933304
- [23] M. Albrecht, S. Lanz, B. Eggen, DR. EICHER + PAULI, *Bern: Pompe à chaleur indirecte à moteur à gaz* (SB) / ENET 30888 (allemand) et ENET 30959 (français).
- (JB) Jahresbericht 1999 vorhanden  
 (ZB) Zwischenbericht vorhanden  
 (SB) Schlussbericht vorhanden

## Referenzen

- [24] Th. Afjei: *Haustechnik von morgen*, Schweizer Ingenieur und Architekt, 117(99)33, 32/38; Der Wandel in der Haustechnik, Bulletin SEV/VSE 90(1999)24, 13/17.
- [25] F. Rognon (Hrsg.): *Wärmepumpen – heute und morgen*, Tagungsband zur 6. UAW-Tagung, BFE 1999 / ENET 30931
- [26] E. Shafai, S. Ginsburg, R. Wimmer, D. Zogg: *Validation of a model for a residential heat pump system based on short-period measurements*, R. Wimmer, E. Shafai, H.R. Gabathuler, H. Mayer: *Pulse-width modulation for low-power heat pump heating systems*, IEA Heat Pump Conference Berlin 1999.
- [27] F. Stene: *Guidelines for Design and Operation of Compression Heat Pump, Air Conditioning and Refrigeration Systems with Natural Working Fluids*, Final Report from Annex 22 of the IEA Heat Pump Programme, IEA Heat Pump Centre, Sittard 1998. ISBN 90-73741-31-9
- [28] M. Zogg: *6<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference 1999*, Gas-Wasser-Abwasser, 79(99)7, 619/620, Heizung Klima 26(99)9, 56/57.
- [29] M. Zogg: *International Sorption Heat Pump Conference 1999*, Gas-Wasser-Abwasser, 79(99)4, 342, Heizung Klima 26(99)5,54/55.
- [30] M. Zogg: *IEA/IIR/IZW-Workshop on CO<sub>2</sub> Technology in Refrigeration, Heat Pumping and Air Conditioning 1999*, Heizung Klima 26(99)5,56.
- [31] M. Zogg: *International Conference on Process Integration PI'99*; Conference Proceedings, Vol. 1: Papers, Vol. 2: Posters, Copenhagen 1999, SVK-Bulletin (99)4,2.
- [32] M.Zogg: *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel in Wärmepumpen*, Heizung Klima 26(99)11, 36/41.
- [33] 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.

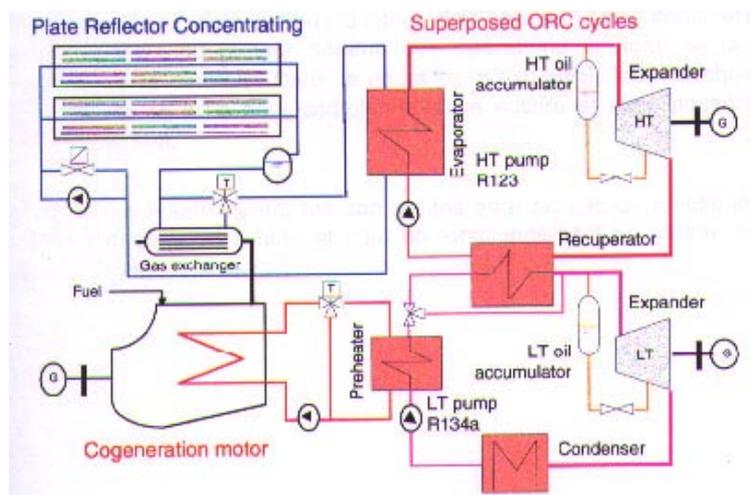
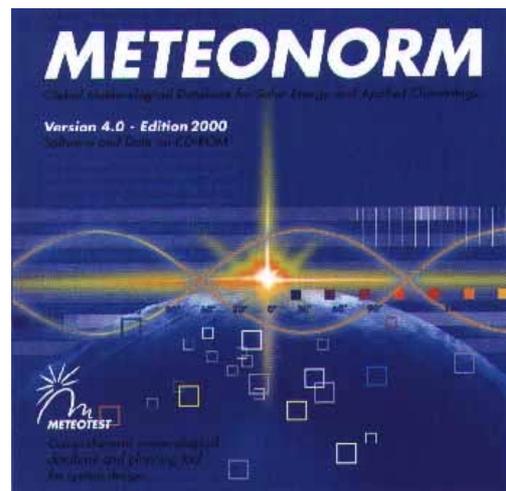


## SOLAIRE ACTIF : CHALEUR

Rapport de synthèse  
sur les activités 1999 du programme de recherche

**Jean-Christophe Hadorn**

[jchadorn@swissonline.ch](mailto:jchadorn@swissonline.ch)



### Nouveaux outils pour le solaire

En haut : [POLYSUN 3.0](#) et [METEONORM 4.0](#) deux outils logiciels internationalement appréciés

En bas : le capteur extra-plat à concentration CEP3 mis au point à Lausanne par [Cogener](#) pour la centrale [SPS](#) (Small Power Systems) développée par le LENI-EPFL et COGENER (Photos Cogener).

## Centres de gravité du programme

La recherche solaire thermique suisse est une recherche appliquée. Le programme est orienté principalement vers le marché des installations thermiques pour le bâtiment. La demande en chaleur basse température représente en effet plus de 50% de la demande d'énergie en Suisse, et l'énergie solaire thermique est bien adaptée au niveau de température requis.

Le programme 1999 a été organisé autour des trois centres de gravité suivants:

1. Augmentation continue des connaissances sur le fonctionnement des composants et des systèmes solaires thermiques et partage de cette connaissance avec l'industrie solaire suisse. Le Centre national d'héliotechnique [SPF](#) à Rapperswil dispose d'un grand savoir-faire sans cesse enrichi d'expériences, grâce aux installations performantes de mesures de composants industriels.

2. Étude de **systèmes industriels standard combinés**, chauffage et eau chaude pour villas, dans le cadre que nous avons défini en créant en fin 1998 un [projet](#) du programme «*Solar Heating and Cooling*» (SH&C) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), en liaison avec l'industrie.
3. En matière de concentration solaire, réalisation et test d'un prototype de **mini-centrale** solaire thermique "SPS" de 10 kWél.

Le programme repose sur trois pôles de compétences : [Rapperswil](#), [Yverdon](#), et [Lausanne](#). Nous voulons une continuité des équipes et une capitalisation du savoir-faire. Notre budget est cependant en diminution et nous devons veiller à maintenir les motivations des jeunes chercheurs qui ont tendance à se détourner de l'énergie solaire.

## Buts visés pour 1999

### a) *Logistique*

Le développement de [METEONORM 4.0](#) et la sortie de [POLYSUN 3.0](#)(trilingue) étaient prévus.

Le deuxième [CD-ROM "SPF Info"](#) était souhaité en version multilingue.

L'infrastructure informatique et la présence sur Internet du SPF devaient être renforcées.

### b) *Composants*

Les installations de mesures du SPF à Rapperswil ont été progressivement changées. Cela devait se faire en continuité, sans rupture de service.

Les appareils de mesure du SPF devaient être utilisés au service de l'industrie solaire.

La production de la nouvelle couche sélective améliorée de l'absorbeur d'ÉNERGIE SOLAIRE était attendue.

Un banc d'essai de stocks solaires devait être mis en service au SPF de Rapperswil.

### c) *Systèmes*

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

Les tests de qualité des capteurs devaient être organisés à Rapperswil de manière routinière et convaincante pour les industriels qui les paient.

L'EIVD d'Yverdon devait aboutir à un chauffe-eau solaire économique en collaboration avec un industriel romand.

Le groupe d'Yverdon devait surtout mettre en place et utiliser son nouveau banc d'essai pour systèmes combinés, avec charge solaire et décharge de chauffage entièrement programmable. Les résultats d'analyse d'un système industriel mis au banc étaient attendus.

L'application des méthodes du contrôle optimal à un *kit* solaire devait aboutir à une modification d'une installation (appoint et régulation) et à un test réel.

L'utilisation à un haut niveau de compétences du logiciel [TRNSYS](#) par le SPF et l'EIVD pour la simulation d'installations complexes et l'intégration aux activités AIE étaient visées. Une excellente participation suisse aux activités dans le cadre du [projet](#) concerné de l'[AIE](#) était demandée.

Le projet de SPS (*Solar Power System*) du Laboratoire d'énergétique industrielle (LENI/EPF-Lausanne) et de [COGENER](#) • une mini-centrale électro-solaire de 10 kWél • devait avoir fonctionné durant l'été 1999 et produit les premiers kWh électro-solaires.

### d) *Installations*

Le rapport final du projet solaire mesuré depuis 1997 par le CUEPE à [Plan-les-Ouates](#) était attendu.

Le rapport final des deux immeubles solaires à Sevelen avec les mesures sur CD ROM était souhaité.

Des publications et une présence de qualité à CISBAT'99 de l'ensemble des chercheurs du programme étaient exigées.

## Travaux effectués et résultats obtenus

### a) Logistique

En 1999, METEONORM 4.0 Édition 2000 a été réalisé par [METEOTEST](#). 2'500 stations sont désormais disponibles couvrant l'ensemble du globe ; les interfaces d'entrée de donnée et de sortie de résultats ont été révisés dans le but de faciliter l'usage du logiciel. Les valeurs extrêmes sur 10 ans de la température de l'air et de l'irradiance peuvent être estimées pour tout site. Nous continuons de maintenir et de développer un outil de premier plan pour toutes les analyses de dimensionnement d'installations autour du monde. 600 exemplaires devraient être vendus dans les 2 ans à venir [1].

Le logiciel [POLYSUN 3.0](#) a été achevé et distribué. Il comporte les nouveautés suivantes : quatre nouveaux types d'installations solaires peuvent être calculés (lance de stratification, échangeur solaire externe) ; une analyse économique d'une installation et également un bilan écologique peuvent être réalisés. Le logiciel a été profondément remanié en programmation objet pour pouvoir être maintenu et enrichi plus aisément. Des solutions avec un pas de temps interne variable ont été implémentées, réduisant encore le temps de calcul. La documentation a été entièrement révisée et traduite en 3 langues. Une gestion par logiciel *ad hoc* du multilinguisme a été mise en place. [Polysun 3.0](#) est vendu 798 CHF par [Infoenergie](#) en Suisse et par des revendeurs en Europe. 50% des anciens clients ont choisi la mise à jour de la version 2.0 à la version 3.0 (prix de 129 CHF). De nouveaux clients ont été acquis. Des cours ont été organisés en 1999 [2D].

Le deuxième [CD ROM «SPF Info»](#) intitulé «**Données et Tableaux 1999**» a été produit. Le CD est désormais trilingue. Il a été distribué à 1'700 exemplaires en Suisse et 5'000 en Europe. Un prix de 53 CHF était demandé à bien plaisir. 10% ont accepté de payer. La distribution internationale en Europe a été assurée par des relais mis en place en Allemagne et en France. [2D].

Le [site Internet du SPF](#) a été très fréquenté (24'000 visites, 50'000 documents consultés) et a nécessité une maintenance constante. Une solution avec un serveur dédié au SPF est à l'étude pour garantir plus de stabilité. Les [sites](#) des programmes de recherche «Solaire actif - chaleur» et «Stockage de chaleur» ont été également mis en fonction et sont hébergés sur le serveur du SPF [2D].

**Le système d'acquisition de données du SPF**, qui soutient toutes les activités métrologiques du SPF, a été maintenu à un haut niveau de fiabilité avec toutes les données de mesure organisées en *datawarehouse*. La réalisation d'un **logiciel de pilotage** du nouveau banc d'essai des stocks solaires a été menée à bien : il est possible désormais de mesurer un stock selon une séquence de conditions aux limites programmable par logiciel et de comparer les résultats de mesure direc-

tement à ceux d'une simulation [TRNSYS](#) du stock, en temps réel. Un outil attendu depuis plusieurs années et qui devrait permettre d'améliorer la vitesse et la profondeur de compréhension des phénomènes dans le stock, la vitesse de modification pour une amélioration et la qualité des modèles [2D].

Le logiciel [TubeCalc 2.0](#) pour l'évaluation des pertes de charge de tout circuit solaire et pour le dimensionnement de la pompe a été amélioré. Il est disponible sur le CD ROM «SPF Info», de même que le nouveau logiciel [CoverTool 1.0](#) qui fournit les résultats de plus de 12 ans de mesure de transmission de matériaux transparents exposés aux intempéries [2D].

### b) Composants

Les travaux de recherche réalisés au [SPF/HS-Rapperswil](#) ont été accomplis avec une grande rigueur professionnelle.

Les principaux résultats obtenus en 1999 au SPF sont les suivants [2]:

- La rénovation de l'installation de mesures du SPF s'est poursuivie durant 1999 (nouvelle centrale d'acquisition de données en 1998 et tous les logiciels à adapter).
- 45 capteurs ont été testés au banc du SPF en 1999 ; dans l'ensemble les capteurs sont meilleurs que l'an passé.
- La mesure de l'effet de l'angle d'incidence du rayonnement sur les performances («*IAM ou Incident Angle Modifier*») a été faite de manière systématique et les résultats sont utilisés dans la recherche de nouvelles structures de verre solaire.
- La méthode «quasi-dynamique» de tests a été abondamment comparée à la méthode traditionnelle «statique». Elle offre de nombreux avantages (plage de fonctionnement acceptable pour les tests plus large, prise en compte de comportement sous rayonnement diffus, effet de capacité du capteur inclus, tests praticables dans des délais plus courts, IAM obtenu simultanément à la courbe de performance du capteur, précision comparable), avec un dépouillement des mesures par régression multiple possible dans Excel. Elle nécessite toutefois un filtrage plus important qui devra être totalement automatisé à terme. Cette méthode sera préférée à l'avenir et implémentée pour toutes les mesures de capteurs en standard. Cela va dans le sens de l'Europe.
- Le dialogue avec certains fabricants a nécessité plus de temps que prévu, du fait de contestation des résultats de tests, explicable la plupart du temps par la déception des concepteurs face à une performance moins bonne qu'espérée. Une réponse de qualité, en précision et délai, aux demandes d'explication a été visée dans tous les cas délicats.

- Les tests de qualité des capteurs ont absorbé ressources et attention. Un test dure 3 à 5 mois selon la météo. Une quinzaine de tests ont pu être réalisés en 1999. Ces tests sont vus comme contraignants par les fabricants, mais permettent d'éliminer rapidement du marché les capteurs qui ne sont manifestement pas durables.
- Pour qu'ils soient encore plus utiles, les tests sont réalisés en grande concertation avec les fabricants, permettant ainsi des améliorations des capteurs sur des détails pouvant être la source de catastrophe à l'exploitation (joint, ventilation, raccord). Le SPF était en 1999 le seul laboratoire à offrir de tels tests qui deviendront obligatoires en 2000, selon la norme européenne. L'expérience acquise sera importante pour gagner des parts de marché, la tendance étant à la diminution des centres de tests de composants solaires en Europe. Notre stratégie est de maintenir le SPF comme centre suisse et européen de premier plan. Une industrie solaire encore fragile, exportatrice et innovatrice, comme celle de la Suisse, doit avoir accès à un centre de compétences de premier plan.
- Les ingénieurs du SPF s'efforcent de conseiller les fabricants pour améliorer leurs capteurs, soit par des dispositions constructives nouvelles, soit par le recours à de nouveaux matériaux. Cela est possible par le maintien à un haut niveau du centre de recherches SPF, avec un large tissu de relations internationales à entretenir.
- La certification EN 450001 du SPF n'a pas pu avoir lieu en 1999 comme prévu du fait de la surcharge du service suisse d'accréditation.
- Le CD ROM SPF Info «Faits & Tableaux» est désormais le moyen de transfert des informations globales du SPF vers le marché, puisque nous avons décidé de supprimer les encombrants classeurs de tests de capteurs en 1998. Petit à petit, le site Internet prendra le pas sur le CD ROM, mais le marché n'y est pas encore totalement prêt.

Dans le domaine clé des matériaux, les travaux et résultats du SPF ont été en 1999 les suivants [2C]:

- Les travaux du groupe de travail «MSTC - *Materials in Solar Thermal Collectors*» se sont achevés avec succès. Un livre est en cours de préparation.
- Une nouvelle tâche a été décidée par le programme solaire de l'AIE pour faire suite à ces travaux: «*Performance of Solar Façade Components*». Elle est organisée en trois activités: performance, longévité, et développement durable. Le SPF dirige l'activité "longévité" qui débutera en 2000.
- L'analyse de la stabilité de 6 fluides caloporteurs jusqu'à 220 °C a été menée en autoclave conçu spécialement en collaboration avec l'EMPA, avec des difficultés d'appareillage imprévues.
- Un banc test nouveau a été monté en laboratoire et

utilisé pour deux fabricants de verre solaire : la mesure de la transmission spectrale du rayonnement direct des matériaux transparents. L'appareil est transportable. Il est utilisé avec des échantillons de 10 cm x 30 cm et permet une mesure automatisée.

- Un modèle de simulation de transmission de rayonnement solaire au travers d'une couverture transparente a été acquis et comparé à des mesures de manière satisfaisante. Le logiciel sera une aide pour le design de verre solaire à basse réflexion de surface.
- Un nouvel appareil de test des couches sélectives sous vide et à haute température a été mis au point, pour les tests de vieillissement.
- Un système de traitement anti-calcaire de l'eau par champ magnétique est testé en conjonction avec un stand de test de l'encrassement des échangeurs à plaque. L'installation a été élaborée avec deux partenaires industriels intéressés à résoudre ce problème qui se pose fréquemment dans la pratique.
- Le transfert de technologie du brevet «Absorbent 2000» vers un industriel allemand est achevé : la production en continu est en fonction ; une amélioration de la structure des couches apparaît cependant encore possible, notamment pour augmenter l'absorption de la couche. Cela dépend désormais de l'industriel.

Le projet **ABSORBEUR AS+** avait pour objectif l'amélioration des caractéristiques de la couche sélective produite par Énergie Solaire SA pour des absorbeurs en inox à coussin, capables d'être utilisés dans des toitures solaires sans vitrage. Il s'agissait d'un financement conjoint, OFEN + industrie. La couche C3-97, développée durant 1996, allait au delà du cahier des charges, avec des valeurs  $\alpha$  de 0,959 et  $\epsilon$  de 0,048. La poursuite de l'étude, avec pour but la simplification de la fabrication, a permis de mettre au point la couche C4-97 qui, avec des valeurs  $\alpha$  et  $\epsilon$  pratiquement identiques et les mêmes résultats aux tests de vieillissement, a été qualifiée pour le passage à la production industrielle.

Les résultats sur la ligne de production, modifiée dans le cadre du projet de recherche, permettent de garantir  $\alpha \geq 0,95$  et  $\epsilon \leq 0,07$ . Depuis septembre 1998, les absorbeurs et capteurs sans vitrage peuvent être produits avec la nouvelle couche C4-97, sans augmentation de prix (contrainte demandée). Testé au SPF, le capteur sans vitrage a vu une augmentation importante de ses performances de 12,7% à  $x = 0,03$  (le rendement passe de 0,55 à 0,62) et de 29% à  $x = 0,05$  (le rendement passe de 0,31 à 0,40). En ce qui concerne les capteurs vitrés, l'augmentation du rendement est de 0,03 à 0,065 à  $x = 0,10$ , selon les modèles des fabricants qui incorporent l'absorbent. Cependant, des tests complémentaires réalisés à l'EMPA, avec des critères plus contraignants que la norme ISO/CD 12592.2 initiale-

ment adoptée, ont démontré une sensibilité non acceptable au SO<sub>2</sub>. En conséquence, la couche C4-97 n'est aujourd'hui commercialisée que pour l'application «absorbeur dans un capteur vitré». En laboratoire, une couche résistante au SO<sub>2</sub> a été mise au point. Cependant, vu son coût élevé et l'importance des investissements qu'implique la modification de l'installation de galvanoplastie et que l'industriel devrait supporter seul, sa mise en production a été reportée. Le but de cette recherche cofinancée par l'OFEN, un meilleur absorbeur pour les toitures solaires, a donc été atteint partiellement seulement ; mais la porte est ouverte et le fabricant devrait à l'avenir mettre sur le marché une couche améliorée, mais sensiblement plus chère, adaptée aux toitures solaires qui se développent en Europe, sous l'impulsion initiale de la recherche et des projets P+D suisses (cf. l'installation de [Plan-les-Ouates](#) dans ce rapport) [3].

Le SPF avait débuté en 1998 la **réalisation d'un banc d'essai des stocks solaires** de 1 à 25 m<sup>3</sup>. Les résultats obtenus en 1999 ont été les suivants :

1. Le banc a été conçu et est opérationnel de manière entièrement automatique. La charge solaire (0 à 18 m<sup>2</sup>) et la décharge pour chauffage (bâtiment simulé) ou eau chaude sanitaire (profil de soutirage et température réglables) sont totalement contrôlables. Pour les systèmes combinés, l'appoint par une chaudière au gaz peut également être testé.
2. Parallèlement, un travail théorique en commun avec le Danemark a été mené pour définir les paramètres de description d'un stock solaire stratifié et les séquences de tests nécessaires. Il s'agit d'une recherche originale.

### c) *Systèmes*

En 1998, nous avons lancé la [Tâche 26](#) «*Solar combi-systems*» du Programme *Solar Heating and Cooling* (SH&C) de l'AIE. La Tâche a démarré fin 1998 et l'année 1999 a été la première complète. La [Tâche 26](#) a pour objet d'aider les industriels à mettre sur le marché des systèmes combinés (eau chaude + chauffage) pour villas, standardisés et optimisés. But principal : réduction du coût du solaire et augmentation de la fiabilité des installations.

La [sous-tâche A](#) devait analyser l'ensemble des systèmes combinés disponibles dans les sept pays participant à la [Tâche 26](#), les classer pour permettre une comparaison et préparer une brochure de présentation comparative des systèmes actuels. Le travail est dirigé par le Büro n+1 de Berne. Le but assigné pour 1999 à la sous-tâche A a parfaitement été rempli. 21 systèmes génériques ont été identifiés, classifiés et décrits. Le document de synthèse est disponible depuis janvier 2000. Il propose un descriptif très complet des principaux systèmes combinés du marché, à l'usage des installateurs, des acheteurs, des ingénieurs et aussi des fabricants. Il est, à notre connaissance, le meilleur document de présentation de l'offre sur le marché [9].

Chaque système présenté dans le document «[Solar combisystems in Austria, Denmark, Finland, France, Germany, Sweden, Switzerland, the Netherlands and the USA — Overview 1999](#)» devrait être simulé en 2000 par TRNSYS dans des situations de référence communes, et les performances relatives des systèmes seront comparées selon une liste de critères préparés en 1999.

À l'[EIVD](#)-Yverdon, les travaux ont été organisés autour de la participation suisse au [projet AIE](#). L'EIVD étudie une installation solaire combinée de conception récente (système Arpège d'Agema). Un banc d'essai pour systèmes combinés a été monté avec pilotage par [LabView](#). Une installation Arpège complète a été mesurée au laboratoire dans des conditions totalement maîtrisées. Des améliorations ont été suggérées. L'étude du maintien de la stratification dans la cuve et de la régulation sont au centre du travail. But : augmenter la part solaire ! Un modèle TRNSYS a été développé, montrant que la part d'un système de 12 m<sup>2</sup> peut être entre 19 et 32% des besoins annuels. Un potentiel de gain par optimisation • but du projet AIE • est d'environ 5 points [4].

La mise au point d'un *kit* pour eau chaude solaire à prix raisonnable, avec cuve plastique munie d'une pipe de stratification et fonctionnant sans glycol, a été achevée en partenariat avec l'industrie qui devrait soumettre le *kit* au test du SPF pour sa commercialisation [4].

Le [projet de supervision automatique des installations](#), une collaboration entre l'Institut d'automatique de l'EPFL, l'EIVD-Yverdon et un industriel solaire, comporte des thèmes de recherche très novateurs et de haut niveau (appoint à volume variable, utilisation de prévisions météo disponibles via Internet, prévision de la demande par filtre de Kalman,...). La mise en place de la nouvelle commande implantée sur un PC sur un *kit* solaire modifié a été réalisée en 1999. Les mesures n'ont pu être faites, faute de temps [5].

Au SPF, les mesures de systèmes complets ont été poursuivies :

1. 5 systèmes *kits* pour eau chaude sanitaire ont été testés selon la procédure standard du SPF qui avait prévalu pour le concours des chauffe-eau solaires en 1997. Deux ont réussi le test et les résultats ont été [publiés](#). L'introduction sur le marché des *kits* est donc terminée [2].
2. La reprise du savoir-faire investi durant plus de 5 ans dans les SOLKIT a été organisée, suite à la faillite du fabricant, faillite principalement liée à ses activités de façades traditionnelles.
3. la définition de procédures de tests des systèmes combinés pour le [projet AIE](#) a été accomplie avec une participation remarquable du SPF. Les tests auront lieu en 2000.

Les travaux de construction prévus en 1999 pour la [mini-centrale](#) solaire pilote électro-thermo-solaire de

10 kWél SPS (*Solar Power System*) ont été achevés pour le 30 juin 1999. Le capteur à concentration a été mis en service en juillet 1999 et mesuré durant l'été : les résultats ont été mitigés. La tache focale est trop dispersée, suite à un problème de matériau support des miroirs, et le circuit capteur est trop inerte (montée en température en 2 heures). L'unité pilote de deux turbines étagées *Scroll* de 12 kWél a été testée au début de 1999 en laboratoire à satisfaction, et des améliorations ont été encore apportées (lubrification de chaque turbine), puis transportée sur le site du capteur pour un couplage durant l'été. Les deux cycles de *Rankine* superposés fonctionnent selon la prévision. Une unité de cogénération de 15 kWél (Totem) a été adjointe de manière à pouvoir sortir de la centrale une puissance électrique constante, même hors période de soleil. Cela est conceptuellement nécessaire pour permettre à de telles unités d'entrer dans les dispositifs de *dispatching* des électriciens. En pointe, SPS devrait avoir une efficacité solaire de 12% et une efficacité globale de 22% (Pélec. / (Psolaire + fuel)) pour un niveau maximum de température de 160 °C. Ces valeurs ont pu être vérifiées au banc.

Le couplage avec le capteur solaire n'a pu avoir lieu : le Totem n'a pas pu être fonctionnel et la ligne de capteur ne délivrait pas une puissance suffisante. Un rendement de pointe du capteur a tout de même été mesuré à 45%. Une deuxième ligne de capteurs modifiés devrait être réalisée en 2000, si le budget le permet. Une poursuite est malgré tout envisagée, compte tenu du potentiel du projet. Le budget de cet ambitieux projet est malheureusement trop restreint pour nous permettre d'avancer rapidement [8].

Dans l'étude *SOLCAD*, le *CREM* de Martigny s'est interrogé sur le meilleur modèle de pénétration des installations solaires le long d'un réseau de chauffage à distance existant. Les clients du CAD ont été sondés. Le *contracting* vert aurait un certain écho s'il était proposé par le distributeur de chaleur, même pour un prix du kWh solaire «un peu plus élevé». La balle est dans le camp du distributeur [10].

#### d) Installations

La cité solaire de *Plan-les-Ouates* comporte une toiture solaire intégrée de 1'400 m<sup>2</sup> d'absorbeurs sélectifs couplés à 100 m<sup>3</sup> de stock. Le suivi de la toiture solaire

est effectué par le CUEPE depuis juin 1997. Après deux années de mesure, le bilan final est le suivant :

- L'indice énergétique de l'ensemble est bon (261 MJ/ m<sup>2</sup>·an PCI), même s'il ne correspond pas au design (160 prévus). Les causes sont connues (difficulté de demander 20 °C aux locataires, récupération insuffisante sur la ventilation, problème de régulation trop sophistiquée, stockage solaire pas assez stratifiable).
- La toiture solaire a fourni 40 MJ/m<sup>2</sup> chauffés en saison 2 contre 50 en saison 1 (120 kWh/m<sup>2</sup> de toiture/an), du fait d'un problème de régulation et de l'hiver couvert ; en hiver une distribution en direct dans un chauffage de sol ou la dalle, sans stock intermédiaire, serait préférable pour une toiture solaire non vitrée.
- En été, la toiture est surdimensionnée (une température de 118 °C en stagnation est atteinte). Le branchement d'un nouveau bâtiment permettra de vendre des excédents. Le problème de l'absence de bonnes solutions pour le stockage saisonnier est une nouvelle fois mis en évidence.
- La cuve de stockage avec cuve sanitaire interne n'est pas adaptée aux capteurs non vitrés, car elle nécessite une sur-température pour l'eau sanitaire que la toiture peine à fournir en mi-saison [6].

Le rapport final est attendu pour 2000. Il sera une source précieuse d'information pour les concepteurs de future toiture solaire qui, dans l'ensemble, s'est bien comportée. Le système complet revêt cependant une importance décisive et il est recommandé de faire un modèle d'installation et des simulations avant de construire de grands ensembles complexes.

Le rapport final des mesures de deux immeubles solaires de *Sevelen* est disponible. Les mesures ont été fournies sur un CD ROM de telle sorte que les installations puissent être modélisées éventuellement dans le cadre du *projet* AIE. Sevelen 1 avec 112 m<sup>2</sup> et un stock de 227 l/m<sup>2</sup> a eu un taux de couverture solaire des besoins annuels chauffage + eau chaude de 59%, et Sevelen 2 avec 110 m<sup>2</sup> et 352 l/m<sup>2</sup> de 63% . Les deux maisons ont des surfaces au sol de 1'000 m<sup>2</sup>. Les surcoûts d'installation solaire ont été de 74'000 CHF environ et la production des capteurs de 276 kWh/m<sup>2</sup>·an et 345 kWh/m<sup>2</sup>·an [7].

## Coordination et collaboration nationale

Parmi les principales collaborations nationales de 1999, il faut relever :

- le *SPF*, comme chaque année et ceci demande un fort investissement de la part de la direction et de tous les collaborateurs du *SPF*, avec les fabricants de capteurs solaires, et avec *l'EMPA* ;
- *l'École d'Ingénieurs d'Yverdon*, avec *l'Institut d'Automatique de l'EPF-Lausanne*, et l'industriel

*AGENA* ;

- le Büro n+1 avec divers industriels solaires suisses, et notamment *SOLTOP AG* ;
- le *CREM* avec le CAD de Martigny.

Comme chaque l'année, le SPF a organisé de nombreuses visites de ses installations de Rapperswil.

Par ailleurs, nous avons suivi le projet *Neurobat II*, fi-

nancé par un autre programme OFEN, afin d'évaluer la possibilité d'utiliser les méthodes neuronales dans les installations solaires actives.

Nous devons réduire nos ambitions cependant, faute de moyens financiers.

La conférence CISBAT'99 a réuni en septembre 1999 à l'EPF Lausanne plus de 100 participants. Les participants au programme ont fait 5 communications de qualité et 3 démonstrations de logiciels.

## Coordination et collaboration internationale

En ce qui concerne le [programme](#) de l'AIE, deux axes de recherche sont actifs dans notre programme:

- Le SPF dans le futur projet «*Solar Façades*». En 1999, les bases d'un livre sur les matériaux en pratique solaire ont été jetées par le groupe de travail qui l'a préparé.
- Le SPF et l'EIVD dans le [projet](#) qui a débuté en fin 1998. Le Büro n+1 de Berne dirige la sous-tâche A de cette Tâche 26 et nos groupes de recherches sont fortement impliqués dans le travail commun. L'objectif est de concentrer des moyens de recherche pour améliorer les systèmes combinés pour villas. La collaboration entre les sept pays participants a été profitable en 1999. La Tâche est aussi liée à l'industrie solaire européenne et a organisé deux séminaires d'un jour, l'un au Danemark sur la stratification, et l'autre en Allemagne sur les nouvelles pompes «*low flow*». Nous

essayons de motiver l'industrie suisse à participer à ce genre de séminaire et aux projets AIE en général. L'entreprise SOLTOP AG a compris le bénéfice qu'elle pouvait en retirer. En Allemagne deux fabricants solaires (SOLVIS, Consolar) y participent. En Autriche, trois industriels ont compris leur avantage. En Suisse, trois industriels ont déclaré leur intérêt.

En 1999, le travail commun sur les méthodes de tests des stocks stratifiés entre le Danemark, les Pays-Bas et la Suisse s'est poursuivi sur une base allégée, les partenaires ayant été hésitants quant à leur possibilité de financement. Un rapport a été toutefois réalisé.

Les travaux du groupe international sur la concentration solaire «[Solar Paces](#)» sont en outre suivis pour mieux orienter notre projet SPS.

## Transferts à la pratique, Projets P+D

La recherche en solaire thermique est une recherche appliquée. Plus de 80% du budget est alloué à des projets qui visent à répondre à des besoins à court terme du marché: qualité, fiabilité des composants, performances des installations, standardisations.

En ce qui concerne le programme P+D, dirigé par le bureau PLANAIR, le nombre de demandes de soutien au titre de projets pilotes ont augmenté en 1999 (+70%) après une année 1998 faible. D'intéressantes réalisations en milieu locatif, social et hôtelier ont pu être soutenues, dont la moitié selon le principe du

*contracting*. En 1999, huit fiches de «bons exemples» ont été mises à dispositions sur Internet pour diffuser les connaissances acquises sur les [pilotes](#).

En 2000, l'effort de promotion des bonnes solutions pilotes sera poursuivi.

Selon les statistiques de la [SOFAS](#) 1998, le marché du solaire thermique progresse (31'775 m<sup>2</sup> de capteurs vitrés vendus en Suisse en 1998, contre 25'386 en 1997. 20'951 m<sup>2</sup> de non-vitrés en 1998, contre 15'486 en 1997).

## Évaluation 1999

Le programme 1999 est, dans l'ensemble, conforme à l'attente, notamment avec une organisation en trois pôles de compétence et autour du [projet](#) AIE comme axe structurant commun à deux groupes de recherche.

La mise en production de la nouvelle [couche sélective AS+](#) pour les toitures solaires n'a pu être faite (résistance insuffisante aux acides). Succès partiel, cette nouvelle couche équipe les capteurs vitrés munis de l'absorbeur en coussin.

Dans le projet SPS, nous attendions cependant un couplage du solaire avec les turbines et une production d'électricité. Cette attente n'a pas été satisfaite: le

projet est vraiment ambitieux et le développement du capteur a été plus laborieux que prévu.

Mais la source première des difficultés est le manque de moyens pour réaliser tous nos objectifs. Le budget 1999 a été diminué de 13% par rapport à 1998 et nous nous demandons comment faire une recherche diversifiée avec les moyens à disposition.

Dans l'ensemble, le transfert à la pratique des résultats de la recherche thermique à basse température est très satisfaisant, nos projets faisant appel à la participation d'industriels du solaire.

Le nombre d'installations innovantes mesurées a été fortement réduit depuis 1996 et nous devons nous concentrer sur des études de laboratoire. Cela est un effet

de la limitation des moyens financiers, mais aussi de notre volonté de standardisation des installations.

## Perspectives 2000

En 2000, nous devons revoir à la baisse nos objectifs faute de moyens financiers suffisants. Le projet SPS devrait malheureusement en souffrir, à moins qu'une solution de financement complémentaire par une autre source ne soit trouvée. Nous espérons cependant pouvoir observer en 2000 un kWh électrique produit par la centrale SPS à un coût potentiellement bien inférieur à celui du photovoltaïque.

Nous continuerons à concentrer nos moyens limités sur les deux centres de compétences que sont le SPF-Rapperswil et l'EIVD-Yverdon, avec des tests de composants, des tests de systèmes et la simulation en complément.

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

## Liste des projets de recherche

- [1] S. Kunz, J. Remund, METEOTEST, Bern: *METEONORM Version 4.0 Edition 2000*, (RF, Dez. 1999) et CD-ROM <http://www.meteotest.ch/>
- [2] U. Frei et al., SPF/HS-Rapperswil: *SPF Forschung 1997 – 2001 ♦ Teil A: Komponenten in solarthermischen Systemen (RA) ♦ Teil B: Thermische Solarsysteme (RA) ♦ Teil C: Materialien in thermischen Systemen (RA) ♦ Teil D: Informatik und Software (RA)* <http://www.solarenergy.ch/>  
<http://wire1.ises.org/wire/Publications/resoft.nsf/HTML/moreinfo>  
<http://www.infoenergie.ch/Bestell/Default.htm>
- [3] J.-P. Rossy, ÉNERGIE SOLAIRE, Sierre: *Absorber AS+ (C4-97) (RF)*
- [4] P. Dind, J. Bony, O. Renoult, EIVD, Yverdon: *Installations solaires combinées pour villas* (RF décembre 1999)
- [5] D. Gillet, T. Prud'homme, IA/EPF-Lausanne: *Supervision automatique de kits solaires de production d'eau chaude sanitaire (RA, RF)* décembre 1999) <http://iawww.epfl.ch/>
- [6] B. Lachal, CUEPE, Genève: *Toiture solaire de Plan-les-Ouates: mesures, bilan technico-économique et étude de son intégration architecturale (RA, RF)* à paraître en 2000)
- [7] L. Clavadetscher, TNC, Männedorf: *Messungen an zwei Solarhäusern in Sevelen* (RF Juni 1999)
- [8] M. Kane, F. Brand, D. Favrat, LENI/EPF-Lausanne, Y. Allani, COGENER, Lausanne: *SPS: mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kWél (RF)* décembre 1999) ♦ *Capteur CEP 3* (RF décembre 1999)
- [9] J.-M. Suter, Büro n+1, Berne: *IEA SH&C Task 26 Solarcombisystems – Leading of Subtask A (RA)*
- [10] C. Matas, K. Sinimalé, CREM, Martigny: *SOLCAD Modèle de pénétration de l'énergie solaire sur un réseau CAD. Test sur le cas de la commune de Martigny* (RF novembre 1999)  
(RA) [Rapport annuel disponible](#) (RF) Rapport final disponible

## Liste des projets P+D

- [11] PLANAIR, La Sagne: **Programme Solaire actif, Rapport annuel 1999**, OFEN  
Extrait de la liste de nouveaux projets en 1999 :
 

DISV 72540 Solar contracting Altersheim Aumatt, 4153 Reinach	40 m <sup>2</sup>
DISV 71040 Solare Vorwärmung für einen Industriebetrieb, 8105 Regensdorf	162 m <sup>2</sup>
DISV 72640 Hotel Edelweiss Engelberg AG, 6390 Engelberg	25 m <sup>2</sup>
DISV 72641 Contracting Solaire Immeuble Primeroche, 1008 Prilly	39 m <sup>2</sup>
DISV 72642 Contracting Solaire Immeuble Béthanie, 1000 Lausanne	100 m <sup>2</sup>
DISV 72906 Toiture Solaire pour piscine, 3775 La Lenk	492 m <sup>2</sup>

 Pour accéder aux fiches de bons exemples : [http://www.infoenergie.ch/P\\_D/F\\_Pberif.htm](http://www.infoenergie.ch/P_D/F_Pberif.htm)

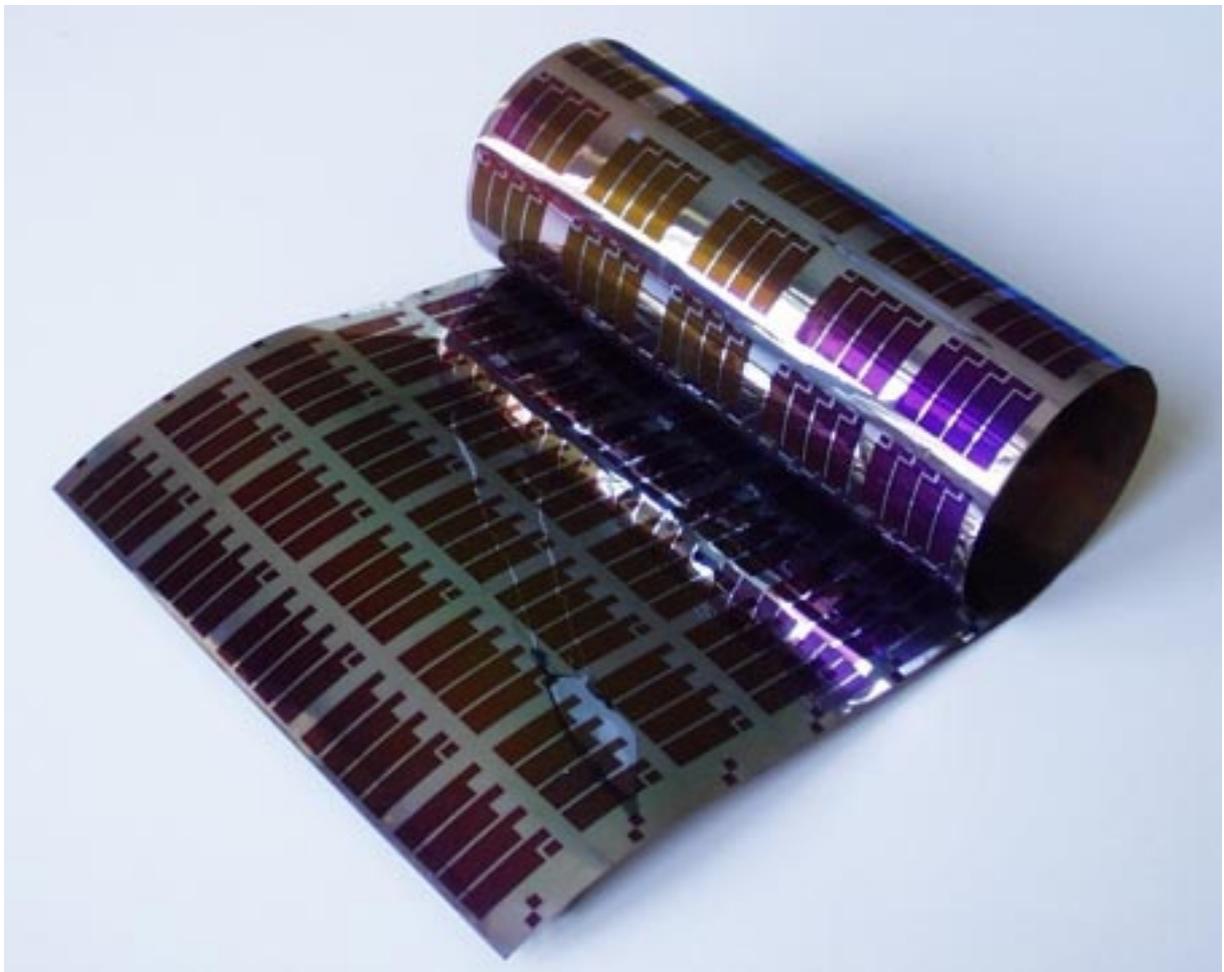
## PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Stefan Nowak**

[stefan.nowak.net@bluewin.ch](mailto:stefan.nowak.net@bluewin.ch)

---



### **Solarzellen auf Kunststoffsubstraten:**

Flexibilität des Substrates, Leistung/Gewicht und kontinuierliche *roll-to-roll* Prozesse eröffnen neue Möglichkeiten, von der Kleinanwendung über die Gebäudeintegration bis zur Anwendung im Weltraum. Am Universität Neuenburg und am ETH Zürich wird an diesen Konzepten gearbeitet (*Bild* ©IMT).

## Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1999

Das Jahr 1999 war für das Programm Photovoltaik durch die Steigerung anwendungsorientierter Projekte im nationalen Rahmen und eine vermehrte internationale Zusammenarbeit gekennzeichnet. Die Zusammenarbeit mit der Industrie konnte dabei weiter intensiviert werden, sowohl in der Schweiz wie international. Das Berichtsjahr umfasst mehr als 80 Forschungs- und P+D-Projekte. Damit konnte, sowohl in Anzahl wie in Bezug auf den Mitteleinsatz, eine weitere Steigerung erzielt werden.

Die 5 Programmbereiche gliedern sich in folgende Themen und Zielsetzungen auf:

**Zellen:** Dünnschicht-Zellen bilden weiterhin den Schwerpunkt, wobei sich die Arbeiten auf Solarzellen mit dem Grundmaterial **Silizium** konzentrieren. Die Untersuchungen zu weiteren Formen von Silizium (Bandsilizium, Nieder-Bandgap-Silizium) wurden intensiviert. Die im Rahmen von internationalen Projekten verfolgten Arbeiten zu anderen Materialtechnologien (insbesondere Verbindungshalbleiter, Farbstoffzellen) wurden im Berichtsjahr fortgesetzt. Dünnschichtzellen auf Kunststoffen erlangen vermehrte Beachtung, insbesondere für Weltraumanwendungen.

**Module und Gebäudeintegration:** Neue Produkte und Systeme für die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bilden nach wie vor einen wichtigen Schwerpunkt. Für den Flach- und Schrägdachbereich besteht mittlerweile eine ansprechende Vielfalt von Lösungen, welche laufend ergänzt wird. Neue Projekte

suchen nach weiteren, bisher nicht vorhandenen Anwendungen an der Fassade wie im Dachbereich.

**Systemtechnik:** Während sich auf der Produktebene eine gewisse Sättigung manifestiert, kommt der **Qualitätsprüfung** der verschiedenen Komponenten eine wachsende Bedeutung zu. Gleichzeitig werden aufgrund der zahlreichen Anlagen neue Trends aus technischer Sicht erkennbar. Die Annäherung an die Haustechnik stellt dabei nur eine der beobachteten Tendenzen dar.

**Diverse Projekte und Studien:** In diesen Bereich fallen Arbeiten zur längerfristigen Abschätzung wichtiger Indikatoren der Photovoltaik. **Kombinierte Nutzungsformen** der Photovoltaik werden verstärkt untersucht (z.B. Hybridtechnologien, Thermophotovoltaik). Fortgeschrittene, benutzerfreundliche und präzise **Hilfsmittel** liegen inzwischen in umfassender Art vor und erlauben eine bessere Planung der Anlagen.

**Internationale Zusammenarbeit:** Die internationale Zusammenarbeit bildet ein zentrales Standbein der Arbeiten und wird in allen Bereichen verfolgt. 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.

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### ZELL-TECHNOLOGIE

Eine weitere Phase des Projekts **Mikromorphe Solarzellen** [1a] am IMT konnte im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Für das mikrokristalline Silizium wurden sowohl die p-i-n- wie die umgekehrte n-i-p-Schichtabfolge vorangetrieben. Die für den Lichteinfang durch Texturierung bedeutenden transparenten Oxidschichten (TCO) auf der Basis von ZnO erreichten im Vergleich zu kommerziellen Herstellern sehr gute Eigenschaften. Mit dem besten Wirkungsgrad der mikromorphen p-i-n-p-i-n-Zelle von 11.6% wurde das Gesamtziel von 12% annähernd erreicht. Es wurden erste, laserstrukturierte Minimodule ( $23.5 \text{ cm}^2$ ) von mikromorphen Zellen mit einem Wirkungsgrad von 9.2% hergestellt. Im ergänzenden EU-Projekt NEST [1b] wurden für mikromorphe Zellen umgekehrte Schichtabfolgen (n-i-p-n-i-p) untersucht. Das PSEL-Projekt zur Abscheidung von **amorphen Zellen auf Kunststoff-Substraten** (Polyimid) [1c] wurde mit der Demonstration von Kleinmodulen und einem Prototypen für ein Fassadenelement durch SCHWEIZER abgeschlossen. Im neuen Projekt SOLANT mit Unterstützung der ESA wurde die Integration von **Satellitenantennen** und Solarzellen in ein Element untersucht [1d]. Auf Polyimid können auf diese Art interessante, auf das Gewicht be-

zogene Leistungsmerkmale von 430 W/kg erzielt werden, was bereits höher ist als die heute verwendeten Technologien. Für elektronische Kleinanwendungen, insbesondere Uhren, wurde im EUREKA-Projekt SOLINOX der Prozess für grossflächige ( $30 \times 30 \text{ cm}^2$ ), monolithische amorphe Solarzellen auf Stahl entwickelt [1e]. An der japanischen PVSEC-11-Konferenz wurden die Arbeiten des IMT mit dem Preis "*best paper for its outstanding contribution to the progress in photovoltaic science and engineering*" ausgezeichnet.

Am CRPP an der EPFL wurde das Projekt zur grossflächigen Abscheidung von mikrokristallinem Silizium und zur **Erhöhung der Depositionsraten** [2] im Berichtsjahr abgeschlossen. Es wurden zwei Alternativen zur Deposition von mikrokristallinem Silizium untersucht: Variation der Plasmachemie durch  $\text{SiF}_4$  anstelle von Silan ( $\text{SiH}_4$ ) und die schnelle Deposition (bis  $100 \text{ \AA/s}$ ) in einem DC-Bogen. Die Arbeiten werden in einem neuen KTI-Projekt zusammen mit BALZERS und IMT fortgesetzt.

Am PSI wurde in Zusammenarbeit mit der Firma EVERGREEN (USA) das Projekt zur Übertragbarkeit der PSI-Prozesse für dünne hocheffiziente Siliziumzellen auf **Bandsilizium** [3a] abgeschlossen. Durch die

Kombination von Wasserstoff-Passivierung mit dem Gettern von Verunreinigungen konnte auf 200µm dicken polykristallinen Siliziumbändern ein Wirkungsgrad von 15.2% erzielt werden. Im EU-Projekt **CRYSTAL** [3c] wurden am PSI weitere Depositionsmethoden für mikrokristallines Silizium sowie der Lichteinfall durch Substratstrukturierung und TCO-Schichten untersucht. In einem neuen Projekt [3b] wird die Entwicklung von **Nieder-Bandgap-Zellen** auf der Basis von Germanium für die Anwendung der Thermophotovoltaik untersucht.

Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern werden in mehreren EU-Projekten an der ETHZ untersucht: Im Projekt **LACTEL** [4a] werden strukturelle und elektronische Eigenschaften der durch Elektrodeposition und Vakuumverdampfung hergestellten CdTe-Schichten bestimmt. Im neuen Projekt **CADBACK** [4c] geht es um die Optimierung des Rückkontakts und die Stabilität von CdTe-Zellen. Im Projekt **WIDE GAP CPV** [4b] werden grundlegende Untersuchungen an Cu(In,Ga)<sub>x</sub>Se<sub>2</sub>-Schichten weitergeführt. Im neuen Projekt **FLEXIS** [4d] werden unter Benützung eines Zwischen-Prozesses auf Glas CIGS-Zellen auf Polyimid abgeschieden. Dabei konnte bisher ein guter Wirkungsgrad von 12.8% erreicht werden.

Farbstoffsensibilisierte **nanokristalline Solarzellen** (GRÄTZEL-Zellen) bilden eine weitere, vieldiskutierte Materialvariante, welche zum Teil im Rahmen von EU-Projekten verfolgt werden. Im Projekt am ICP der EPFL [5a] geht es weiterhin um **grundlegende Arbeiten** zur Weiterentwicklung dieses Konzepts, insbesondere den Einsatz von festen Elektrolyten und neuen Farbstoffen. In einem neuen PSEL-Projekt [5b] werden Freiluftmessungen an Farbstoffzellen auf dem Mont-Soleil durchgeführt. Bei LECLANCHÉ wurde das EU-Projekt **Indoor dye PV's** [6] für neue Anwendungen für den Innenraum abgeschlossen. Der grundlegenden Frage nach der **Langzeit-Stabilität** [7] dieser Zelle wird in einem neuen Projekt bei SOLARONIX nachgegangen.

Das neue Konzept von **Antennen Solarzellen** [8] unter Verwendung von farbstoffbeladenen Zeolith-Kristallen wurde an der Uni-Bern im Rahmen des Programms Solarchemie sowie mit Unterstützung des schweizerischen Nationalfonds weiterverfolgt. Der entsprechende grundlegende Nachweis der Antennenfunktion konnte erbracht werden, was längerfristig zu neuen Solarzellenkonzepten führen kann.

## **SOLARMODULE & GEBÄUDEINTEGRATION** (siehe auch P+D)

Das Projekt betreffend neue Systeme für das **Flachdach** [9a] wurde am LESO an der EPFL mit dem Schlussbericht abgeschlossen [29]. Aus dem Projekt resultierten, in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern, eine Reihe von interessanten Integrationslösungen (Sofrel®, Solbac®, Solgreen®, Solmax®) für das Flachdach.

Am Projekt **DEMOSITE** [9b] wurden ältere Photovoltaik-Integrationslösungen entfernt und durch neue, aktuellere Systeme ersetzt. Insgesamt wurden über die Projektlaufzeit 24 Integrationsbeispiele für Flachdä-

cher, Schrägdächer und Fassaden einander gegenübergestellt; davon sind heute noch 21 Lösungen installiert. Die Informationsaktivitäten dieses im IEA PVPS Programm, Task 7, eingebetteten Projekts wurden für verschiedene Zielgruppen intensiviert und mit einer attraktiven [website](#) versehen.

Ein neues EU-Projekt am LESO, **PV en face !**, befasst sich mit der Entwicklung von neuen Lösungen zur Fassadenintegration der Photovoltaik [9d]. Im Berichtsjahr wurden zu diesem Zweck grundsätzliche Marktabklärungen und erste Designüberlegungen gemacht. Nebst den Möglichkeiten zur Kostenreduktion wird auch die elektrische Verbindungstechnik optimiert.

## **SYSTEMTECHNIK**

Am LEEE-TISO an der SUPSI wurde die **Prüfung von PV-Modulen** [10] unter realen Bedingungen fortgesetzt und die entsprechende Projektphase abgeschlossen. Insgesamt wurden in dieser Projektphase 18 kommerzielle Modultypen, welche die wichtigsten Hersteller umfassen, geprüft. Die ausführliche Datenbank [30] mit allen wichtigen Spezifikationen von PV-Modulen umfasst mittlerweile 850 Modultypen. Die Langzeitmessungen an den zwei hauseigenen PV-Anlagen (10 kWp m-Si, 4 kWp a-Si) wurden fortgesetzt, zeigten gute Produktionswerte und stellen aufgrund der langen und ununterbrochenen Beobachtungszeit einmalige Erfahrungen dar, welche in einem neuen Projekt in Zusammenarbeit mit der ESTI in Ispra vertieft werden.

Die dazu ergänzenden Messungen an **Modulen und Prototypen** wurden an der Berner Fachhochschule in Saint-Imier unter Mitwirkung der Gesellschaft Mont-Soleil abgeschlossen [11]. Die spezifische Energieproduktion unterschiedlicher Modultechnologien kann verglichen werden. Ausserdem wurden sechs verschiedene Modul- bzw. Strangwechselrichter miteinander verglichen.

Ausführliche Untersuchungen zur **Energieproduktion von PV-Modulen** [3d] werden auch am PSI durchgeführt. Mit der zur Verfügung stehenden experimentellen Einrichtung und den analytischen Methoden sind Aussagen über das Teillastverhalten möglich.

Die **Prüfung von PV-Wechselrichtern** [12a] wird an der HTA Burgdorf fortgesetzt und umfasst nun routinemässig sowohl marktgängige Netzverbund- wie Inselwechselrichter. Aufgrund des anhaltenden Marktwachstums konnte eine Produktverbesserung festgestellt werden, insbesondere auch des Wirkungsgrads. Ein neuer Solargenerator-Simulator mit einer Leistung von bis zu 5 kW wurde im Eigenbau erstellt und sollte die Prüfmessungen erleichtern. Mit der Unterstützung des PSEL wurde das Projekt zum **Langzeitverhalten von PV-Anlagen** [12b] an 36 Anlagen vorderhand abgeschlossen. Hohe Betriebsspannungen der PV-Anlagen wirken sich aufgrund dieser Untersuchungen generell günstig auf den Energieertrag aus. Im EU-Projekt **PV-EMI** [12c] werden EMV-Messungen an PV-Anlagen durchgeführt mit dem Ziel, entsprechende europäische Standards auszuarbeiten.

Ein weiteres EU-Projekt, SCMIC, zur Entwicklung eines **Einzellen-Wechselrichters** [13a] wurde an der ETHZ

in Zusammenarbeit mit ENECOLO und ALUSUISSE abgeschlossen. Es konnte eine neue Schaltung entwickelt werden, welche die Konvertierung zweistufig (DC/DC und DC/AC) realisiert und Umwandlungswirkungsgrade bis zu 97% erreicht. Die entwickelte Lösung öffnet bei der Konfektionierung von amorphen Solarmodulen ein Kostenreduktionspotenzial von bis zu einem Drittel.

ALPHA REAL konnte zwei EU-Projekte zu systembezogenen Fragestellungen weitgehend abschliessen. Im Projekt PV-Checker werden einfache Lösungen zur **Überwachung von PV-Anlagen** geprüft [14a]. Im Projekt ARIA zur **Zuverlässigkeit von AC-Modulen** [14b] wurde die Funktionsweise eines *Hot Spot* Detektors durch Strombegrenzung geprüft. Die Arbeiten zur **Zuverlässigkeit von Sicherheitsschaltungen** gegen die Inselbildung [14c] wurde in einem vom PSEL mitfinanzierten Projekt abgeschlossen.

Insgesamt kann man zur Systemtechnik sagen, dass trotz des fortgeschrittenen Entwicklungsstands der Photovoltaik weitere Verbesserungen bezüglich Produktgarantien, Zuverlässigkeit der Komponenten, Vereinfachung der Systeme, Sicherheit und Standardisierung möglich und notwendig sind. National wie international werden daraus entsprechende Normen entwickelt, welche die Zuverlässigkeit von PV-Anlagen langfristig positiv beeinflussen sollten.

## DIVERSE PROJEKTE UND STUDIEN

Die Arbeiten zur kombinierten Nutzung von Photovoltaik mit anderen Energietechnologien gewinnen zunehmend an Interesse, insbesondere in Kombination mit der thermischen Solarenergie. Am LESO der EPFL wurde, in Zusammenarbeit mit ENECOLO und SCHWEIZER, das Projekt zu einem neuen **Hybrid-Kollektor** [9c] weitgehend abgeschlossen. Dabei konnten wesentliche Materialeigenschaften des amorphen Siliziums in Bezug auf die thermische Absorption und das Verhalten bei hohen Stagnationstemperaturen bestimmt werden.

TNC konnte die Arbeiten des EU-Projekts zum **Potenzial der Photovoltaik auf Lärmschutzwänden** [15a] entlang von Strassen und Schienen in 6 Ländern Europas abschliessen. Das technische Potenzial wird in der Studie zu 584 MWp entlang von Strassen und 217 MWp entlang der Eisenbahn ermittelt. Als kurzfristig realisierbar gelten in Deutschland, Holland und der Schweiz 140 MWp (Strassen) und 145 MWp (Eisenbahn).

In zwei weiteren EU-Projekten werden unter dem Einsatz von Satelliten-Fernerkundung neue Instrumente zur Solarenergienutzung entwickelt. Im Projekt **PVSAT** [13b] beteiligt sich ENECOLO an der Nutzung von lokalen Strahlungsdaten aus Satellitenbildern zur Bestimmung der zu erwartenden Energieerträge aus PV-Anlagen. Im Vordergrund stehen im Berichtsjahr die Auswertung der Satellitenbilder, das Simulationsprogramm und das Erstellen einer Projektdatenbank. Im Projekt **SATELLIGHT** [16] wurde unter Mitwirkung der Uni-Genf ein [Strahlungsatlas](#) auf Internet erarbeitet, welcher die zeitlichen Veränderungen von Strah-

lung, Beleuchtungsstärke und -richtung *online* wiedergibt.

## INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT IEA, IEC, PV-GAP

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA bildete auch im Berichtsjahr eine kontinuierliche Aktivität. Im Berichtsjahr wurden zwei neue Projekte und verschiedene neue Arbeitspläne bewilligt. Eine wichtige Aktivität war zudem die Kommunikationsstrategie des Programms.

Die Schweizer Vertretung in im IEA-Projekt betreffend **Informationsaktivitäten** wird durch NOVAENERGIE [17] wahrgenommen. Im Berichtsjahr wurde ein Bericht zur Anwendung der Photovoltaik in kalten Klimazonen fertiggestellt [31] und eine 4. Ausgabe zur Marktentwicklung erstellt [32]. Der *PVPS-Newsletter* [33] wird an ca. 250 Adressaten in der Schweiz verteilt und steht allen Interessenten offen. Ein nationaler Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 1998 wurde im Rahmen diesen Projekt erstellt [34].

Das IEA-Projekt **Betriebserfahrungen** [15b] wurde durch TNC sichergestellt. Das Projekt wurde im Berichtsjahr mit einem neuen Arbeitsplan um 5 Jahre verlängert. Die Datenbank enthält nun 263 Anlagen aus 8 Ländern. Ein *Monitoring-Handbuch* wurde fertiggestellt und ein Evaluationsbericht erstellt [35, 36].

Neu wird die Schweiz im IEA-Projekt zu **Inselanlagen** [18] durch DYNATEX vertreten. Es wurden Publikationen und eine CD-ROM fertiggestellt [37-40]. Das Projekt wird mit einem neuen Arbeitsplan fortgesetzt und konzentriert sich in Zukunft auf die technischen Belange von Inselanlagen, insbesondere auf die Qualitätssicherung.

Neu wird die Schweiz im IEA-Projekt zur **PV-Netzkopplung** [19] durch das EWZ vertreten. In der Berichtsperiode wurden Berichte über die nationalen Richtlinien zur Netzankopplung sowie eine nützliche Übersicht über EVU-Aspekte von netzgekoppelten PV-Anlagen [41-42] publiziert.

Das Projekt **Integration der Photovoltaik in den bebauten Raum** [13a] wird von ENECOLO betreut. Das Projekt **DEMOSITE** [9b] an der EPFL ist ebenfalls in dieses Projekt eingebettet. Die Simulationssoftware PVSYSY wurde mit Hilfe von Task 7 Experten von der Uni-Genf und dem LESO mit einer neuen Benützeroberfläche versehen und anschliessend verteilt. Als Höhepunkt aus Schweizer Sicht wurde im Februar zum Thema der technischen Integrationslösungen ein gut besuchter Workshop an der EPFL durchgeführt [43].

MINDER ENERGY CONSULTING hat die Beteiligung an den Vorbereitungsarbeiten für ein neues IEA-PVPS-Projekt, welches sich mit der **Machbarkeit von sehr grossen PV-Kraftwerken** [20] in Wüstengebieten abgeschlossen.

Mit Unterstützung des Staatssekretariats für Wirtschaft (SECO) hat ENTEC die Schweizer Vertretung im neuen Projekt zur **Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit** (PV-EZA) [21] übernommen. Damit soll in der

Schweiz in diesem Bereich ein verstärkter Akzent, eine bessere Information und ein koordiniertes Vorgehen etabliert werden. Ziel ist dabei ebenfalls eine stärkere Tätigkeit der Schweiz in der PV-EZA.

ALPHA REAL leitet die Arbeitsgruppe der IEC, welche internationale **Normenvorschläge** [14d] für die

Photovoltaik vorbereitet. Sie beteiligt sich auch an den Arbeiten zu **PV-GAP (Global Approval Program)** [14e] zur Qualitätssicherung und -zertifizierung im Bereich von PV-Systemen. Im Berichtsjahr fand dazu mit Unterstützung des EDA eine internationale Konferenz in Genf statt.

## Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit auf nationaler Ebene hat mittlerweile eine ausgeprägte Tradition und umfasst alle wichtigen Akteure: die Hochschulen und Forschungsinstitute (ETH, Universitäten, Fachhochschulen, PSI), die Privatwirtschaft (Industrie, Ingenieurunternehmungen), die Elektrizitätswirtschaft (VSE, einzelne EW's) und die Fachverbände (Swissolar, SOFAS, PROMES). Aus diesen und weiteren Kreisen (Finanzwelt, Politik, Medien) kann ein zunehmendes Interesse an der Photo-

voltaik festgestellt werden.

Auf Programmebene wird die Zusammenarbeit zu zahlreichen Amtsstellen des Bundes (z.B. BBW, BBT, BUWAL, SECO, usw.) und der Kantone weiter ausgebaut. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die inskünftig stärkere Rolle der KTI für produktenahe Entwicklung sowie das SECO, die DEZA und das BUWAL für die Entwicklungszusammenarbeit.

## Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit, welche im Programm Photovoltaik für alle Bereiche etabliert wurde, konnte im Berichtsjahr weiter gesteigert werden. Die Schweizer Photovoltaik beteiligt sich mit Unterstützung durch das BBW weiterhin erfolgreich an den internationalen Forschungsprogrammen der EU. Im Jahr 1999 waren es insgesamt 21 Photovoltaik-Projekte im Programm Joule-Thermie. Weitere Projekte umfassen

je ein Projekt in den Programmen ALTENER, ESA und EUREKA. Aufgrund der Ausschreibungen 1999 im 5. Rahmenforschungsprogramm der EU sind weitere Projekte in Vorbereitung. Parallel zu den Projekten im Programm der EU wurde die Zusammenarbeit innerhalb des IEA-PVPS-Programms ebenfalls mit Erfolg weitergeführt (siehe oben).

## P+D-Projekte

Im Jahr 1999 wurden im P+D Programm 11 neue Projekte angefangen. Schwerpunkt bildete mit 8 neuen Projekten der Sektor **PV P+D-Anlagen**, wobei dort hauptsächlich Projekte in den Bereichen **PV-Gebäudeintegration** und kostengünstige Systeme in Angriff genommen wurden. Neu aufgegriffen wurde die Integration eines standardisierten, offenen Feldbussystems in PV-Wechselrichter als Kommunikationsplattform. Insgesamt waren im Berichtsjahr 41 Photovoltaik P+D Projekte aktiv. Im Vergleich zum vorderen Jahr bleiben die Schwerpunkte

- **PV P+D-Anlagen** (20 Projekte),
- **Entwicklung** neuer PV-Systemkomponenten (8 Projekte),
- **Erfolgskontrolle** bestehender P+D-Anlagen durch detaillierte Messkampagnen (5 Projekte)

grundsätzlich bestehen. Ermutigend ist die Tatsache, dass sich auch dieses Jahr wieder ein erheblicher Anteil der Projekte mit der Thematik **kostengünstige** Lösungen für die Realisierung von PV-Anlagen auseinandersetzt. Dabei ist die Entwicklung eines Integrationsrahmens für die Dachintegration von PV-Standardmodulen ein

weiterer Schritt Richtung Senkung der Kosten. Erwähnenswert ist die Tatsache, dass sich verschiedene, im P+D Bereich entwickelte kostengünstige Lösungen als Standardprodukte in grösserem Umfang etabliert haben oder sich zu etablieren beginnen.

Stellvertretend für die Pilot- und Demonstrationsaktivitäten sind im Folgenden einige der 1999 aktiven Projekte aus dem Segment **PV-Gebäudeintegration** aufgeführt:

- 6,3 kWp Anlage mit amorphen Zellen integriert ins Dach des IMT in Neuenburg [22]
- 16,3 kWp Dachintegration mit PV Wechselstrom-Modulen in Iffwil (Leitung: ATLANTIS ENERGIE) [23a]
- Autonome 3 kWp Dachintegration mit Sunslates Solarschiefern in Soyhières (Leitung: ATLANTIS SOLAR) [23b]
- 4,8 kWp Dachintegration von Standardmodulen mittels SOLRIF-Rahmen (Leitung: ENECOLO) [24a]
- PV-Flachdachanlage mit SCIBEL Modulen (Leitung: ENECOLO) [24b]

- 11,8 kWp Anlage mit PV Wechselstrom-Modulen auf dem Flachdach der UBS-Zürich (Leitung: ALPHA REAL) [25]
- 10 kWp Gründachintegration mit System Solgreen in Chur (Leitung: Ars Solaris Hächler) [26]
- Eine neue 10 kWp Anlage mit neuem Konzept zur PV-Schallschutzintegration (Leitung: TNC) [27a]
- Multifunktionale Gebäudehülle: Wetterschutz, PV- und Luftkollektor (Leitung: S. Kropf) [28]
- PV-Isolierglas- und Beschattungsanlage Kantonschule Stadelhofen (Leitung: TNC) [27b]

## Transfer in die Praxis

Das wachsende Interesse verschiedener Kreise führte im Berichtsjahr zur Fortsetzung sowie zu neuen und konkreten Projekten in Zusammenarbeit mit der Industrie. Damit kann der Transfer in die Praxis mit erfolgversprechenden Ansätzen fortgesetzt werden. Als treibende Kräfte können die marktbezogenen Rahmenbedingungen in der Schweiz (Förderung des Bundes, Solarstrombörsen), das wachsende Interesse in der Industrie und Finanzkreisen sowie die internationale Marktsituation angeführt werden. Kritisch muss dazu erwähnt

werden, dass die Kontinuität seitens des Markts aufgrund der beschränkten Bundesmittel für die Förderung nicht anhaltend gegeben ist und dass die Solarstrombörsen durch den ausgeübten Preisdruck die technische Innovation behindern können. Aus diesem Grund sind die P+D-Aktivitäten ein wichtiges Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Markterprobung, welches aufgrund des wachsenden Markts eine zunehmende Bedeutung erlangt.

## Bewertung 1999 und Ausblick für 2000

Das Jahr 1999 kann als insgesamt weitgehend positiv beurteilt werden. Ähnlich wie im Vorjahr haben dazu die erfolgreiche Beteiligung an internationalen Programmen der EU, das wachsende Interesse der Industrie und die durch Kombination von Förderung und Solarstrombörsen erfolgte Marktentwicklung beigetragen. Zahlreiche technologische Impulse fanden in der Folge statt. Die internationale Marktentwicklung und bedeutende Förderprogramme in einzelnen Ländern schaffen die bisher günstigsten Rahmenbedingungen für die Photovoltaik, welche sich mittelfristig auch auf die Schweiz positiv auswirken können. Die Photovoltaik tritt damit in eine kritische Phase, wo die Umsetzung in eine industrielle Energietechnologie erkennbar wird. Professionelle Strukturen, Qualitätssicherung, Kontinuität und realistische Einschätzungen der kurz- und mittelfristigen Möglichkeiten und Grenzen sind in diesem Umfeld von besonderer Bedeutung.

Die gesetzlichen und verwaltungsbezogenen Änderungen in der Schweiz haben 1999 für einige Unsicherheiten gesorgt; während im technologischen Bereich dazu mittlerweile wieder Klarheit besteht, lassen die gegenwärtige energiepolitische Diskussion und mögliche wichtige Weichenstellungen diese Situation auch für das Jahr 2000 anhalten. Stand und Aussichten der Photovoltaik waren im Berichtsjahr verschiedentlich Gegenstand der Diskussion [44]. In Zürich fand zu diesen Aspekten eine erneute und gut besuchte Nationale PV-Tagung statt, welche Gelegenheit zu einem ausführlichen Informationsaustausch bot [45].

Das Jahr 2000 wird deshalb aus Sicht der Schweiz für die Photovoltaik wichtige Entscheidungen mit sich bringen. Unabhängig davon gilt es aber gleichzeitig, den internationalen Rahmen zu beachten und die für ein nachhaltiges Marktwachstum notwendigen Strukturen und Massnahmen sicherzustellen.

## Liste der Projekte

- [1] A. Shah, [IMT/UNI-Neuchâtel](#): *a) Mikromorphe Solarzellen* (JB+SB) ENET 9659014 • *b) NEST (New enhanced silicon thin-film solar cells)* (JB+SB) • *c) Amorphe Siliziumzellen auf Plastiksubstrat* (JB+SB) • *d) Integration of Antennas with Solar Cells (SOLANT)* (JB) • *e) SOLINOX* (JB+SB) / Ch. Hollenstein, CRPP/EPF-Lausanne: *Erhöhung der Abscheideraten von mikrokristallinen und amorphen Siliziumdünnschichten für photovoltaische Anwendungen* (JB+SB) / ENET 9763180
- [2] J. Gobrecht, [PSI-Villigen](#): *a) Swiss high efficient cristalline solar cell project, using PSI process for sheet ribbon Si material* (JB+SB) / ENET 9763179 • *b) Entwicklung von low-badgap photovoltaischen Zellen* (JB) / ENET 9868060 • c) D. Grützmacher: *CRYSTAL (Crystalline silicon thin film solar cells on low temperature substrates)* (JB) • d) W. Durisch: *Charakterisierung von PV-Generatoren* /
- [3] H. Zogg, [IQE/ETH-Zürich](#): *a) LACTEL (Large area cadmium telluride electrodeposition for thin-film solar cells)* (JB) • *b) WIDE GAP CPV (Wide gap chalcopyrites for advanced PV devices)* (JB) • c) A.N. Tiwari: *CADBACK (The CdTe thin film solar – cell improved back contact)* (JB) • *d) FLEXIS (CIS thin film solar cells on flexible substrates)* (JB)

- [4] M. Grätzel, [ICP2](#)/EPF-Lausanne: *a) Cellules solaires basées sur des films semiconducteurs nanocristallins colorés* (JB) • *b) Freiluft – Messungen von Solarzellen neuer Technologie* (JB) / <http://dcwww.epfl.ch/icp/ICP-2/icp-2.html>
- [5] M. Wolf, LECLANCHÉ, Yverdon: *INDOOR DYE PV's* (JB+SB)
- [6] T. Meyer, [SOLARONIX](#), Aubonne: *LOTS-DSC (Longterm stability of dye-sensitized solar cells for large area power applications)* (JB) /
- [7] G. Calzaferri, [UNI-Bern](#): *Photochemical and photoelectrochemical transformation and storage of solar energy*
- [8] J.-B. Gay, [LESO](#) / EPF-Lausanne: *a) Photovoltaïque sur toits plats – une nouvelle approche* (JB+SB) / ENET 9554392 • *b) Ch. Roecker: DEMOSITE and DEMOSITE FLAT ROOFS – Phase III* (JB+SB) / ENET 9759873 • *c) Capteur hybride d'une nouvelle génération* (JB) / ENET 9866402 • *d) PV en face* (JB)
- [9] G. Travaglini, [LEEE](#)/SUPSI – DCT, Canobbio: *Testi di componenti e sistemi per progetti nel campo della tecnica fotovoltaica, TISO – periodo V* (JB+SB) / ENET 9760154
- [10] C. Brielmann, [EISI](#), St-Imier: *Programme de recherche sur des nouvelles technologies PV et sur la centrale de Mont-Soleil* (JB) / ENET 9560314
- [11] H. Häberlin, [HTA-Burgdorf](#): *a) Qualitätssicherung von PV-Anlagen* (JB) / ENET 9761703 • *b) Langzeitverhalten von netzgekoppelten PV-Anlagen* (JB+SB) / ENET 9659074 • *c) PV-EMI (Development of standard test procedures for electromagnetic interference (EMI) tests and evaluations on PV components and plants)* (JB)
- [12] P. Toggweiler, ENECOLO, Mönchaltorf: *a) SCMIC (Single Cell Module Integrated Converter System)* (JB+SB) • *b) PVSAT: Remote performance check for grid connected PV systems using satellite data* (JB) • *c) Schweizer Beitrag IEA PVPS Task V und VII* (JB) / ENET 9760155 / <http://www.solarstrom.ch>
- [13] M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *a) PV Checker: Research on low cost PV system checker devices for future application in the individual PV system monitoring* (JB) • *b) Accelerated reliability improvement of AC-Modules* (JB) • *c) Zuverlässigkeit von Sicherheitsschaltungen gegen Inselbildung* (JB+SB) • *d) IEC TC 82* (JB) • *e) PV GAP* (JB)
- [14] Th. Nordmann, [TNC](#), Männedorf: *a) EU PVNB POT (Evaluation of the potential of PV noise barrier technology for the electric production and market share)* (JB+SB) • *b) L. Clavadetscher: Schweizer Beitrag IEA PVPS Task II* (JB) / ENET 9554338
- [15] P. Ineichen, [GAP](#)/UNI-Genève: *SATELLIGHT* (JB+SB)
- [16] P. Hüssler, [Nova Energie](#), Aarau: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task I* (JB) / ENET 9863760 /
- [17] M. Viloz, DYNATEX, Colombier: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task III* (JB) / ENET 9975310 /
- [18] S. Taiana, [EWZ](#), Zürich: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task V* (JB) /
- [19] R. Minder, [Minder Energy](#), Oberlunkhofen: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task VIII* (JB+SB) / ENET 9873001 /
- [20] A. Arter, [ENTECH](#), St. Gallen: *Schweizer Beitrag IEA PVPS Task IX*
- (JB) Jahresbericht 1999 vorhanden  
(SB) Schlussbericht vorhanden

## P+D-Projekte (Auswahl)

- [21] R. Tschärner, IMT/UNI-Neuchâtel: *Dachintegration mit amorphen Zellen* (JB)
- [22] B. Stucki, ATLANTIS ENERGIE, Bern: *a) Dachintegration mit PV-Wechselstrom-Modulen* (JB) • *b) B. Bezençon: Autonome 3 kWp Dachintegration* (JB)
- [23] P. Toggweiler, ENECOLO, Mönchaltorf: *a) 4,8 kWp P+D-Anlage SOLRIF, Lindenmatt* (JB) • *b) PV-Flachdachanlage mit SCIBEL Modulen* (JB + SB)
- [24] M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *11,8 kWp Anlage mit PV Wechselstrom-Modulen* (JB + SB)
- [25] R. HÄCHLER, Chur: *10 kWp Gründachintegration Solgreen* (JB)
- [26] Th. Nordmann, TNC, Horgen: *a) 3 x 10 kWp Schallschutzanlagen* (JB) • *b) PV-Anlagen Kantonsschule Stadelhofen*
- [27] S. KROPF, Ebikon: *Multifunktionale Gebäudehülle: Wetterschutz, PV- und Luftkollektor* (JB + SB)

## Referenzen

- [29] *Photovoltaïque sur toits plats, zu beziehen bei LESO-EPFL, 1015 Lausanne*
- [30] *DB TISO, LEEE, SUPSI, zu beziehen beim TISO-LEEE, SUPSI, 6952 Canobbio,*
- [31] *Photovoltaics in Cold Climates, IEA PVPS Task I, 1999*
- [32] *Trends in Photovoltaic Applications in Selected IEA Countries between 1992 and 1998, IEA PVPS Task I – 07, 1999*
- [33] *IEA PVPS Newsletter, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau*
- [34] *Swiss national report on PV power applications 1998, P. Hüsser, Nova Energie, 1999*
- [35] *Measuring and Monitoring Approaches, IEA PVPS Task II, 1998*
- [36] *Analysis of Photovoltaic Systems, IEA PVPS Task II, 1999*
- [37] *Stand alone PV applications – Lessons learned, IEA PVPS Task III, 1998*
- [38] *Charge Controllers, IEA PVPS Task III, 1998*
- [39] *Batteries Guide, IEA PVPS Task III, 1998*
- [40] *Stand alone PV systems – Slide collection, IEA PVPS Task III, 1998*
- [41] *Grid-connected photovoltaic power systems: Status of existing guidelines and regulations in selected IEA member countries, IEA PVPS Task V, 1998*
- [42] *Utility aspects of grid connected photovoltaic power systems, IEA PVPS Task V, 1998*
- [43] *Proc. "System technologies for PV power systems in the built environment", IEA PVPS Task VII, 1999*
- [44] *S. Nowak: PV in der Schweiz / Technologischer Stand und Aussichten, Bulletin SEV/VSE 10/99, S. 15*
- [45] *Nationale PV-Tagung 1999, Unterlagen zu beziehen beim VSE, Gerbergasse 5, 8023 Zürich*

Wenn nicht anders erwähnt, bei der Programmleitung zu beziehen

## BIOMASSE

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Martin Hinderling / Daniel Binggeli**

[daniel.binggeli@bfe.admin.ch](mailto:daniel.binggeli@bfe.admin.ch)

---



### **Biotreibstoffe**

Die Fotomontage zeigt die Vielfalt von möglichen Treibstoffen.

## Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Biomasse (Biomasse = Holz, Pflanzen, feste und flüssige organische Abfälle) konzentriert sich vor allem auf die Umwandlung von Biomasse in Wärme, Strom und Treibstoff. Das Programm will mithelfen, dass die Biomasse ihren Anteil an der schweizerischen Energieversorgung stetig erhöht.

Im Berichtsjahr galten wiederum die Programmschwerpunkte der Jahre 1997-99: Biomasse wirkungsvoll, kostengünstig, schadstoffarm nutzen. Als Umwandlungstechnologien stehen im Vordergrund: Verbrennen, Vergasen, Vergären.

## Anvisierte Zielpunkte für 1999

Die Zielpunkte 1999 lauten:

- Die Voraussetzungen für die Verbreitung von Holzheizungen weiter verbessern: energetischer Wirkungsgrad, Abgasemissionen, Qualitätssicherung, Wirtschaftlichkeit (Holz, Altholz)
- die Entwicklung von einem, eventuell 2 Vergasersystemen vorantreiben

- das Know-how bei der Vergärung im Hinblick auf den Bau von industriellen, kommunalen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen verbessern
- in 2. Priorität auch die Nutzung der nachwachsenden Rohstoffe sowie die Verbrennung von landwirtschaftlichen organischen Abfallstoffen fördern.

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### BIOMASSE UMWANDELN

#### a) Biomasse verbrennen und vergasen

Die Resultate im CH-Teil des EU-Projekt **Low-NO<sub>x</sub> Wood Chip Combustion** [1a] zeigen, dass SNCR und SCR zur Stickoxidminderung grundsätzlich geeignet sind, jedoch bei beiden Verfahren eine relevante NO<sub>x</sub>-Minderung ohne erhebliche Emissionen an Nebenprodukten (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>CO, N<sub>2</sub>O) nur bei Einhaltung enger Bereiche der Betriebsparameter erzielt werden.

Im Projekt **Auslegungsgrundlagen für Holzfeuerungen** [2] wird ein numerisches Simulationsmodell des Verbrennungsvorgangs in Vorschubrost- und Unterschubfeuerung erarbeitet, welches zur optimalen Auslegung von Feuerungsanlagen eingesetzt werden kann. Das Berechnungsmodell soll sowohl die Feststoffumsetzung als auch die anschliessenden Gasphasenreaktionen erfassen. In der Berichtsperiode wurden das Berechnungsmodell weitgehend fertiggestellt.

Im Projekt **Partikelabscheidung bei Holzfeuerungen mit Wirbeltrennverfahren und Kappa-Zyklon** [1b] soll ein Verfahren zur Staubabscheidung untersucht werden, welche bessere Abscheidewirkung als konventionelle Zyklone erzielen und kostengünstiger als marktübliche Gewebe- oder Elektrofilter ist. Erste Messungen ergaben Werte unter 60 mg/Nm<sup>3</sup>.

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.

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 sollen in der dritten Phase zusammengeführt und als Gesamtsystem überprüft werden.

**Verbrennung von Hühnermist** [5a]: Die erfolgten Verbrennungsversuche haben gezeigt, dass punkto NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> noch Probleme bestehen. Diesbezügliche Lösungsansätze sind vorhanden. Ziel ist der Bau einer Pilotanlage.

Beim neu gestarteten 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. Nach Abschluss der Studie dürfte der Punkt erreicht sein, bei welchem der Bau einer Pilotanlage reif sein wird.

**Festbettvergaser für SGF** (Standardised Gasifier Fuel, [6]): Ziel dieses EU-Projekts war die Entwicklung einer ökonomischen, effizienten und zuverlässigen Wärmekraftkopplungsanlage, basierend auf einem vollautomatischen Festbettvergaser, beschickt mit einem standardisierten Vergaserbrennstoff. Der Schweizer Beitrag hat geeignete Verfahren für die Gasreinigung gefunden und im praktischen Einsatz geprüft.

**Parallele Teer- und Partikelmessungen bei Holzvergäsern in Dänemark** [7a]: Die Rohgase der Vergaser enthalten Teere und Partikel, welche den angeschlossenen Motoren schaden oder mindestens grossen Unterhalt bewirken. Um den ganzen Chemismus dieser Teere

und Partikel besser zu verstehen, müssen die verschiedenen vorhandenen Messmethoden untereinander vergleichbar sein. Die Parallel-Messungen in Dänemark haben hierzu einen wertvollen Beitrag geliefert.

**Vergasungsversuch mit Biomasse geringer Dichte** [8a]: In der letzten Berichtsperiode konnten die verschiedenen Biomasseformen brikettiert und Anpassungen am Vergaser vorgenommen sowie Messungen durchgeführt werden. Mit Ausnahme von Reisschalen lassen sich die anderen brikettierten Biomassearten sehr gut und mit gutem Wirkungsgrad vergasen.

**Vergasungsversuch mit einem Open Top Vergaser grösserer Leistung in Bangalore, Indien** [8b]: Das Indian Institute of Science (IISc) in Bangalore hat mit der Unterstützung der indischen Regierung einen Vergaser mit einer Leistung von 500 kg/h Biomasse in einer Industriefabrik in der Nähe von Bangalore in Betrieb genommen. Teillastmessungen mit Holz und leichter Biomasse konnten durchgeführt werden; mit leichter Biomasse wurde wesentlich weniger Leistung erzielt.

**Grundlagen zur Teerbildung bei der Holzvergasung** [9]: Das Projekt beinhaltet das Studium von primären Massnahmen zur Minderung von Teeren im Produktgas von Holzvergäsern. Der aufgebaute 2-stufige Versuchsreaktor ist bereit für die geplanten Versuche.

**Optimisation d'une installation de CCF au gaz de bois** [10]: Mit einem neuen Sandbettfilter und mit einer neuen Wasserreinigung konnte der Betrieb wesentlich verbessert werden.

**Kontinuierliche Teerbestimmung bei Holzvergäsern mittels FID** [7b]: Mittels Flammen-Ionisations-Detektion (FID) wird in diesem Projekt ein neues Messverfahren eingesetzt. Es soll künftig eine gezielte Betriebsoptimierung von Festbettvergäsern ermöglichen.

#### *b) Biogene Abfälle vergären*

**Mikroaerobe Vorbehandlung biogener Abfälle** [11]: In Forscherkreisen bestand die Vermutung, dass die Vorbehandlung biogener Abfälle mittels Zugabe von kleinen Sauerstoffmengen die anschliessende Hydrolyse beschleunigen könnte. Es hat sich nun gezeigt, dass dies nur insofern zutrifft, als die Luftzudosierung zu einer kleinen Erwärmung des Substrats führt, was den biochemischen Prozess etwas verkürzen kann.

**Codigestion de déchets organiques industriels** [12]: Die Vergärung von Molke und die Verstromung des anfallenden Biogases scheint im Hinblick auf eine

umweltgerechte Molke-Entsorgung vielversprechend. Zur Zeit bestehen diesbezüglich kaum Probleme. Dies könnte sich aber künftig schnell ändern (es geht um jährlich 60'000 bis 70'000 Tonnen).

**Production de biogaz à partir de déchets organiques humides** [13a]: Ein neues veterinär-hygienisch einwandfreies Verfahren zur Behandlung von Schlachthofabfällen unter energetischer Nutzung wurde entwickelt. Würde man die Hälfte der jährlich anfallenden Schlachthofabfälle auf diese Weise verwerten, ergäbe sich daraus ein Energiegewinn von nahezu 20 GWh<sub>el</sub>.

**Stand der Technik und Einsatzmöglichkeiten von Membranverfahren bei der Vergärung von Abwässern** [14] zeigt die Verfahrenstechnik, Massen- und Energieflüsse, und die Machbarkeit. Der Schlussbericht wird Ende Frühjahr 2000 vorliegen.

**Covergärung von biogenen Abfallstoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen** [15]: Ziel des Projekts ist die Ermittlung der wichtigsten cosubstratabhängigen Dimensionierungs- und Prozessgrössen landwirtschaftlicher Covergärungs-Biogasanlagen. Der FAT-Bericht wird voraussichtlich im März 2000 an der FAT zu beziehen sein.

Das **Prozessverhalten von in der Schweiz eingesetzten MSW-Gärsystemen unter dem Einfluss steigender Anteile an Küchenabfällen** [16] wurde unter steigendem Anteil von Küchenabfällen simuliert. Der Gärprozess in den drei untersuchten Systemen wurde bis zu einer Ammoniumkonzentration von 2,5 g/l nicht wesentlich beeinflusst.

Eine **Übersicht über die Literaturwerte zum Biogas-ertrag verschiedener Substrate** [17] wird bis Sommer 2000 vorliegen.

**Valorisation bioénergétique de fumiers de volailles** [13b] Das Projekt evaluiert die technische Machbarkeit der Vergärung von Geflügelmist. Ebenfalls vorgesehen ist die Integration auf einer Düngerproduktion.

#### *c) Biotreibstoffe*

Der bereits Ende 1998 publizierte Schlussbericht zur Studie "Treibstoffe aus Biomasse" wurde zusammen mit weiteren Beiträgen zum Thema **Biotreibstoffe** [18] an einer Konferenz in Rüslikon einem breiteren Publikum vorgestellt. Die Konferenz vermittelte einen Überblick über die technischen Möglichkeiten und Potenziale der Treibstoffgewinnung aus Grünabfällen, Holz, Ölsaaten und insbesondere Energiegras (Ethanol).

**Pflanzenöleinsatz im schnellaufenden, direkteingespritzten PKW-Dieselmotor** [19]: Projektziel ist die Eignungsprüfung des von W. Mahler entwickelten Verbrennungssystems für kaltgepresste, naturbelassene Pflanzenöle, im schnellaufenden PKW- Dieselmotor mit Direkteinspritzung.

**Caractérisation de filières de production de bioéthanol dans le contexte helvétique** [20]: Die Untersuchung zeigt ökologische und ökonomische Werte der vier verschiedenen Stoffe – Gras, Magermilch, Altpapier und Rüben.

Das BFE finanziert gemeinsam mit der KTI eine Untersuchung **Gemischtaufbereitung im Brennraum pflanzenölbetriebener direkteingespritzter Dieselmotoren System Mahler** [21]. Mit diesem Projekt will man versuchen, den Mahler-Motor so zu optimieren, dass er zum Vielstoff-Motor wird.

## EINZELPROJEKTE

**Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich zwischen verschiedenen Verfahren zur Beseitigung von organischen Haushaltabfällen** [22]: Diese Studie weist nach, dass die Vergärung v.a. aufgrund der besseren Energiebilanz eine bessere Ökobilanz aufweist als die Kompostierung und die Verbrennung. Die Kosten für eine professionelle Entsorgung liegt bei der Kompostierung und der Vergärung in der Grössenordnung von Fr. 150 pro t.

In der Studie **Rationelle Energieanwendung in der Landwirtschaft / vermehrter Einsatz erneuerbarer Energieträger** [23] werden aus verschiedenen Datenquellen der Energieverbrauch in der schweizerischen Landwirtschaft zusammengestellt und miteinander verglichen.

In Phase 2 des Projekts **Projektbezogene Qualitätssicherung bei Holzheizungsanlagen** [24a] wird ein

Werkzeug erarbeitet, dass Anlagen gebaut werden, die mit tiefen Investitions- und Betriebskosten einen hohen Jahresnutzungsgrad erreichen. Die wichtigsten Werkzeuge von QS-Holzheizung sind: Q-Plan, Q-Leitfaden, Standardlösungen und standardisierter Businessplan.

Das Projekt **Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle Wärmeerzeugung Ucliva** [24b] hat gezeigt, dass mit einer systematischen Betriebsoptimierung Verbesserungspotenziale realisiert werden können und der Bauherr die Gewissheit hat, dass die Anlage einwandfrei und mit minimalem Energieverbrauch arbeitet.

Die **Vergleichende Untersuchung der CEN- und ISO-Holzfeuerstätten** [25a] zeigt die Leistungsfähigkeit der CEN- und ISO-Prüfnormen (z.Zt. im Entwurfstadium) anhand eines Vertreters der Gerätetypen "Dauerbrand", "Holz", "Feuerstätten". Die nach den zwei Prüfverfahren mit unterschiedlicher Messphilosophie erhobenen Daten für Emissionen und Wirkungsgrad wurden verglichen. Vorausgesetzt, Versuchsprozedere und Prüfaufbau beider Normen sind identisch, ergeben sich vergleichbare Resultate für die Wirkungsgrade und Emissionen.

**Entwicklung eines Mess- und Prüfverfahrens zur Bestimmung von Wirkungsgrad und Emissionen von Holz-Feuerstätten schwerer Bauart (Speicheröfen)** [25b]: Ziel ist es, damit eine fundierte Diskussionsgrundlage zu schaffen, auf der eine zukünftige praxisnahe Prüfnorm für Zeitbrandfeuerstätten aufgebaut werden kann. Ein Entwurf wird im Herbst 2000 vorliegen.

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit auf nationaler Ebene ist wie bisher weiter gelaufen. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass das BFE seine Aktivitäten zusammen mit zahlreichen Instituten, Organisationen, öffentlichen Stellen, Unternehmen – vor allem KMU – durchführt. Dabei werden die Fachhochschulen als Partner zunehmend wichtig. Leider geht das auf Kosten der KMU, die bisher im Bereich Biomasse eine sehr wichtige Rolle spielten und von denen aus auch immer wieder innovative, wertvolle Entwicklungsanstösse ausgegangen sind.

Punkto Koordination bzw. Gewährleistung der Koordination zwischen verschiedenen Forschungsvorhaben liegt nun ein neues Instrument vor. Das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft hat das Forschungsinformationssystem ARAMIS in Betrieb gesetzt, welches den Interessierten Informationen über die vom Bund finanzierten oder durchgeführten Forschungsarbeiten liefert (URL-Adresse: <mailto:www.aramis-research.ch>).

Auch die internationale Zusammenarbeit ist wie bisher weiter gelaufen. Sie ist gekennzeichnet durch das punktuelle Mitwirken von Schweizer Institutionen und Unternehmungen im Rahmen des 4. Forschungsrahmenprogramms der EU sowie neu des 5. Forschungsrahmenprogramms mit den thematischen Programmen "TP4, Umwelt und nachhaltige Entwicklung" (SNF) sowie "TP4, Energie" (KBF) und schliesslich dem Programm "HP2, Förderung der Innovation und Einbeziehung der KMU" (KBF). Die Aktivitäten im Rahmen des IEA Bioenergy Agreement mit den Tasks Verbrennung, Vergasung und Vergärung sind unverändert weiter abgewickelt worden.

Schliesslich darf erwähnt werden, dass wiederum etliche Schweizer Forscher an internationalen Kongressen mit ihren Vorträgen ein beachtliches Echo ausgelöst haben.

## Umsetzung in die Praxis, P+D-Projekte

Die Umsetzung der FEP+D-Resultate im Bereich Biomasse erfolgt zu einem wesentlichen Teil über das Programm Energie 2000.

Im Zusammenhang mit der Strommarkt-Öffnung und der damit verbundenen (indirekten) Abwertung des Stroms aus erneuerbaren Energien unterstützte das BFE das Biogas Forum beim Erstellen einer Ökobilanz für Strom aus Biogas (Erarbeiten von Unterlagen zum Zertifizieren von Biogas-Strom).

Das BFE erachtet den Aufbau eines Netzwerks "Bioenergie" als nötig, um in der Agentur für erneuerbare Energien (AEE) einen starken, kompetenten Vertreter der Biomasse zu haben. Ein entsprechender Auftrag wurde erteilt.

### a) *Biomasse verbrennen und vergasen*

In einem Projekt **NUVOLA** [5b] wurde an einer Heizanlage für ein 6-Familienhaus mit Wasserspeicher, Solarkollektoren (28 m<sup>2</sup>) und Stückholzkessel (35kW) eine Gesamtbilanz durchgeführt. Der Anlage-Jahresnutzungsgrad ist mit 75% höher als erwartet. Die lufthygienischen Untersuchungen lagen unter den LRV-Grenzwerten, wobei die CO-Werte im Praxisbetrieb 3-mal höher waren als im Laborbetrieb.

Aufgrund einer Heizungssanierung wurde eine **Emissionsarme Brennkammer mit nachgeschaltetem Wasserwärmetauscher** [26] in einem Dreifamilienhaus eingebaut. Erste Erfahrungen erforderten bereits diverse Anpassungen. Letzte Messungen werden im Winter 2000 durchgeführt.

**Optimierung eines Gleichstromvergasers im industriellen Massstab** [27]: Im Zusammenhang mit der Heizungserneuerung im AC Zentrum Spiez ist es ermöglicht worden, eine Vergaser-Pilotanlage zu realisieren, unterstützt durch die nötige Begleitforschung. Damit besteht nun die reelle Chance, einen wichtigen

Meilenstein in der Technologie für Festbett-Vergaser zu erreichen.

### b) *Biomasse vergären*

**Realisierung einer Kompakt-Biogasanlage in Goldach (SG)** [28a]: Den Bau dieser Biogasanlage darf man als knapp wirtschaftlich bezeichnen. Zu diesem Resultat haben nicht zuletzt die Eigenleistungen des Betreibers beigetragen, wodurch sich dieser schon frühzeitig mit der Funktionsweise der Anlage vertraut machen konnte.

Das **Messprojekt Biogas-BHKW** [28b] ermittelte für 2 neue BHKW-Typen (Zündstrahlgeräte mit Turbolader und Ladeluftkühlung) den energetischen Wirkungsgrad sowie Betreuungsaufwand und Unterhalt. Solche Motoren erzielen einen elektrischen Wirkungsgrad von mindestens 30%. Abgasmässig kann man sie allerdings nicht als hervorragend bezeichnen.

**Co-Vergärung in ARA** [29]: Für die Kläranlage Adelboden wurde eine Feinanalyse "P+D-Covergärungsanlage" erstellt, für einen weiteren ARA-Standort ist eine solche in Arbeit.

## Beurteilung 1999 und Perspektiven für 2000

Der Fortschritt der Arbeiten, für welche das BFE im laufenden Jahr rund 3 Mio Franken zur Verfügung stellte, entspricht etwa den anvisierten Zielen:

**Verbrennung Holz:** Die Voraussetzungen für die Verbreitung von Holzheizungen konnte weiter verbessert werden: energetischer Wirkungsgrad, Abgasemissionen, Qualitätssicherung, Wirtschaftlichkeit.

**Verbrennung von landwirtschaftlichen Abfällen:** Wenig Fortschritte wurden erzielt, denn innerhalb der Bundesverwaltung war lange offen, ob die Verbrennung von landwirtschaftlicher Biomasse (insbesondere Hofdünger) die Gewässerschutzbestimmungen verletze oder nicht. Diese Frage darf man nun verneinen.

**Vergasung:** Ein wichtiger Meilenstein ist nun erreicht: Mit dem Bau einer Pilotanlage im industriellen Massstab ist begonnen worden.

**Vergärung:** Der Bau von landwirtschaftlichen Kompakt-Biogasanlagen gestaltet sich weiterhin positiv; erwähnenswert sind die erfolgreich abgeschlossene Studie betreffend die Vergärung von Schlachthof-Abfällen sowie ganz allgemein die bei der Co-Vergärung erzielten Fortschritte.

**NWR:** Dieser Sektor hat im Berichtsjahr eine gewisse Aufwertung erfahren: Eine Konferenz "Biotreibstoffe", durchgeführt in Rüslikon, hat beachtliches Presse-Echo erzielt (vgl. Titelbild).

Folgen der **Strommarkt-Öffnung:** Der Bau von Holzverstromungsanlagen und vor allem der Bau von landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen war auf dem besten Weg, für eine grössere Zahl von Landwirten interessant zu werden. Die Strommarkt-Öffnung macht nun diesen neuen Elan zunichte. Es sei denn, zahlreiche gutwillige Strom-Konsumenten seien bereit, im Rahmen einer Biogas-Strombörse die Lücke zu berrappen, die zwischen den bisher mehr oder weniger

gesicherten 16 Rp/kWh<sub>e</sub> und den Schleuderpreisen für Importstrom (exklusive externe Kosten, versteht sich) klafft.

Das BFE hat im Berichtsjahr eine spezialisierte Unternehmung beauftragt, den **Bereich Biomasse exklusive Holz zu evaluieren** (F+E, P+D, Markteinführung und Marktsicherung "M+M"). Das Resultat liegt in Form eines Berichts vor [30], welcher folgende Haupt-Fragen bzw. -Empfehlungen aufwirft: Soll weiterhin die Verbrennung **und** die Vergasung von Holz gefördert werden? Sollte bei der Vergärung das Gewicht der Markteinführung und -sicherung nicht gestärkt werden, auf Kosten von Forschung, Entwicklung und Demonstration? Wie kann man die Industrie besser einbinden?

Die Arbeiten im Jahr 2000 werden in den Rahmen des **Vierjahresplans Biomasse 2000-2003, Biomasse Programm des BFE** [31] gestellt werden. Um diesen Plan zu erarbeiten, hat das BFE eine Arbeitsgemeinschaft von Experten mit dem Ausarbeiten eines Plan-Entwurfs beauftragt. Die Programm- und Bereichsleitung wird diesen Plan nach Modifikationen weitgehend verwenden und an interessierte Kreise abgeben können.

## Projektliste

### F+E-PROJEKTE

- [1] Th. Nussbaumer, VERENUM, Zürich: *a) Low NOx Wood Chip Combution* (SB) • *b) Partikelabscheidung bei Holzfeuerungen mit Wirbeltrennverfahren und Kappa-Zyklon* (JB) / ENET 9966321 • *c) Grundlagen der Aerosolbildung* (JB) / ENET 9969121
- [2] C. Bruch u. Th. Nussbaumer, LTNT / ETH- Zürich: *Auslegungsgrundlagen für Holzfeuerungen* (JB) / ENET 9958890 / <mailto:www.ltnt.ethz.ch>
- [3] P. Rüegg, RÜEGG CHEMINEE, Zumikon: *Kleinholzfeuerung mit Feststoffspeicher als Alleinheizung* (JB) / ENET 9965547 / <mailto:www.ruegg-cheminee.ch>
- [4] J-L HERSENER und R. BÜHLER, Wiesendangen: *Energetische Nutzung von Biomasse*
- [5] B. Salerno u. J.-L. Hersener, Langenbruck: *Apollo I, a) Energiegewinnung aus Hühnermist* (SB) • *b) NUVOLA* (SB)
- [6] R. Bühler, HOVERGA, Maschwanden: *Development of an Integrated Small Scale Combined Heat and Power (CHP) Fixed Bed Gasification System Fuelled by Standard Gasifier Fuel* (SB)
- [7] P. Hasler, VERENUM, Zürich: *a) Sampling of Particles and Tars from Biomass Gasifiers with the ETH/Verenum Sampling Method* (SB) • *b) Kontinuierliche Teerbestimmung bei Holzvergäsern mittels FID* (JB) / ENET 9968502
- [8] H. Sharan, Seuzach: *a) Swiss Test Project "Powdery Biomass Gasifier"* (JB) / ENET 9958819 • *b) Vergasungsversuch mit einem Open Top Vergaser grösserer Leistung in Bangalore, Indien* (JB) / ENET 9971420
- [9] Ph. Morf u. T. Nussbaumer, LTNT/ETH-Zürich: *Grundlagen zur Teerbildung bei der Holzvergasung* (JB) / ENET 9968380/81
- [10] P. Giordano, Centre de Compétence Châtel-St-Denis: *Optimisation d'une installation de CCF au gaz de bois* (SB) / <mailto:www.xylowatt.ch>
- [11] A. Joss u. W. Edelmann, ARBI, Maschwanden: *Mikroaerobe Vorbehandlung biogener Abfälle* (SB)
- [12] M. Glauser, biol conseils, Neuchâtel: *Codigestion de déchets organiques industriels* (SB)

- [13] Y. Membrez, EREP, Aclens: *a) Production de biogaz à partir de déchets organiques humides: Optimisation de la digestion de la phase liquide et de la valorisation matière en affouragement porcin* (SB) ♦ *b) Valorisation bioénergétique de fumiers de volailles* (JB) / ENET 9970540
- [14] H. Engeli, Neerach: *Stand der Technik und Einsatzmöglichkeiten von Membranverfahren bei der Vergärung von Abwässern, Phase I* (SB)
- [15] U. Baserga, FAT, Tänikon: *Covergärung von biogenen Abfallstoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen* (SB)
- [16] G. Schober, NOVA ENERGIE, Ettenhausen: *Prozessverhalten von in der Schweiz eingesetzten MSW-Gärssystemen unter dem Einfluss steigender Anteile an Küchenabfällen* (JB) / ENET 9972903
- [17] W. Edelmann, ARBI, Maschwanden: *Übersicht über die Literaturwerte zum Biogasertrag verschiedener Substrate* (JB) / ENET 9971203
- [18] M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *Biotreibstoffe* (SB)
- [19] M. Meyer, ARGE, Schweiz. Fachhochschule für Landwirtschaft, Zollikofen: *Pflanzenöleinsatz im schnellaufenden, direkteingespritzten PKW-Dieselmotor* (JB) / ENET 9971561
- [20] A. Fromentin et al., EPF-Lausanne: *Caractérisation de filières de production de bioéthanol dans le contexte helvétique* (JB) / ENET 9969909
- [21] W. Schlachter, FH-Aarau: *Gemischtaufbereitung im Brennraum pflanzenölbetriebener direkteingespritzter Dieselmotoren System Mahler*
- [22] W. Edelmann u. K. Schleiss, Maschwanden: *Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich zwischen verschiedenen Verfahren zur Beseitigung von organischen Haushaltabfällen* (SB)
- [23] J.-L. Hersener, ARGE REAL, Wiesendangen: *Rationelle Energieanwendung in der Landwirtschaft / vermehrter Einsatz erneuerbarer Energieträger - Phasen 1 und 2* (JB) / ENET 9971643
- [24] R. Bühler, BÜHLER ARDENS GABATULER SFIH, Maschwanden: *a) Projektbezogene Qualitätssicherung bei Holzheizungsanlagen* (SB) ♦ *b) Betriebsoptimierung und Erfolgskontrolle Wärmeerzeugung Ucliva*

## P+D-Projekte

- [25] Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, Langenbruck: *a) Vergleichende Untersuchung der CEN- und ISO-Holzfeuerstätten* (SB) • *b) Messverfahren für Holz-Feuerstätten schwerer Bauart* (JB) / ENET 9968865
- [26] K. Imbach, VHP, Olten: *Emissionsarme Brennkammer mit nachgeschaltetem Wasserwärmetauscher* (SB)
- [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) / ENET 9972501
- [28] T. Böhni, ENERGIE & UMWELT, Frauenfeld: *a) Kompaktbiogasanlagen in der Landwirtschaft, Betriebsauswertung während einem Jahr* (SB) • *b) Messprojekt Biogas-BHKW, Messkampagne an 2 neuen BHKW-Typen* (SB)
- [29] H. Engeli und E.A. Müller, Neerach: *Standortauswahl und Feinanalysen für je eine P+D Co-Vergärungsanlage in 2 Kläranlagen* (JB) / ENET 9968181
- [30] J. Kuster, ARGE BHP/ENERGON, Zürich: *Evaluation der Bereiche Biomasse und Verkehr* (SB)
- [31] A. Wellinger, R. Bühler, J-L. Hersener, Y. Membrez, T. Nussbaumer, Ettenhausen: *Vierjahresplan 2000-2003, Biomasse Programm des BFE* (SB)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden,

(SB) Schlussbericht vorhanden

zu beziehen bei: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch) und [www.infoenergie.ch](http://www.infoenergie.ch)

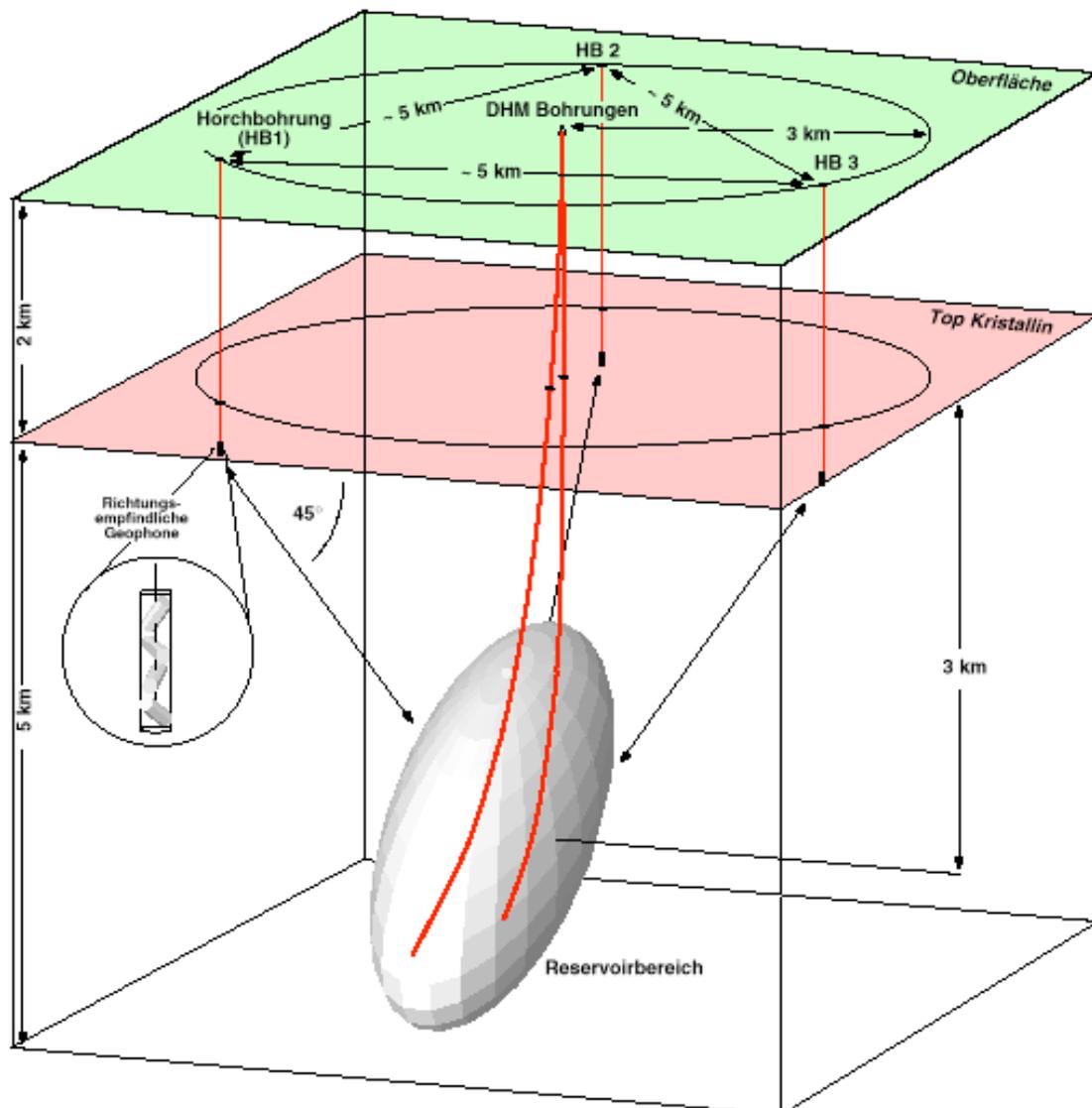
Weitere Adressen: [www.energy-research.ch](http://www.energy-research.ch), [www.biogas.ch](http://www.biogas.ch), [www.vhe.ch](http://www.vhe.ch), [www.energie2000.ch](http://www.energie2000.ch)

## GEOHERMIE

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Harald L. Gorhan**

[harald.gorhan@ewe.ch](mailto:harald.gorhan@ewe.ch)



### Orten der Untergrundgeräusche

Die Hörchbohrung HB-3 für das Projekt *Deep Heat Mining* ist bei Otterbach (BS) bereits im Gange. Neben Messungen der Primärspannungen im kristallinen Untergrund sollen in einer nächsten Phase richtungsempfindliche Geophone installiert werden.

## Programmschwerpunkte

Fortsetzung des Schlüsselprojekts *Deep Heat Mining* in Basel, Teilnahme am *Geothermal Implementing Agreement der International Energy Agency*, Untersuchungen über den Einfluss von Temperaturschwankungen

auf die Standfestigkeit von Energiepfählen sowie innovative Neuentwicklungen von Erdwärmesondentypen und Bohrtechnologien.

## Anvisierte Zielpunkte für 1999

Hauptziele der eingangs erwähnten Forschungsprojekte waren:

- Erstellung der ersten Horch- und Testbohrung bei Otterbach (BS);
- kostengünstige Bohrverfahren und neuartige, leistungsfähigere Erdwärmesonden-Typen zu entwickeln und austesten;
- Erstellung einer *Homepage* Geothermie;
- praktische Versuche an der EPFL über die Standfestigkeit von Energiepfählen bei einer thermischen

Belastung durchführen;

- *Up-date* der im letzten Jahr durchgeführten Statistik über sämtliche geothermischen Anlagen in der Schweiz, inklusive Hochrechnungen der geothermischen Energieproduktion bis Ende 2000;
- Klarheit schaffen über die "Erneuerbarkeit und Nachhaltigkeit" der geothermischen Energie.

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### UNTIEFE GEOTHERMIE

#### a) *Revision "Geothermische Statistik Schweiz" [1]*

Die Datengrundlage des im letzten Jahr durchgeführten *Inventaire des installations géothermiques en Suisse* weist hinsichtlich Datenbasis beträchtliche Unstimmigkeiten auf. Zum Beispiel liegen die kantonalen Angaben betreffend der Grundwasser-Wärmenutzung viel höher als dies gemäss Wärmepumpenstatistik ausgewiesen ist. Dies hat zur Unterschätzung der Wärmeproduktion aus dem Grundwasser um Faktoren geführt. Des Weiteren weisen verschiedene Kompilationen (z.B. EICHER & PAULI, BASICS) zum Teil unterschiedliche Zahlen für die Wärmeproduktion von Erdwärmesonden aus.

#### b) *Projekt: "Ist untiefe Geothermie erneuerbar" [2]*

In der Praxis wurde des Öfteren die Frage gestellt, ob die geothermische Energie überhaupt erneuerbar bzw. die Gefahr von "Wärmeklau" zwischen benachbarten EWS-Anlagen zu befürchten sei. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden zwei Studien erstellt ("Ist untiefe Geothermie erneuerbar?" und "Untiefe Geothermie: woher kommt die Energie?"). Bei einer vernünftigen Wärmenutzung konnte dabei eindeutig die Erneuerbarkeit der untiefen Geothermie bewiesen werden. Dies wird auch durch Messergebnisse von EWS-Anlagen bestätigt, die bereits mehr als 15 Jahre in Betrieb stehen. Allerdings sollten gewisse Minimalabstände zu nachbarlichen EWS eingehalten werden, wobei diese Abstände stark von örtlichen Gegebenheiten abhängen (insbesondere der Grad der Bodendurchfeuchtung und das eventuelle Vorhandensein einer Grundwasserströmung).

#### c) *Projekt: "Untiefe Geothermie: woher kommt die Energie?" [3]*

Unter Voraussetzung eines vernünftigen Wärmeentzugs, kommen die beiden obengenannten Studien zu vergleichbar positiven Ergebnissen betreffend der Erneuerbarkeit der Geothermie. Es ist geplant, im Januar 2000 ein "round table Gespräch" zwischen den beteiligten Autoren und weiteren externen Experten durchzuführen.

#### d) *Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques [4]*

Le but de ce projet est de tester en conditions réelles (dimensions, charges, etc.), le comportement statique d'un pieu échangeur de chaleur et de son interface avec le terrain. Pour ce faire, un pieu (diamètre 880 mm, longueur 25 m), du bâtiment polyvalent du Quartier Nord de l'EPFL, a été équipé avec un circuit hydraulique pour pouvoir lui injecter de la chaleur (i.e. le pieu a été transformé en pieu échangeur à l'aide d'un module de chauffage spécial). Des capteurs de force, de déformation et de température ont été installés afin d'évaluer l'effet des sollicitations thermo-mécaniques sur la statique du pieu.

L'analyse des résultats a permis de déduire les efforts engendrés dans le pieu par les sollicitations thermiques et la distribution de la force de frottement latérale. Des recommandations, quant aux effets des variations de température sur la portance du pieu ont été établies.

## TIEFE GEOTHERMIE

### e) *Geothermische Eigenschaften von Schweizer Molassebecken [5]*

Um die Nutzung untiefer geothermischer Ressourcen und die Wärmespeicherung im Untergrund zu fördern, wurde eine neue Datenbank über die thermischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und -kapazität, mittlere Gesteinsdichten) der tertiären Molasse bis 500 m zusammengestellt. Für die effiziente Auswertung der Daten und die praktische Anwendung beim Bau neuer Anlagen wurde ein spezielles PC-Programm entwickelt.

An der ETHZ wurde eine Wärmekapazitäts-Apparatur durch eine neue Konstruktion ersetzt und kalibriert. Somit sind effiziente und zuverlässige Messungen von Gesteinsproben, sogenannten *Cuttings* möglich.

### f) *Möglichkeiten einer Wärmegewinnung aus der Geothermiebohrung "Pro San Gian", St. Moritz-Bad [6]*

Die Tiefbohrung kann mit Hilfe einer tiefen Erdwärmesonde für die Nutzung von Geothermie verwendet werden. Dabei können 8-12% des heutigen Wärmebedarfs des Bäderkomplexes abgedeckt werden. Die Energiegestehungskosten sind aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv, wenn die realen Kosten der heute bestehenden Fernwärmeleitung vollständig mitgerechnet werden und der PR-Effekt des Alternativenenergieeinsatzes ebenfalls mitberücksichtigt wird. Werden die Mehrkosten auf die Endbenutzer (z.B. Hotelgäste) überwältigt, so würden durch die Nutzung der Geothermie Zusatzkosten von ca. Fr. 1.40 pro Zimmer und Hotelnacht entstehen (bei Annahme einer 50%-Belegung). Mögliche Bundessubventionen für die nichtamortisierbaren Mehrkosten würden diesen Preis für eine CO<sub>2</sub>-freie Wärmeerzeugung weiter reduzieren.

### g) *Projekt "Deep Heat Mining" (DHM): Anwendung der Hot-Dry-Rock/ Hot-Wet Rock Technologie zur Strom- und Wärmeproduktion in der Schweiz [7]*

Die Abklärungen betreffend der Energienutzung, insbesondere der Einspeisung der DHM-Wärme in das Fernwärmenetz in Basel, wurden gemeinsam mit den Industriellen Werken Basel weitergeführt. Der von der ARGE DHM vorgelegte Bericht wurde bereinigt und bildet nun die Grundlage für weitere Arbeiten. Unter Verwendung des früher entwickelten dynamischen Wirtschaftlichkeitsmodells wurde der Einfluss der Bauzeit auf die Wirtschaftlichkeit des DHM-Projekts untersucht. Es zeigte sich, dass sich der Barwert (*net present value*) des Projekts um etwa 5 Mio. CHF verbessert, wenn die Bauzeit von 10 auf 8 Jahre verkürzt wird. Leider ereignete sich bei den Vorbereitungsarbeiten zum Einbau der Verrohrung in die erste Test- und Horchbohrung in Otterbach (siehe Titelbild) ein

Gestängebruch. Sämtliche darauffolgenden Fangarbeiten blieben unter anderem wegen spülungstechnischer Schwierigkeiten erfolglos, so dass am 8.10. die Bohrarbeiten bis zum Auffinden einer Lösung unterbrochen wurden.

### h) *Teilnahme am IEA "Geothermal Implementing Agreement" [8]*

Dank der Vertretung der Schweiz im *IEA Geothermal Programme* und dessen offener Informationspolitik, hat man auch Zugang zu Resultaten von Tätigkeiten, an welchen sich die Schweiz nicht offiziell beteiligt.

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.

### i) *Projets et développements géothermiques*

Le *Workshop Suisse-Yaroslavl* (Russie) [9] a permis d'identifier les domaines suivants susceptibles de conduire à une coopération entre les deux parties:

- exploitation des aquifères profonds
- sondes géothermiques
- forages et sondes profondes
- importation des pompes à chaleur à Yaroslavl
- fabrication des pompes à chaleur à Yaroslavl.

Les contacts établis au cours du *Workshop* sont un préambule au développement des réalisations bilatérales entre les partenaires concernés, en particulier dans le domaine des pompes à chaleur. En ce qui concerne les projets géothermiques, le principe d'une mission de spécialistes suisses se rendant à Yaroslavl a été retenu dans le but de se rendre compte sur place des besoins et des conditions d'intervention dans les divers secteurs évoqués.

### j) *Teilnahme am IEA-Projekt: "Design, Construction and Maintenance of UTES Wells and Boreholes" [10]*

This Project started in 1998. Research and development areas addressed refer to site investigations and testing methods, design of drilling casing and well screen, construction and installation problems as well as maintenance and efficiency of different rehabilitation methods including application of advanced monitoring systems.

## Nationale Zusammenarbeit

Auch in der jetzigen Berichtsperiode fand eine intensive Zusammenarbeit mit Bohrfirmen, Erdwärmesonden-Herstellern, Besitzern von Kur- und Thermalbädern, mit Bundesstellen mit Universitäten und Fachhochschulen statt. Dies sowohl in der deutsch-, (romänisch-) als auch in der französisch- sprachigen Schweiz. Im Tessin erfolgten Kontakte mit der Behörde und diversen Ingenieurbüros. Sämtliche durch das BFE geförderten P+D- Anlagen wurden besucht, mit zusätzlicher Unterstützung bei der Erstellung und Auswertung begleitender Erfolgskontrollmessungen.

Von diversen Projektnehmern wurden zudem Presseartikel und geothermische Beiträge für Fachzeitschriften verfasst.

Mitte des Jahres konnte die neue [Homepage](#) auf das Netz aufgeschaltet werden. Sie ist im In- und Ausland auf reges Interesse gestossen (bisher ca. 1600 Besucher).

Die Schweizerische Vereinigung für Geothermie (SVG) war und ist in verschiedensten Bereichen sehr aktiv. Als Beispiel, sei hier die Durchführung der *European Geothermal Conference Basel* zu erwähnen., die im letzten September zusammen mit deutschen, italienischen und französischen Fachverbänden stattfand. 1999 wurden vom SVG drei Bulletin-Nummern veröffentlicht, die auch im Ausland Beachtung fanden

## Internationale Zusammenarbeit

Reger internationaler Informationsaustausch erfolgte im Rahmen der bereits erwähnten Mitarbeit beim *IEA Geothermal Programme* [8] und dem Projekt *Design, Construction and Maintenance of UTES Wells and Boreholes* [10].

Auch im Jahr 1999 waren Schweizer Geothermiker an diversen internationalen Tagungen mit Vorträgen präsent:

- Teilnahme am Kolloquium *Creeping Slopes, Skyscraper Foundation and Thermal Storage Systems as Actual Examples of Research and Education in Geotechnical Engineering (FPFL) und an der European Geothermal Conference Basel '99*.
- An der *European Geothermal Conference Basel '99* wurde im Rahmen der Session *Country overviews* der Schweizer Beitrag *Research and utilization of geothermal resources in Switzerland – achievements and prospects* präsentiert.
- Für den *World Geothermal Congress 2000* (Beppu und Morioka/Japan) wurde das Manuskript *Swiss geothermal update 1995-2000* eingereicht.
- Ferner wurde am *GRC 1999 Annual Meeting* (Reno/USA, 18.-20. Oktober 1999) der Beitrag *How*

*renewable are geothermal resources ?* präsentiert. Der Beitrag ist in *GRC Transactions Vol. 23*, p. 573-578 publiziert; er wurde mit dem *Best Paper Award / Sustainability Session* ausgezeichnet.

- Ferner wies L. Rybach im Rahmen eines Vortrags an der TU Graz/A (18.11.1999) über NEAT-Tunnels auf die Tunnelwärmenutzung hin.
- Teilnahme von SVG- Mitgliedern an der Tagung *A Geothermal Europe – The Ferrara Declaration*, die im April 1999 vom *European Geothermal Energy Council (EGEC)* in Ferrara abgehalten wurde. Speakers from ten countries and nearly one hundred participants representing 25 nations contributed to the success of the conference, and to its main topic, the adoption of the "Declaration of Ferrara". The latter appeals to decision makers, leaders in politics and economy, to support the overall development of the geothermal energy utilisation.
- Bereits erwähnt wurde die Zusammenarbeit mit Fachleuten aus Russland (*Projets et développements géothermiques Workshop Suisse-Yaroslavl*, [8]) wo ein intensiver Erfahrung-Datenaustausch mit dem Institut für Geophysik der ETHZ in die Wege geleitet wurde.

## Transfer in die Praxis, P+D Projekte

Als ausgewählt, typische Beispiele für den gelungenen Transfer der Forschung in die Praxis sind hier einige, zur Zeit laufende P+D-Projekte angeführt.

### Verbesserungen und Neuentwicklungen (untiefe Geothermie):

- Effizienzvergleich zwischen konventionellen (tiefen) Erdwärmesonden und der Neuentwicklung

"Regenschirm-Erdwärmesonde".

- *Etude de faisabilité d'une nouvelle méthode de forage: Mudair*.
- Beheizung von Wohn- und Geschäftshaus ohne fossile Brennstoffe im Kanton Schwyz (Kombination der Wärmenutzung von Sonnenenergie, Außenluft und aus Energiepfählen).

- Wirtschaftlichkeitsermittlung einer Sondenisolation im obersten Abschnitt einer Erdwärmesondenanlage in Otelfingen (ZH).
- Lebensdauer von EWS in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung.
- Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure: Centre Scolaire Vers-l'Eglise / Fully.

### Hydrothermale Geothermie

- Geothermie Contracting; Siedlung Solar One, Itingen (BL).
- Geothermische Wärmepumpen; Schulhaus Egelsee, Kreuzlingen.
- Wärmegewinnung aus Thermalwasser; Bad Schinznach.
- Exploitation du forage géothermique JAFE de Saillon.
- Exploitation du nouveau forage géothermique de Lavey-les Bains

- Forage géothermique d'Yverdon-les Bains (Abschluss).

### Erstellung und Erfolgskontrolle von geothermischen Anlagen, die Tunnelwasser oder -luft nutzen:

- Messprogramm für das Projekt "Wärmenutzung aus dem Rickentunnel" (Mitfinanzierung NOK);
- Tunnelwassernutzung Mappo-Moretina;
- Géothermie Grand-St-Bernard (Nutzung der warmen Tunnelluft).
- Gewinnung geothermischer Energie aus dem Hauenstein Basistunnel.

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 1999 und Ausblick für 2000

Eine Revision der "Geothermischen Statistik" soll verlässliche Daten über die Wärmeproduktion aus geothermischen Quellen liefern. Diese werden im Hinblick auf Förderstrategien benötigt.

Bei den F+E-Projekten sind besonders die bahnbrechenden, an der EPFL durchgeführten Feldversuche über den Einfluss von thermischen Belastungen auf die Statik eines Energiepfahls zu erwähnen (*Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques* [4]). Diese vermutlich weltweit zum ersten Mal durchgeführten Untersuchungen führten zu einer engen Zusammenarbeit mit dem geotechnischen Institut der TU-Darmstadt. Es bestehen gute Chancen, dass sich aus dieser Zusammenarbeit ein grösseres EU- Projekt ergibt.

Des Weiteren ist erwähnenswert, dass Mitarbeiter der EPFL als Experten zur Erstellung der Energiepfahlanlage für die Flughafenerweiterung Dock Midfield in Kloten beigezogen werden.

Zu guter Letzt seien die regen PR-Tätigkeiten zu erwähnen. Dies in Form von zahlreichen Publikationen, durch den flächendeckenden Vertrieb der geothermischen Broschüre, die Erstellung einer *Homepage* für Geothermie und durch Abhaltung der *European Geothermal Conference Basel '99*.

Generell sollen mit gezielten Informationstätigkeiten Generalunternehmungen, Planer, Architekturbüros und grössere Baufirmen über die verschiedenen geothermischen Nutzungsmöglichkeiten besser orientiert bzw. die Anwendungsakzeptanz in Gemeinden und Kantonen erhöht werden.

Die wichtigste Stossrichtung bei der Forschung wird auch 2000 beim *Deep Heat Mining* liegen. Hier gilt es in erster Linie, die Test- und Horchbohrung in Otterbach (BS), erfolgreich abzuteufen bzw. zu testen.

Des Weiteren ist für das kommende Jahr die Realisierung von mehreren Erdwärmesonden Grossanlagen sowie die geothermische Nutzung von bereits bestehenden Tiefbohrungen (z.B. Berlingen 3) vorgesehen.

## Liste der Projekte

- [1] IFG/ETH-Zürich: *Revision "Geothermische Statistik Schweiz"* (SB)
- [2] POLYDYNAMICS ENGINEERING & IFG/ETH-Zürich: *Ist untiefe Geothermie erneuerbar ?* (SB)
- [3] HUBER ENERGIETECHNIK, Zürich & DGC/LASEN/EPF-Lausanne: *Untiefe Geothermie: woher kommt die Energie ?* (SB)
- [4] DGC/LMS & DGC/LASENEPF-Lausanne: *Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques* (SB)
- [5] GEOFORM-Winterthur, MENGIS+LORENZ-Luzern, SI/UNI-Bern und IFG/ETH-Zürich: *Geothermi-*

*sche Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich bis 500 m)* (SB)

- [6] GEOFORM-Winterthur & POLYDYNAMICS ENGINEERING-Zürich: *Nutzungsmöglichkeiten Bohrung Pro San Gian, St. Moritz* (SB)
- [7] ARGE DEEP HEAT MINING, Zürich: *Deep Heat Mining. Anwendung der Hot Dry- und Wet Rock Technologie zur Strom- und Wärmeproduktion in der Schweiz* (SB)
- [8] ARGE POLYDYNAMICS-Zürich, ETH-Zürich, CHYN-Neuchâtel, HÄRING GEOPROJECT-Zürich: *Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock, Subtask C)* (SB)
- [9] SOCIÉTÉ SUISSE POUR LA GÉOTHERMIE SSG, Bienne: *Projets et développements géothermiques-Workshop Suisse- Yaroslavl (Russie)* (SB)
- [10] FORALITH, Gossau: *Teilnahme am IEA Annex 13, Leader Subtask C: Design, Construction and Maintenance of UTES Wells and Boreholes* (SB)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

## KLEINWASSERKRAFTWERKE

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Hanspeter Leutwiler**

[iteco@iteco.ch](mailto:iteco@iteco.ch)

---



### **Innovationspotentiale bei niederen Nutzgefällen:**

Das Ultra-Niederdruck-Kraftwerk bei der Papierfabrik Perlen kommt dank innovativer Saugheber-Turbinen ohne teure Abschlussorgane aus. Mit dieser neuen Technologien können Kleinwasserkraftwerke mit sehr niedrigen Nutzgefällen die Wirtschaftlichkeitsschwelle erreichen.

## Schwerpunkte 1999

Die Branche der Kleinwasserkraftwerke ist 1999 wegen der kommenden Strommarktöffnung weiter verunsichert worden. Es wird nur noch in die wirtschaftlichsten Projekte investiert. Im Bereich der Pico-Kraftwerke \*) beginnt zudem wegen dem Vollzug des Gewässerschutzgesetzes eine neue Stilllegungswelle. Das Programm Kleinwasserkraftwerke setzte sich deshalb zum Ziel, dieser Verunsicherung entgegenzuwirken. Aus Budgetgründen sollte zudem die Förderung von P+D-Anlagen auf wenige Schwerpunktprojekte mit grösserem Innovationscharakter reduziert werden.

Der Schwerpunkt des Programmes lag deshalb auf Hilfen für Bauherren und Planer, sowie auf der Aktivierung der Öffentlichkeitsarbeit. Zwei sehr risikoreiche P+D-Projekte wurden begleitet: die Entwicklung von Niederdruckturbinen und eine Pilotanlage für eine Pico-Achsalterbine (*Pico-Kraftwerke: unter 50 kW*).

Ein grosses Projekt wurde erfolgreich zu Ende geführt (Ultra-Niederdruck-Kraftwerk mit einfachregulierten Heberturbinen, siehe Titelbild), und eine Anlage für Drehzahlvariabilität getestet. Ein neues Schwerpunktprojekt wurde gestartet: eine Pilotanlage zur Umwandlung von Druck und Wasserstrom mittels Doppelkonen an Stelle von Turbomaschinen.

Erste Anzeichen der Möglichkeit der Verbesserung der politischen Lage kamen erst in der zweiten Jahreshälfte: Die Botschaft zum Energiegesetz und die Verabschiedung des Förderabgabengesetzes gaben der Szene klare Signale, dass die Politiker nach wie vor zu erneuerbaren Energien stehen. Die Umweltzertifizierung von Wasserkraft nahm Konturen an, und Energie aus Kleinwasserkraftwerken wurde erstmals in Ökostrombörsen aufgenommen. Die erneuerbaren Energien rückten unter dem wachsenden Marktdruck und gemeinsamen Aufgaben wie Ökostromvermarktung zusammen: Verbände und Verwaltung signalisierten, dass die Kleinwasserkraftwerke in den meisten Belangen den neuen erneuerbaren Energien gleichgestellt werden sollten.

Eine in diesem Jahr fertiggestellte Presseauswertung zeigt einerseits die seit 1995 sich abzeichnende Schwächung der Investitionen auf, belegt jedoch andererseits das grosse Investitionsvolumen in Kleinstwasserkraftwerke bis 300 Kilowatt Leistung in der ersten Hälfte der neunziger Jahre. Der Zuwachs überstieg die Ziele von Energie 2000, bei tragbaren Energiegestehungskosten.

## Arbeiten und Ergebnisse

Die vom DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke beauftragte **Presseauswertung und Umfragen über Kleinstwasserkraftwerke bis 300 kW** wurde fertiggestellt. Sie ermittelte für die Periode 1985 bis 1997 einen Zubau von 59 GWh/a. Nicht ermittelt werden konnten die Produktionseinbussen der in Betrieb stehenden Anlagen infolge Umweltauflagen, und die Verluste infolge Stilllegungen. [3]

Der Nettozuwachs kann deshalb nur grob geschätzt werden wird auf 35 GWh / a respektive 18 Prozent geschätzt. Diese Nutzungszunahme hat, von Ausnahmen abgesehen, ohne Beanspruchung von bisher nicht genutzten Gewässerabschnitten stattgefunden: Reaktivierungen und Erneuerungen sowie die Nutzung bestehender Bauwerke und Rohrleitungen herrschen vor.

Es konnte ein kleiner Boom bei den Trinkwasserkraftwerken nachgewiesen werden. Der Einbezug der hydraulischen Energie ist bei vielen Wasserversorgungen zum Stand der Technik geworden. Man beginnt nun, **überschüssigen Druck in Rohrleitungssystemen** aller anderen Arten auf die Möglichkeit der hydraulischen Energienutzung zu untersuchen: Demonstrationsanlagen gibt es bereits für Abwasser, Industrieprozesswasser und Tunneldrainagewasser.

Nach 1995 wurde ein bedenklicher Einbruch der Investitionstätigkeit festgestellt. Die Auswertung der Jahre 1998 und 1999 folgt. Eine Zusammenfassung des Berichtes und die Resultattabellen können auf der [Internetseite](#) des Programmes eingesehen werden.

Die Nachfrage nach blossen Auskünften und nach Informationsversand durch die **Information und Beratung** hat sich in der Deutschen Schweiz verringert. Da in der Westschweiz die gegenteilige Tendenz zu beobachten war, lässt sich vermuten, dass die Ursache vornehmlich in der Entlastung durch die *Homepage* liegt, welche in Deutsch sehr umfassende Informationen bietet. Unverändert geblieben ist die Nachfrage nach intensiver Beratung (Kurzberatung und Grobanalysen), wobei sich - bedingt durch die verschlechterten Rahmenbedingungen - die Inhalte von technischen Problemen zu strategischen Investitionsfragen und Problemen mit Umweltauflagen verschoben haben. Es wurden deshalb Informationsblätter über die Marktöffnung, Ertragsszenarien und den Ökostrommarkt erarbeitet. Alle Informationsunterlagen wurden auf CD den Infostellen verteilt. Die Internet-*Homepage* wurde periodisch aktualisiert und inhaltlich stark ausgebaut, so dass heute auf Deutsch ein umfassendes Informationssystem zur Verfügung steht[ 4].

Unverändert blieb die Nachfrage nach Leistungen im Bereich der Zielgruppe der Pioniere, d.h. meistens nur für Pico-Kraftwerke, insbesondere nach Kurzberatungen und Grobanalysen mit Ortsbegehung.

Wegen den beschriebenen politischen Rahmenbedingungen stagnierte die **direkte Förderung** von Kraftwerken. Es gingen extrem wenig Gesuche um **Beiträge an Vorstudien** ein - nur zwei konnten bewilligt werden. Insgesamt wurden seit 1993 zirka 66 Vorstudien unterstützt - sistierte Projekte ausgenommen), wovon ein halbes Dutzend noch in Arbeit sind [5].

Anfragen für Unterstützung von **P+D-Anlagen** (Holprinzip) kamen fast keine, obwohl es einen Handlungsbedarf für Pilotanlagen im Bereich sehr kleiner Kraftwerke für niedrige Nutzgefälle und für Abwasserkraftwerke gibt. Dies spiegelt deutlich die sinkende Investitionsbereitschaft auf der Produzentenseite und das schwache Interesse der Ausrüstungsindustrie. Insgesamt wurden seit 1993 Beiträge an 27 Ausführungen von Kleinwasserkraftwerken und Turbinenentwicklungen bewilligt.

Mit dem **Ultra-Niederdruck-Kraftwerk Perlen** (1'000 kW) wurde die erste konsequente Saugheberanlage mit einfachregulierten Turbinen in der Schweiz in Betrieb gesetzt. Die Anlage erreicht die gleichen Wirkungsgrade wie eine "klassische" Konstruktion. Die Kostenersparnis durch den Wegfall teurer Einlaufschützen (für 50 m<sup>3</sup>/s Wasser) und den Verzicht auf regulierbare Leitschaukeln zahlt sich aus: Die Anlage ist trotz dem niedrigen Nutzgefälle von 2.7 m wirtschaftlich.

Im Kraftwerk Fuhren bei den Kraftwerken Oberhasli (KWO) wurde ein Pilotprojekt für **Doppelkonus-Technologie (DCT)** gestartet. Diese Technologie für die Umwandlung von Druck und Wasserstrom ohne drehende Teile, rein auf Hochgeschwindigkeitskonen beruhend, ist für die Meerwasserentsalzung bereits weiter fortgeschritten und soll nun für verschiedenste Anwendungen im Wasserkraftbereich weiterentwickelt werden. Ist die technisch-wirtschaftliche Machbarkeit erwiesen, so wird es zum Beispiel möglich sein, an entlegenen Standorten kleine Wasserkraftpotentiale aus Quellen und Bächen verschiedener Höhenlagen in eine Druckleitung einzubinden, ohne Pumpen mit teuren Stromzuleitungen zu benötigen. Das Projekt wird namhaft vom Projekt- & Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) und vom Kanton Bern unterstützt.

Die Pilotanlage für ein **drehzahlvariables Wasserrad** in Oberwil bei Büren wurde ein Jahr lang betrieben. Dabei auftretende Probleme wurden angegangen. Der Bericht wird nächstes Jahr erstellt. Die Technologie der Drehzahlvariiierung ist auf Turbinen anwendbar - das Thema gewinnt mit den steigenden Wirkungsgraden der Umrichtertechnologie an Interesse.

**Das Projekt Revita** (Reaktivierung von Pico-Kraftwerken, Ökozentrum Langenbruck) konnte nach einer Phase der Stagnation wegen Bewilligungsproblemen eine erste Anlage reaktivieren. Das mit Hilfe von Arbeitslosen erneuerte **Kleinwasserkraftwerk Cormoret** (Niederdruckanlage mit einer Produktion von 250'000 kWh/a ging noch im selben Jahr in Betrieb und hat dem Projekt einen "Prix ETA" der Elektrizitätswirtschaft eingebracht. Das Ökozentrum Langenbruck hat anfangs Dezember die Stiftung "Revita" gegründet, welche weitere Projekte angehen wird.

Das Projekt für die Entwicklung von **Niederdruckturbinen der Stiftung Kleinturbinenlabor MHyLab** geriet in Verzug, wurde jedoch Ende Jahr nach einer Zusage für finanzielle Unterstützung seitens des PSEL wieder beschleunigt. Der Abschluss ist im Jahr 2002 geplant. Das MHyLab hat die Entwicklung der **Peltonturbinen** fertiggestellt. Das *Know-how* wird gegen Tantiemen Bauherren und Turbinenfabrikanten zur Verfügung gestellt. Ein Durchbruch zu einem Absatz im Ausland bahnt sich an.

Die Ergebnisse diverser Aktivitäten des Interessenverbandes Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer, ISKB, wurden unverzüglich mit den Tätigkeiten der Information & Beratung Interessierten zugänglich gemacht, und umgekehrt die Anliegen des Programmes in den ISKB und die Branche der Kleinwasserkraftwerke eingebracht.

Die Schwerpunkte des ISKB lagen 1999 in:

- Mitarbeit bei der Gründung des Vereins für umweltgerechte Elektrizität,
- Studienarbeit für die Umweltzertifizierung der Kleinwasserkraftwerke,
- Vorstandsarbeit in der Agentur Erneuerbare Energien (AEE),
- Mitarbeit in der Strategiegruppe für das Nachfolgeprogramm von Energie 2000,
- Vertretung der Kleinwasserkraftwerke in der Kommission für Anschlussbedingungen der unabhängigen Produzenten (KAP),
- Fachtagung zum Thema Ökostrom des ISKB in Chur,
- Kontakte mit europäischen Institutionen usw.

Diese Zusammenarbeit erzeugte eine gute Synergie.

## Evaluation & Perspektiven

### BEWERTUNG & FOLGERUNGEN

Es zeigte sich, wie sensibel das Projektierungs- und Investitionsverhalten der Kleinwasserkraftwerk-Branche auf **politisch-wirtschaftliche Signale** reagiert, sogar wenn letztere nicht ganz den Realitäten entsprechen. Eine Verunsicherung der Investoren entsteht leicht, die Vertrauensbildung in bereits bestehende und zukünftige Rahmenbedingungen ist ein schwieriger Weg.

Ein Projektbeitrag seitens des Bundes ist ein sehr klares und gut vernehmbares Signal, dass die Investition von Politik und Verwaltung erwünscht ist und der Investor in Zukunft nicht im Regen der Marktöffnung stehen gelassen wird.

Indirekte Fördermassnahmen wie Information, Beratung, Medienarbeit, Fachtagungen usw. haben eine grosse Wirkung auf die Befindlichkeit der Branche.

Ausschlaggebend ist nicht die Wirtschaftlichkeit der Projekte, errechnet nach branchenüblichen Methoden und Parametern, sondern bei grösseren Projekten die **Finanzierbarkeit** durch Banken und Investoren, und bei kleineren Projekten der Idealismus der Initianten und Träger. Dabei liegen die langen Amortisationszeiten der Wasserkraftwerke völlig quer zum heutigen kurzfristigen Investitionsverhalten.

Die Branche der privaten Energieproduzenten erwartet vom Programm Kleinwasserkraftwerke Hilfen bezüglich der wachsenden Umweltauflagen für bestehende Anlagen und bei **Bewilligungsproblemen** von Reaktivierungen stillgelegter Kraftwerke.

Das bestehende Instrumentarium der Information & Beratung (Kurzberatung und Grobanalysen) und der Unterstützung von Vorstudien bewährt sich für die Unterstützung von Initianten und Projektträgern sehr. Es überbrückt Schwachpunkte von der Standortidentifikation über erste Analysen bis zu einer professionellen Vorstudie. Ist einmal eine Vorstudie erstellt, entwickelt das Projekt eine stärkere Eigendynamik, so dass weniger Hilfen notwendig sind. Auch Besitzer und Betreiber bestehender Anlagen erhalten Hilfen für das Studium der Erneuerung ihrer Anlagen und bei den vielfältigen möglichen Problemen. Es sollte deshalb beibehalten werden.

Das Instrumentarium konzentriert sich aus Budgetgründen auf die Reaktion auf Anfragen (Holprinzip). Im Bringprinzip (z.B. aktive Standortidentifikation und Motivation von potentiellen Bauherren) könnte nur bei wesentlich grösserem Budget gehandelt werden, da solche Aktionen angesichts der schlechten Zugänglichkeit der Zielgruppe sehr aufwendig sind. Die schlechte Zugänglichkeit beruht auf der räumlichen und sozialen Streuung (als potentielle Bauherren ist keine gesellschaftliche Gruppe oder eigentliche Branche ansprechbar) und auf der grossen zeitlichen Streu-

ung (lange Lebensdauer der Anlagen, Eigentumsfragen, Erbgänge, Abhängigkeit von der Renovation anderer Objekte usw.). Ausnahmen sind Trink- & Abwasserkraftwerke.

### PERSPEKTIVEN FÜR DAS JAHR 2000

Das Jahr 2000 wird vorerst keine Änderungen bringen. Die Ziele von 1999 werden weiterverfolgt. Das Programm Kleinwasserkraftwerke muss in der politisch **latenten Phase** der Beratung des Elektrizitätsmarktgesetzes ausgleichend wirken und die Szenarien mit oder ohne Förderabgabe vorbereiten.

Im nächsten Jahr wird mit Unterstützung seitens des Programmes Kleinwasserkraftwerke die **Zertifizierung von Ökostrom** beginnen. Es ist zu überlegen, welche weiteren Hilfen das Programm Kleinwasserkraftwerke den verschiedenen Marktteilnehmern bieten kann. Die Umweltzertifizierung soll realitätsnah geschehen und die Kostenspirale nicht weiter nach oben treiben. Ziel ist eine möglichst wissenschaftliche **Bilanz der Nachhaltigkeit**. Schwierig ist, die Seite des Nutzens der Kleinwasserkraftwerke für Umwelt und Gesellschaft einzubringen, und die Auswirkungen auf Landschaft und Gewässer gegenüber den ausgezeichneten Energie- und Stoffbilanzen richtig zu bewerten.

Die Aufnahme von Energie aus Kleinwasserkraftwerken in die **Ökostrombörsen** soll nicht nur wie heute eine Ausnahme bleiben. Zudem beschränken sich bis heute die meisten Angebote der Elektrizitätsverteilunternehmen auf *eigene* Kraftwerke. Es sollte zum Normalfall werden, dass auch Strom von unabhängigen privaten Produzenten angeboten wird. Dies wird die finanzielle Belastung der Elektrizitätsverteilunternehmen durch die Rücklieferariefregulierung im Energiegesetz vermindern.

Bei einem positiven Ausgang der Volksabstimmung über das **Förderabgabengesetz** wird das Programm Kleinwasserkraftwerke die entsprechenden Programmänderungen planen und insbesondere die Bedürfnisse der Branche ausloten.

Falls der zur Zeit im Entwurf zum Elektrizitätsmarktgesetz vorgesehene sofortige **Marktzugang** der Produzenten erneuerbarer Energien Realität wird, kann das Programm Vorabklärungen zur Unterstützung der Betreiber in den Fragen des **Stromverkaufs** unternehmen.

Die [Internet-Site](#) wird sukzessive für andere Sprachen ausgebaut. Die Westschweizer Version ist in Arbeit und soll im Jahr 2000 den vollen Inhalt der Deutschschweizer *website* spiegeln. In Italienisch werden Schlüsselinformationen für die Beitragsgesuche übersetzt, in Englisch wird eine Willkommenseite mit einigen Schlüsseltexten erstellt.

Die **Information & Beratung** wird weitergeführt. Es wird eine Beschleunigungsaktion für Abwasserkraftwerke gestartet. Der Zubau an Kleinwasserkraftwerken wird weiterhin registriert und die bestehenden Daten aktualisiert.

Als **P+D-Projekte** sind in erster Linie Abwasserkraftwerke in der Deutschschweiz und Innovationen für kleine Ultra-Niederdruck-Kraftwerke gesucht.

Mit Kompaktbau, einfacher Konstruktion und Montage, Baukasten- und Serienfertigung können in diesem Segment noch wesentliche Kostensenkungen erzielt werden. Vielversprechend sind in diesem Bereich die drehzahlvariable Ausführung anstelle mechanischer Regelungen (Umrichtertechnologie) und die Verwendung von neuen Materialien und Herstellverfahren.

## Referenzen

### INTERNETSEITEN:

- [1] *Internet-Site* des Programmes Kleinwasserkraftwerke: [www.smallhydro.ch](http://www.smallhydro.ch)
- [2] *Internet-Site* des Interessenverband Schweizerischer Kleinkraftwerk-Besitzer (ISKB): [www.iskb.ch](http://www.iskb.ch)
- [3] *Internet-Site* des Verfasser: <http://www.iteco.ch>

### BERICHTE:

- [4] Zuwachs Kleinstwasserkraftwerke bis 300 Kilowatt 1985 bis 1987, Presseauswertung und Umfrageergebnisse, Fredi Bieri und Hanspeter Leutwiler, Dezember 1998, ISKB und DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke.
- [5] *Internet-Site* des Programmes Kleinwasserkraftwerke ( [www.smallhydro.ch](http://www.smallhydro.ch) ): Prototyp; Realisierung und Betreuungsphase: Schlussbericht, ENTEC- *St. Gallen*
- [6] Vorstudienberichte \*)
- [7] Berichte P+D-Projekte \*)

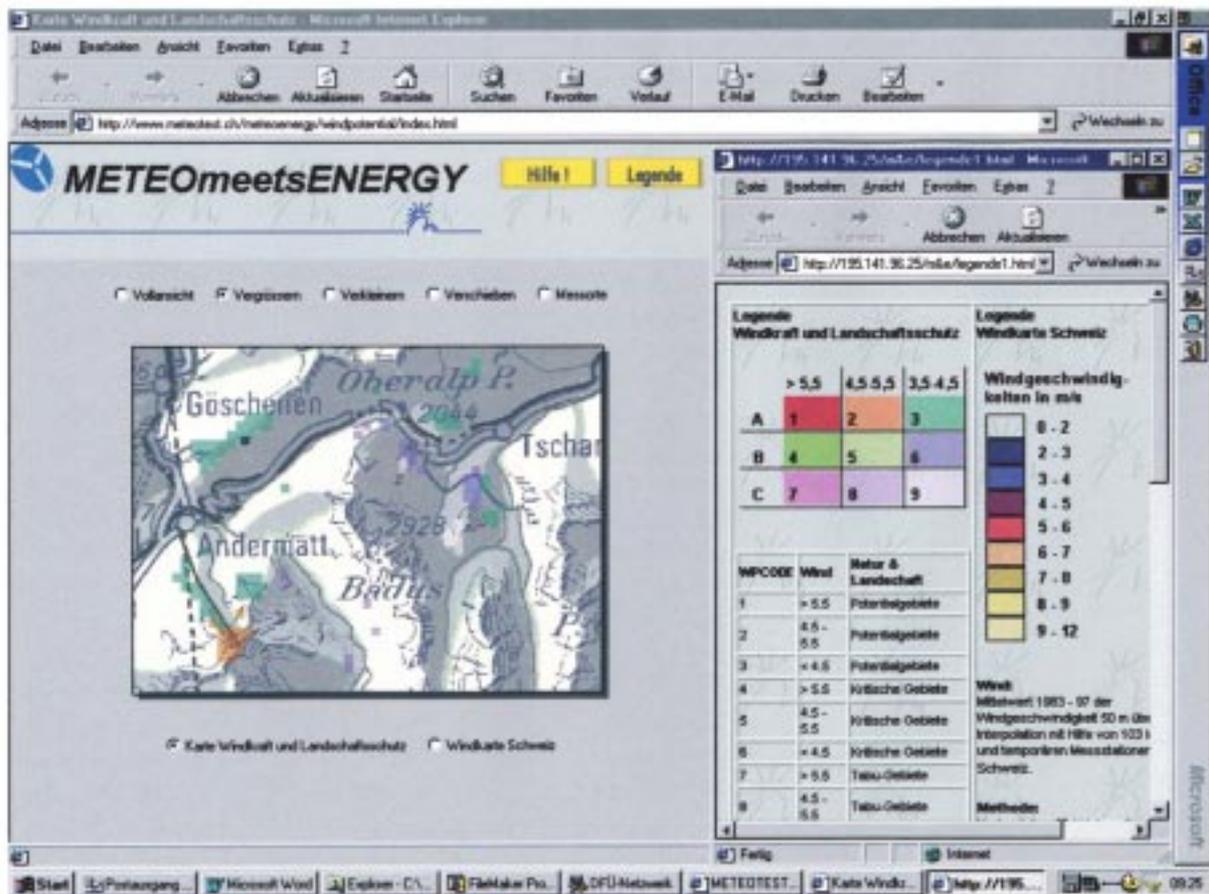
\*) Die Projektberichte der unterstützten Vorstudien, P+D-Anlagen sowie die Broschüren des DIANE-Projektes Klein-Wasserkraftwerke und des Projektes PACER Kleinwasserkraftwerke sind bei der E2000-P+D-Infostelle, erhältlich: [www.infoenergie.ch](http://www.infoenergie.ch)

## WINDENERGIENUTZUNG

Überblicksbericht  
zum P+D-Programm 1999

**Robert Horbaty**

[enco@spectraweb.ch](mailto:enco@spectraweb.ch)

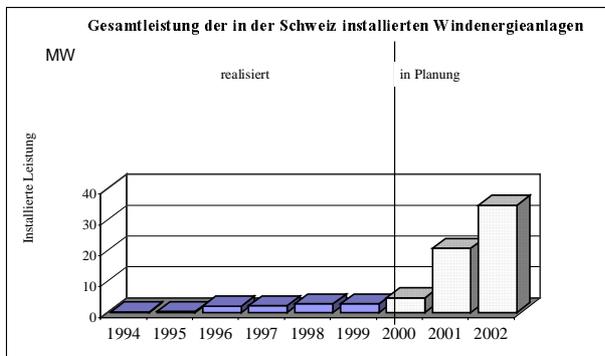


### Geeignete Gebiete zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz

Mögliche Standorte für die Installation von Windkraftanlagen (farbige Flächen) – mit den nächstliegenden bekannten Winddaten – sind heute unter für Planer und Projektentwickler [im Internet](#) einsehbar.

## Programmschwerpunkte

Ende 1999 waren Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 2.8 MW installiert, welche 3.3 GWh Elektrizität produzierten. Mit 0.42 W/Einwohner installierter Windenergieleistung liegt unser Land noch hinter Luxemburg auf dem drittletzten Platz aller europäi-



schen Länder. Ziel des Programms ist, die Energieproduktion aus Windenergie bis ins Jahr 2010 zu verzehnfachen und dann zumal rund 30 – 50 GWh Windelektrizität zu erzeugen. Vor dem Hintergrund der heute in Planung begriffenen Projekte eine durchaus realistische Zielsetzung.

Gute Standorte in der Schweiz liegen alle über 800 m ü.M. in hügeligem oder gebirgigem Gelände – mit entsprechend schwierigen Rahmenbedingungen wie Klima (Eis, Kälte), turbulentes Windregime, schlechte Erschliessung und Landschaftschutzproblematik. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass Windenergieanlagen aber auch unter diesen extremen Bedingungen betrieben

werden können, die Wirtschaftlichkeit der Projekte jedoch optimierbar ist. Das Windenergieprogramm des Bundes unterstützt deshalb mit verschiedenen Projekten (Leitfaden für Planer, Standortkarten mit Winddaten, Raumplanung, Fördermittel für Standortabklärungen, etc.) die Planer und Betreiber von Windenergieprojekten.

Die Schweizerische Windenergievereinigung *Suisse Eole* engagiert sich sowohl im Aufbau optimaler Rahmenbedingungen zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz, als auch in der Verbreitung objektiver Informationen über diverse Kommunikationskanäle.

Im Jahr 1999 waren die Schwerpunkte:

- Standortabklärungen für Anlagen mit einer Gesamtleistungen von 10 MW.
- Schaffen von optimalen Rahmenbedingungen zur Errichtung von Anlagen an positiv evaluierten Standorten.
- Vertiefung des Themas Windenergienutzung und Landschaftsschutz mit allen Betroffenen.
- Alle marktbezogenen Aktivitäten des Programms (z.B. Information, Tagungen, Publikationen, Internet, etc.) sollen über die *Suisse Eole* abgewickelt werden als Actor-Netzwerk im Rahmen des Ressorts Regenerierbare Energien von Energie 2000.
- Intensivierung der "Ökostrom-Strategie", dem Direktabsatz von (teurerem) Windstrom an engagierte Kunden.

## Aktivitäten

### STANDORTABKLÄRUNGEN

Ausgehend vom Planungsansatz aus einer **Potenzialstudie** [25] entstand ein detaillierter **Leitfaden** [14] für die Planung und Installation von Windkraftanlagen in der Schweiz. Da sowohl das BUWAL, das Amt für Raumplanung und die Stiftung für Landschaftsschutz aktiv an der Ausarbeitung dieses Handbuchs mitgearbeitet haben, ist sichergestellt, dass zukünftige Windenergieprojekte in Übereinstimmung mit den Anliegen des Landschaftsschutzes entwickelt werden. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Windenergie-Institut wird interessierten Planern nun ein entsprechender **Kurs zur Nutzung der Windenergie** [16b] in der Schweiz angeboten.

In den zur Erarbeitung der erwähnten **Potenzialstudie** [25] erstellten **Landkarten** [17] sind mögliche Standorte für Windkraftanlagen – geordnet nach mittleren Windgeschwindigkeiten und Landschaftschuttkriterien – farbig dargestellt. Ursprünglich als rein internes Arbeitsinstrument gedacht, werden diese Karten nun vielfältig eingesetzt.

Interessierte Planer und Betreiber von Windenergieanlagen finden dadurch gezielt geeignete Standorte. Dies führte dazu, dass das Bundesamt für Energie heute Ab-

klärungen an 12 Standorten unterstützt – mit einer möglichen Kapazität von ca. 30 MW. Nebst den Standorten im Kanton Neuenburg (siehe unten) sind dies: **Schaber** [1], **Feldmoos** [4], **Flumserberg** [6], **Windpark Sainte-Croix** [15], **Arosler Weisshorn** [18], **Montagne de Moutier** [21], **Linthebene** [24]. Mit diesen Studien wird konkret die Machbarkeit von Windkraftprojekten fundiert abgeklärt:

- Erschliessung (Elektrizität, Zuwege)
- Windressourcen (Windmessungen, Hochrechnungen auf langjährige Verhältnisse)
- Umweltverträglichkeit
- Wirtschaftlichkeit (möglicher Energieertrag und Finanzierung).

Der Kanton Neuenburg hat mit einem exemplarischen Planungsverfahren aus ursprünglich 20 Standorten fünf geeignete Gebiete ausgeschieden, welche in einem Ausschreibungsverfahren interessierten Planern angeboten wurden. An folgenden Standorten laufen momentan vertiefte Abklärungen zur Installation von Windkraftanlagen: **Grand Pradières** [2b], **La Racine** [2c], **Vue des Alpes** [8], **Grand-Coeurie et Montagne-de-Buttes** [20].

In allen Kantonen mit wesentlichen Potenzialgebieten wurden den zuständigen Ämtern (Energiefachstelle, Raumplanung, Natur- und Landschaftschutz) **Karten** zur Stellungnahme [17] vorgelegt. Entsprechende Aussagen sind im "**Leitfaden für die Windenergienutzung in der Schweiz**" [14] aufgeführt. Im Rahmen kantonaler Richtplanungen kann damit – analog dem Kanton Neuenburg – die Nutzung der Windenergie nun weiter behandelt werden.

Auf dem Internet (unter <http://www.suisse-eole.ch/d/Service/Default.htm>) sind einerseits die Potenzialkarten einsehbar, andererseits werden alle für die Windenergie relevanten Messdaten laufend nachgeführt. Zusammen mit den im Zusammenhang mit Standortabklärungen ermittelten Winddaten entsteht dadurch eine eigentliche **Windenergie-Datenbank Schweiz** [14b].

### **Arbeitsinstrument: $V^3$ -Toolbox [14 c]**

Bis anhin wurde in schweizerischen Standortanalysen einzig auf Messungen und Korrelationsrechnungen abgestellt (MCP: *Measure Correlate Predict-Methode*), um für Windkraftanlagen Schätzungen des Windpotenzials durchzuführen. Für die Verteilung der Windgeschwindigkeit wurden unspezifische Anpassungsfunktionen der Weibullverteilungen verwendet. Indem die Funktionen an die Bedürfnisse der Windenergienutzung (Abhängigkeit von  $V^3$ ) angepasst würden, könnten bessere Verteilungsschätzungen vorgenommen werden. Da die Windenergie proportional der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ist, sollen nun spezifische Tools geschaffen werden, welche diesem Umstand angepasst sind, eben die *V3-Toolbox*.

Das Hauptziel dieses Projekts ist es, die Fehler der bestehenden Modelle für die Vorhersage der Windenergieproduktion in komplexer Topografie zu analysieren, diese Modelle zu verbessern und neue Werkzeuge zu erstellen. In diesem Sinn soll es die Planungssicherheit im Bereich *Resource Assessment* erhöhen, Möglichkeiten zu einer kostengünstigeren Planung aufzeigen und klare Empfehlungen zur Frage Modellierung und/oder Messung abgeben. Die Ergebnisse des Projekts werden im Rahmen eines Modellierungworkshops (möglichst unter internationaler Beteiligung) Planern, Fachleuten und Investoren vorgestellt. Dies garantiert eine gute Einbindung in den aktuellen Stand des Wissens und eine optimale praktische Umsetzung.

### **BETRIEBSERFAHRUNGEN**

Aufgrund des sehr windreichen Dezembers (Orkan "Lothar") erzeugten die schweizerischen Windenergieanlagen im Jahr 1999 mit **3.3 GWh** rund 21% mehr Elektrizität als 1998. Mit 1'400 Volllaststunden liegt das Ergebnis des **Windparks Mont-Crosin** der JUVENT [26] in derselben Grössenordnung wie vergleichbare Anlagen in anderen Binnenländern.

Auf dem **Titlis** [9] betreibt das Elektrizitätswerk Nidwalden die höchst gelegene Windkraftanlage Europas. Aufgrund diverser Pannen (defekte Verschalung, zer-

störte Messeinrichtungen) und den sehr stark turbulenten Winden liegt die Energieproduktion an diesem Standort nach wie vor deutlich unter den Erwartungen.

Nachdem die Anlage auf dem **Simplon** [11] wegen Umbauarbeiten an der Infrastruktur während gut eines halben Jahr stillgelegt war, ist sie nun wieder am Netz – betreut von der Hochschule für Technik des Kantons Wallis.

Die ARGE AVENTA entwickelt im Auftrag des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich und einiger Kantone eine **Leichtwindanlage mit kleiner Leistung**. Die Standortabklärungen sowie die messtechnische Erfassung der Performance dieser Anlage [5] werden durch das Programm Wind des Bundes gefördert – inkl. **fachtechnische Begleitung** [12a].

### **RAHMENBEDINGUNGEN**

#### **a) Neue Akteure**

Viele der möglichen Standorte für Windkraftanlagen liegen in touristisch gut erschlossenen Berggebieten oder Gebieten, welche bäuerlich genutzt werden. Windkraftanlagen dort zu installieren, wo die nötige Infrastruktur wie Erschliessungsstrassen, Trafostationen, evtl. einfache Seilbahneinrichtungen u.a. bereits vorhanden ist und mitgenutzt werden kann, ist vordringlich, um eine genügende Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Auch bei ausgebauten Alpanlagen können diese Voraussetzungen gegeben sein. Alpgenossenschaften u.ä. können die Windkraftanlagen entweder selber finanzieren und betreiben, oder nur den Standort gegen Entgelt zur Verfügung stellen und allenfalls gewisse Betreiberaufgaben übernehmen. Entsprechend ausgebildete Bauern können Arbeiten bei der Erstellung von Anlagen (Aushub, Fundamente, Transport, Montagebeihilfe, etc.) sowie für deren Betrieb, Wartung und Unterhalt übernehmen.

In Gebieten mit Seilbahneinrichtungen wird zudem durch eine Windkraftanlage das Landschaftsbild in der Regel wenig beeinflusst. Weiter könnten Skigebiete mit ausgedehnten Beschneiungsanlagen mittelfristig Interesse daran haben, ihre Strombeschaffung aus Imagegründen zu ökologisieren. Teile des notwendigen Elektrizitätsbedarfs könnten durch Windstrom abgedeckt werden.

Mit den vorliegenden Projekten **Windkraftanlagen in Tourismusgebieten** [23a] und in der **Berglandwirtschaft** [23b] soll einerseits zuverlässig erhoben werden, ob mit einem vernünftigen Initialisierungsaufwand Anlagen zu realisieren sind und ob in dieser Sache die Seilbahnbetreiber und die bäuerlichen Organisationen breit angegangen werden sollen. Andererseits sollen bereits in der Phase dieser Vorabklärungen zwei bis vier geeignete Standorte gefunden werden, an welchen durch das BFE mitfinanzierte Machbarkeitsstudien später durchgeführt werden können.

## b) Suisse Eole

Mit der Gründung der schweizerischen Vereinigung zur Förderung der Windenergie *Suisse Eole* im Jahr 1998 hat sich die Windenergie auch auf der energiepolitischen Ebene eine Plattform geschaffen. Ende 1999 waren 55 Personen, Institutionen oder Organisationen Mitglied von *Suisse Eole*. Sie ist heute ein Actor-Netzwerk innerhalb des Ressorts Regenerierbare Energien von Energie 2000 und ist im Vorstand der Agentur für erneuerbare Energien AEE und dem Verein für umweltgerechte Elektrizität vertreten.

Die marktorientierten Aktivitäten und Massnahmen des Programms Wind werden – im Rahmen des Ressort Regenerierbare Energien von Energie 2000 – durch *Suisse Eole* wahrgenommen. Nachfolgend sind die **Schwerpunkte** als Aktivitäten, bzw. Projekte ausformuliert:

Mit der Weiterführung von je einer **Infostelle in der Deutschschweiz** [16a] und in der **Romandie** [19a] werden eigentliche Kompetenzzentren zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz – als Ansprechpartner für Planer, Behörden, Windstromproduzenten und -kunden sowie die breite Öffentlichkeit – weiter aufgebaut.

Im Auftrag und in Abstimmung mit *Suisse Eole Information* werden im Bereich Medienarbeit, **Kommunikationsmassnahmen** [10] und **Internet** [22] diverse Dienstleistungen erbracht. Zwei *Newsletters* und ein Argumentarium zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz wurden veröffentlicht; zusammen mit den zuständigen Kantonen werden Informationen für Projekt im **Arc jurassien** [19b] erstellt.

Ausgehend von einer detaillierten Marktanalyse wird in Zusammenarbeit mit den 30 grösseren Elektrizitätswer-

ken und den kantonalen Energiefachstellen, mit Schwergewicht in der Romandie, eine Strategie zur **Vermarktung von "Öko-" bzw. Windstrom** [13] entwickelt.

Ausarbeitung einer **Marketingstrategie** [3] für die Nutzung der Windenergie in der Schweiz. Darstellung der Zielgruppen, Erarbeitung der strategischen Ziele, Positionierung der Windenergievereinigung *Suisse Eole* und Definition der Aufgaben- und Verantwortlichkeiten.



**Publikation von Suisse Eole:**  
"15 Argumente zur Nutzung der Windenergie"

## Nationale und Internationale Zusammenarbeit

Mit der Windenergievereinigung *Suisse Eole* ist es gelungen, alle relevanten Anliegen der Windenergienutzung in der Schweiz zu konzentrieren. So wurde beispielsweise im Rahmen des Projekts **Sainte-Croix** [15] für den Projektnehmer Dienstleistungen im Bereich Kommunikation erbracht; in Zusammenarbeit mit dem Kanton, der Gemeinde und der Service Info von *Suisse Eole*. Die **Kommunikationsaufgaben** für die Projekte im Kanton Neuenburg werden durch *Suisse Eole* durchgeführt und koordiniert – in Absprache mit der kantonalen Energiefachstelle und den Planern [19b].

Zum Thema Windenergie und Landschaftsschutz wird eine enge Zusammenarbeit mit den Umweltorganisationen gepflegt, die sich denn auch generell positiv zur Nutzung der Windenergie äussern. Bei aus landschaftschützerischen Aspekten kritischen Projekten findet bereits vor Beginn der Aktivitäten eine informelle Vernehmlassung beim BUWAL und der Stiftung für Landschaftsschutz statt.

Der "Verein für umweltgerechte Elektrizität" erarbeitet heute Kriterien zur Zertifizierung von "Ökostrom". Dies stellt sicher, dass engagierte Stromkunden, welche be-

reit sind für ein ökologisches Stromprodukt mehr zu bezahlen, auch die entsprechenden Dienstleistungen erhalten. Mit der Einsitznahme im Vorstand dieser Organisation durch die Programmleitung Wind können die Interessen der neuen erneuerbaren Energien im Allgemeinen und der Windenergie im Speziellen optimal eingebracht werden.

Die Förderung der Windenergie ist auch ein Thema innerhalb der Strategiediskussion des BFE betreffend des Nachfolgeprogramms von Energie 2000 und den Aktivitäten nach einer allfälligen Annahme des Förderabgabegesetzes. Basierend auf einer Recherche der **Windenergieförderung** [12b] in den übrigen Ländern in Europa gelang es, wichtige Inputs in diese Diskussion einzubringen.

Als Weiterführung des EU-Forschungsprojekts "**WE-CO**" (*Wind Energy in Cold Climate*) [27] 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. In

der Schweiz sollen v.a. die entsprechenden Tools getestet und optimiert werden. Ein definitiver Entscheid ist noch ausstehend.

Im Rahmen eines gemeinsamen ALTENER-Forschungsprojekts – mit österreichischen und deutschen Partnern – sollen die Möglichkeiten des Einsatzes von Windenergieanlagen in Skigebieten untersucht werden. Insbesondere auch im Zusammenhang mit dem Einsatz von Schneekanonen. Auch hier liegt noch kein Entscheid vor.

Das Programm Wind erhielt die Möglichkeit, an folgenden Veranstaltungen den Stand der Windenergieentwicklung in der Schweiz zu präsentieren:

- Europäische Windenergiekonferenz in Nizza, F
- Kongress erneuerbare Energien in Böblingen, D
- Windenergieseminar in St. Pölten, A
- Es bestehen gegenseitige Mitgliedschaften von *Suisse Eole* mit der Deutschen Windenergievereinigung und der Fördergesellschaft für erneuerbare Energien in Freiburg, D.

## Bewertung

Mit dem Abschluss der Arbeiten am Leitfaden, der Präsentation der Potenzialkarten bei den Kantonen, dem Aufschalten dieser Karten auf das Internet und den Arbeitsinstrumenten der *V<sup>3</sup>-Toolbox* sind nun im umfassenden Sinn Planungsunterlagen zur Projektentwicklung vorhanden. Konkretes Resultat sind denn auch die rund 30 MW, welche – ein reibungsloser Planungsprozess vorausgesetzt – bis ins Jahr 2002 installiert werden könnten.

Das Beispiel Sainte-Croix zeigt jedoch, dass die Realisierung von entsprechenden Projekten leider aufwändiger sein wird als ursprünglich geplant. Obwohl alle nationalen Umweltorganisationen die Installation von Windenergieanlagen – auf der Basis der mit ihnen gemeinsam erarbeiteten Planungsgrundlagen – befürworten, gibt es teilweise **lokale Opposition** gegen diese Projekte.

Eine umweltliberale Bewegung hat sich zudem offensichtlich zum Ziel gesetzt, mit fadenscheinigen Argumenten sämtliche Windenergieprojekte in der Schweiz zu verhindern. Es ist deshalb von immenser Bedeutung, dass bei allen Projekten die direkt Betroffenen in den Planungsprozess integriert und von Beginn weg eine konsequente Kommunikationsarbeit gemacht wird. *Suisse Eole* erhält in diesem Zusammenhang eine zusätzliche Bedeutung.

Aufgrund der politischen Störmanöver seitens dieser Opposition wird die Windenergie im **Förderabgabegesetz** (FAG) nun nicht unter "insbesondere gefördert werden ..." aufgeführt. Da es sich bei der Windenergie aber ebenfalls um erneuerbare Energien handelt, ist eine

Förderung der Windenergie im Rahmen des FAG durchaus möglich. Entsprechende Äusserungen in den beiden Räten gingen klar in diese Richtung. Nicht möglich ist jedoch ein eigentliches "Schwerpunktprogramm Windenergie" durch den Bund.

Angesichts der hohen Akzeptanz der **Strommarktliberalisierung** muss davon ausgegangen werden, dass sich die Rahmenbedingungen in der Versorgung mit leitungsgebundenen Energieträgern massiv verändern werden. Das zukünftige Wachstum des Windenergiemarkts – und damit eine nachhaltige, volkswirtschaftlich sinnvolle Stromproduktion – wird auch in der Schweiz stark davon abhängen, inwieweit der politische Konsens zur Förderung von erneuerbaren Energien sich auch in einem liberalisierten Umfeld noch durchsetzen lässt. Modelle wie garantierte Rücklieferatarife, "Ökostrom" und nicht diskriminierender Marktzutritt für unabhängige Stromproduzenten werden im Rahmen der Debatte zum Elektrizitätsmarktgesetz wohl neu beurteilt werden.

Die momentan grosse Verunsicherungen zur weiteren Entwicklung und der einzuschlagenden Strategien führen seitens der Elektrizitätswirtschaft zu grosser Zurückhaltung bezüglich neuer stromproduzierenden Anlagen. Das **Fehlen von klaren Verkaufsbedingungen** über einen längeren Zeitraum für dezentral erzeugte Elektrizität ist für Investoren jedoch absolut unmöglich, d.h. Projekte im weit fortgeschrittenen Planungsstadium werden in naher Zukunft wohl kaum realisiert werden. Die Programmleitung Wind hat an verschiedenen Anlässen vielfach auf diesen Zusammenhang hingewiesen.

## Ausblick 2000

Das Schwergewicht der Aktivitäten für das Jahr 2000 liegt in der Realisierung der nun baureifen Projekte, dies sind: v.a. Gütsch, Flumserberg, Montagne de Moutier und Feldmoos. Nach dem Entscheid des Regierungsrats des Kantons Waadt, das Projekt Sainte-Croix weiter zu verfolgen, wird auch dieses Vorhaben nun mit einem neuen Partner fortgesetzt.

Auch wenn in der Schweiz keine Windkraftanlagen gebaut werden, so sind mittlerweile diverse Betriebe in der Entwicklung und den Vertrieb von einzelnen Kom-

ponenten engagiert. Seitens der Elektrotechnikbranche (Leitungselektronik und Generatorenbau) wurde der Ruf nach einer Testanlage laut, mit welcher entsprechende Bauteile getestet werden könnten. Es soll nun versucht werden, an einem der erwähnten Standorte eine entsprechende Installation zu realisieren. Darüber hinaus hat sich eine Firma in der Schweiz angesiedelt, welche ein neuartiges Rotorblatt entwickeln will, und Prototypen von eisfreien Anemometer sind in Erprobung.

Auf der energiepolitischen Ebene wird die Abstimmung über die ökologische Steuerreform und das Förderabgabegesetz wichtige Weichen stellen. Mit dem Elektrizitätsmarktgesetz müssen die notwendigen Rahmenbedingungen geschaffen werden, (z.B. unmittelbarer

Marktzutritt für neue erneuerbare Energien, Übernahme der Rückspeisvergütung durch eine nationale Netzgesellschaft) damit nun die planungsreifen Windenergieprojekte zügig realisiert werden können.

## Projektliste und Referenzen

- [1] B. Liesch, ADEV, Bern: *Windmessungen Schaber* (SB)
- [2] ADEV, *Liestal: a) Mess- und Dok-Programm* (SB) • *b) Grand Pradières* (JB) • *c) La Racine* (JB) / [http://www.adevsolarstrom.ch/fr\\_adevgruppe.htm](http://www.adevsolarstrom.ch/fr_adevgruppe.htm) / [info@adevsolarstrom.ch](mailto:info@adevsolarstrom.ch)
- [3] AHA, MARKETING, Basel: *Erarbeitung eines Marketingkonzeptes Windenergie* (JB) / [aha@magnet.ch](mailto:aha@magnet.ch)
- [4] R. AREGGER, Rengg: *Windmessungen Feldmoos* (SB) / [aregger\\_feldmoos@freesurf.ch](mailto:aregger_feldmoos@freesurf.ch)
- [5] P. Krüsi, ARGE AVENTA, Schlieren: *Standortabklärungen und Messprojekt Leichtwindanlage AVENTA* (JB)
- [6] C+N, St.Gallen: *Windpark Flumserberg* (JB) / [c-n.ingenieure@gmx.ch](mailto:c-n.ingenieure@gmx.ch)
- [7] ENCO, Langenbruck: *Programmleitung Wind* (JB) / <http://www.enco-gmbh.ch> / [enco@spectraweb.ch](mailto:enco@spectraweb.ch)
- [8] EOLE TECHNOLOGIE, France: *Vue des Alpes* (JB) / [eole.tech@wanadoo.fr](mailto:eole.tech@wanadoo.fr)
- [9] EW-NIDWALDEN, Stans: *WKA Hochgebirge Titlis* (JB) / [k.odermatt@ewn.ch](mailto:k.odermatt@ewn.ch)
- [10] GT.VENT, Biel: *S-Eole: Medien/Kommunikation* (JB) / [august@pflugger.ch](mailto:august@pflugger.ch)
- [11] EIV, Sion: *Wartung Windkraftanlage Simplon* (SB)
- [12] INTERWIND, Zürich: *a) Begleitung Leichtwindanlage AVENTA* (JB) • *b) Windenergienutzung in europäischen Ländern* (SB) / <http://www.interwind.ch/> / [INTERWIND@compuserve.com](mailto:INTERWIND@compuserve.com)
- [13] MEDICTIF, Vevey: *Marktuntersuchung Vermarktung Windstrom* (SB) / [mediactif@swissonline.ch](mailto:mediactif@swissonline.ch)
- [14] METEOTEST, Bern: *a) Übersetzung Handbuch* (SB) • *b) Datenbank Wind* (JB) • *c) V<sup>3</sup>-Toolbox* (JB) / <http://www.meteotest.ch> / [kunz@meteotest.ch](mailto:kunz@meteotest.ch)
- [15] MUNICIPALITÉ, Sainte-Croix: *Windpark Ste. Croix* (SB) / <http://www.interwind.ch/> / [INTERWIND@compuserve.com](mailto:INTERWIND@compuserve.com)
- [16] NOVA ENERGIE, Aarau: *a) Infostelle Wind DCH* (JB) • *b) Aus- und Weiterbildungskurse im Bereich Windenergie* (JB) / <http://www.novaenergie.ch/> / [herbert.moesch@infoenergie.ch](mailto:herbert.moesch@infoenergie.ch)
- [17] OEKOSKOP, Gelterkinden: *Vorst. Karte Windkraft+Landschaftschutz* (SB) / <http://www.oekoskop.ch/> / [oekoskop@oekoskop.ch](mailto:oekoskop@oekoskop.ch)
- [18] OEKOPLAN, Zürich: *Standortabklärungen Arosler Weisshorn* (JB) / [mzabelka@access.ch](mailto:mzabelka@access.ch)
- [19] PLANAIR, La Sagne: *a) Eole-Info* (JB) • *b) Communication Arc jurassien* (JB) / [info@planair.ch](mailto:info@planair.ch)
- [20] RENEWABLE ENERGY SYSTEMS (U.K.): *Projets Eoliennes Grand-Coeurie et Montagne-de-Buttes* (JB) / <http://www.res-ltd.com/> / [william.hopkins@res-ltd.com](mailto:william.hopkins@res-ltd.com)
- [21] A. Barthe, SERVICES TECHNIQUES, Moutier: *Montagne de Moutier* (SB)
- [22] M. STALDER, Hauptikon: *Erweiterung Homepage Suisse Eole* (JB) / [m.stalder@energienetz.ch](mailto:m.stalder@energienetz.ch)
- [23] WEISSKOPF PARTNERS, Zürich: *a) Windkraftanlagen in Tourismusgebieten* (JB) • *b) Windkraftanlagen in bäuerlich genutzten Berggebieten* (JB) / [weisskopf.thomas@bluewin.ch](mailto:weisskopf.thomas@bluewin.ch)
- [24] WINDKRAFT, Zürich: *Machbarkeitsstudie Windenergie Linthebene* (SB) / [windcraft@anasys.ch](mailto:windcraft@anasys.ch)
- [25] METEOTEST, ÖKOSKOP, Bern und Gelterkinden: *Windkraft und Landschaftschutz* (SB) 1997 / <http://www.meteotest.ch> / [kunz@meteotest.ch](mailto:kunz@meteotest.ch) / <http://www.oekoskop.ch> / [oekoskop@oekoskop.ch](mailto:oekoskop@oekoskop.ch)
- [26] JUVENT, Bern: *Mont Crosin* (SB) 1998 / <http://www.juvent.ch> / [jakob.vollenweider@bkw-fmb.ch](mailto:jakob.vollenweider@bkw-fmb.ch)
- [27] ENCO, Langenbruck: *Projektleitung WECO Schweiz* (SB) / <http://www.enco-gmbh.ch/> / [enco@spectraweb.ch](mailto:enco@spectraweb.ch)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden  
 (SB) Schlussbericht vorhanden

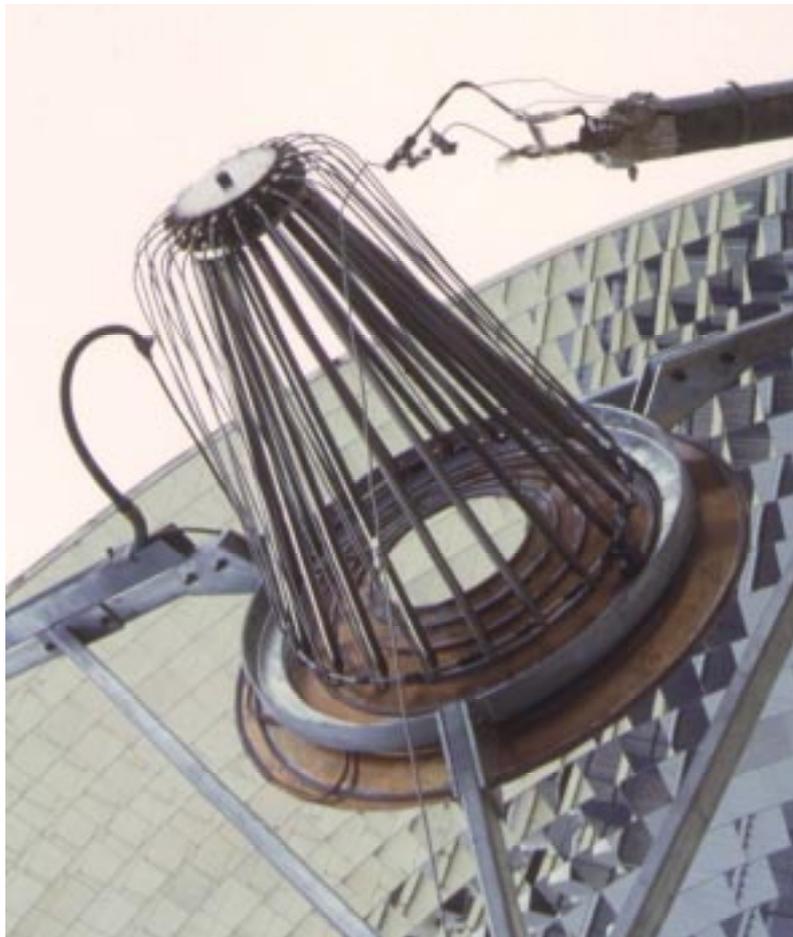
## SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Armin Reller**

[armin.reller@physik.uni-augsburg.de](mailto:armin.reller@physik.uni-augsburg.de)

---



### Spaltung von Ammoniak

Dieser  $12 \text{ kW}_{\text{chem}}$  Solarreaktor läuft an der *Australian National University*. Die Schweiz ist massgeblich am Projekt beteiligt. Es wurde mit dem PREIS FÜR TECHNISCHE INNOVATIONEN 1999 der *Institution of Engineers*, Australien, ausgezeichnet.

## Programm-Schwerpunkte

Leitziel des Programms **Solarchemie / Wasserstoff** ist es, regenerative Energieformen, insbesondere direkte Solarstrahlung, möglichst effizient und wirtschaftlich in technisch nutzbare Prozessenergie oder chemische Energieträger wie Wasserstoff, Methanol, Metalle umzuwandeln und damit langfristig zu einer Reduktion der Nutzung fossiler Energieträger und der Kohlendioxidemissionen beizutragen. Es werden nicht nur grundlagenwissenschaftliche, sondern auch praxisnahe Projektarbeiten ausgeführt, die in absehbaren Zeiträumen realisierbar sind. Im Programm werden Prozesse entwickelt bei denen ein wesentlicher Anteil der eingesetzten Energie durch direkte Solarstrahlung und/oder in Kombination mit gespeicherter Solarenergie z. B. in Form von Biomasse oder Biogas abgedeckt wird. Die Programmziele sollen dadurch erreicht werden, dass neben solarer Prozesswärme für unterschiedliche Anwendungen Wasserstoff als regenerativer Energieträger mittels solarthermischer oder photoelektrochemischer Wasserspaltung bereitgestellt wird. Zusätzlich soll die direkte solarthermische und/oder

solarchemische Erzeugung von technisch nutzbaren Grundstoffen, Materialien und Produkten vorangetrieben werden. Der Integration von solaren Produkten und Prozessen in bestehende Energiesysteme wird grosse Bedeutung beigemessen. Konkrete Forschungs- und Entwicklungsziele werden durch "Allianzen" zwischen Hochschul- und Industriepartnern in synergetischer Weise koordiniert. Es muss festgehalten werden, dass die Bedeutung der Materialwissenschaften für ein zukunftsfähiges Stoff- und Energiemanagement stark zunimmt. Dies erfordert, dass die zum Einsatz kommenden Materialien, aber auch die erzeugten chemischen Energieträger und Produkte in eine Stoffkreislaufwirtschaft integriert werden können. Die begleitende Öffentlichkeitsarbeit soll verstärkt werden, indem themenbezogene Bestandsaufnahmen als unabdingbare Entscheidungsgrundlage für die Aufnahme neuer Projekte erstellt, und die Resultate mittels Medienprojekten und weiteren Kommunikationsmitteln einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden.

## Ergebnisse 1999

### PROZESSWÄRME

Das Projekt **ABSORBER 2000** [1] wurde im vergangenen Jahr erfolgreich abgeschlossen, indem die industrielle Fertigung – d.h. Sputterbeschichtung mit variiertem Plasmapotenzial von Kupferblechen mit a-CH:Cr – durch die Firma IKARUS SOLAR, Kempten, (D) aufgenommen wurde. Die vom BFE geförderten Arbeiten zur Optimierung der im Solarabsorber eingesetzten Funktionsmaterialien wurden mit dem ETG INNOVATIONSPREIS 1999 ausgezeichnet. Die Weiterentwicklung der zentralen Funktionseinheit – d.h. der selektiv absorbierenden Schicht – wurde vorangetrieben, indem anstelle von Chrom z.B. das umweltverträglichere Titan eingesetzt wurde. Darüber hinaus wurden entscheidende Verbesserungen des Absorptionsverhaltens durch die gezielte Strukturierung der Oberfläche im Nanometerbereich erzielt. Für die Erzeugung von Prozesstemperaturen oberhalb 100 °C wurden ebenfalls selektiv arbeitende keramische Schichten hergestellt. Aufgrund der Situation, dass patentrechtliche Verfahren laufen, können an dieser Stelle keine detaillierten Angaben über die Qualität und Effizienz der verfügbaren Absorberschichten gemacht werden.

Das internationale P+D-Projekt zur Entwicklung eines **24-Stunden-Solarkraftwerks** wurde abgeschlossen [2]. Es konnte demonstriert werden, dass mit dem reversibel arbeitenden Haber-Bosch-Verfahren die endotherme Spaltung von Ammoniak im Solarreaktor als

Tagreaktion, die Bildung von Ammoniak aus dem erzeugten, speicherbaren Wasserstoff/Stickstoff-Gemisch als Nachtreaktion eingesetzt werden kann. Das aus Industrie- und Universitätspartnern zusammengesetzte Projektteam konnte die technische Realisierung dieses Konzepts eindeutig belegen, indem beinahe durchwegs auf technisch erprobte Komponenten, Materialien und Prozesse zurückgegriffen wurde. Es wurden ein 12 kW chemischer Ammoniakspaltreaktor, ein Rohr-in-Rohr-Gegenstrom-Wärmetauscher, ein Ammoniaksyntheserohrbündelreaktor sowie zwei 20-Liter Röhrendruckspeicher und eine Massenstromregelung konstruiert und erfolgreich zum Gesamtsystem vereinigt. Die ersten Erfahrungen zeigten, dass das gewählte Konzept dem solarüblichen Transientenbetrieb in optimaler Weise entgegenkommt. Kostenschätzungen zufolge könnte für ein Kraftwerk mit einer Leistung von 10 MW<sup>elektrisch</sup> – als Standort steht Zentralaustralien zur Diskussion – mit Stromgestehungskosten von unter 20 Rappen pro Kilowattstunde gerechnet werden. Da in einigen Ländern – wie z.B. in Australien oder den USA – jetzt schon regenerative Energieträger bzw. Systeme durch finanzielle Unterstützung oder zumindest durch fiskalische Vorteile gefördert werden, ist der weiteren Entwicklung dieses Projekts mit Spannung entgegenzusehen.

Im Projekt **KEREK** [3] wurde ein volumetrischer Kleinreceiver weiter optimiert, der es erlaubt, durch ihn strömende Luft auf 800 °C zu erwärmen. Durch

entsprechende Wärmetauschersysteme wird die im Medium Luft gespeicherte Energie als Prozesswärme transportiert und zur Erzeugung chemischer Energieträger, elektrischer und/oder mechanischer Energie eingesetzt werden. Indem die Massen des Reaktors erheblich reduziert, dementsprechend auch seine thermische Trägheit verringert wurden, konnten gute Erfolge erzielt werden. Kritisches Funktionselement ist das die konzentrierte Solarstrahlung absorbierende Drahtgestrick, an dem die Energie an die durchströmende Luft übertragen wird. Für die geplanten Versuche im Solarofen wurden Stahldrahtgestricke mit Siliciumcarbid und Manganoxid beschichtet. Damit soll das Absorptionsvermögen gesteigert werden. Die notwendige mechanische Flexibilität des Materials bleibt trotz der im Solarofen herrschenden extremen Temperaturfeldern bzw. Temperaturgradienten erhalten.

Für das P+D-Projekt **Kleinwärmepumpen mit Ammoniak** wurden weitere Schritte zur Optimierung des patentierten Sicherheitssystems unternommen: das zu Beginn in Form loser Schüttungen eingesetzte Material – im Fall von Leckagen bindet es austretendes Ammoniak – wurde auf verschiedene Trägerstrukturen aufgebracht, die eine hohe Oberfläche, aber auch eine genügende Wärmeabfuhr garantieren. Das Einsatzpotenzial dieses Sicherheitssystems soll für Wärmepumpe und für Kühlanlagen, insbesondere aber für unterschiedliche, solar betriebene Energiesysteme geprüft werden [4].

Solare Prozesswärme in unterschiedlichen Temperaturbereichen sowie entsprechende verfahrenstechnische Komponenten wurden vom Programmleiter mit Regierungsstellen und interessierten Unternehmen für den Einsatz in sonnenreichen Ländern diskutiert. Es besteht ein grosses Interesse zur Verwendung derartiger Systeme, nicht nur für die Warmwasseraufbereitung, sondern auch für vielfältige Einsatzmöglichkeiten wie der Trocknung von Gewürzen, Nahrungsmitteln und anderen Agrarprodukten. Zusammen mit der Firma BOMIN-SOLAR wird auch daran gearbeitet, solare Pumpen (langsam arbeitende Stirlingmaschine) für den praktischen Einsatz zu fertigen.

## CHEMISCHE ENERGIETRÄGER UND TECHNISCH NUTZBARE MATERIALIEN

Eines der Hauptziele des Programms besteht in der direkten und effizienten Umwandlung von Sonnenenergie in speicherfähige und transportierbare chemische Energieträger. Während mit photoelektrochemisch arbeitenden Systemen durch Wasserspaltung direkt Wasserstoff erzeugt werden kann (siehe Kapitel Wasserstoff), erlaubt die Hochtemperatur-Solarchemie die effiziente Herstellung einer ganzen Palette von technisch interessanten Produkten: Wasserstoff aus der Wasserspaltung, Synthesegas aus Reformierungsprozessen, Kohlenstoff-Nanotubes, Metalle aus der Reduktion

von Erzen oder reinen Metalloxiden, Funktionskeramiken, in denen gegebenenfalls auch toxische sowie Schwermetalle immobilisiert und entsorgt werden können. Die Projektarbeiten werden aufgrund der Verfügbarkeit von unterschiedlich grossen Solarofenanlagen und Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung der Prozesse und der Produkte vor allem am Paul-Scherrer-Institut (PSI) durchgeführt [5,6]. Da für einen künftigen technischen Einsatz in Abhängigkeit des jeweiligen Prozesses bzw. Produkts unterschiedliche verfahrenstechnische Bedingungen herrschen, kommt der Entwicklung und Optimierung von Reaktoren grosse Bedeutung zu. Es wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Reaktortypen konstruiert, die für technisch bedeutende Prozesse wie das Kalk- oder Gipsbrennen direkt eingesetzt werden können. Für einen wirtschaftlich konkurrenzfähigen Einsatz ist die Verfügbarkeit verfahrenstechnisch ausgereifter und angepasster Systeme entscheidend. Nach langen Evaluationsphasen konzentriert man sich am PSI auf wenige, jedoch vielversprechende Prozesse (siehe unten), die teilweise in Zusammenarbeit mit der Industrie ausgeführt wurden und werden. Trotz dieser Fokussierung auf wenige chemische Prozesse musste die Entwicklung weiterer, für spezifische Anwendungen geeigneter Prototypen vorangetrieben werden, was auch im vergangenen Jahr realisiert wurde. Folgende Prozesse und Reaktorsysteme wurden untersucht bzw. entwickelt:

- Die solarthermische Zersetzung von Zinkoxid in Zink und Sauerstoff wurde als wichtiger Teilschritt, d.h. des Energieabsorptions-Schritts im zyklischen **Wasserspaltungs-Prozess zur Produktion von Wasserstoff** weiter untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein sogenannter *Rotating Cavity Reactor* (ROCA) konstruiert, dessen Stahlwand ähnlich wie in einer Zentrifuge mit dem Reaktionsgut Zinkoxid beschichtet wird. Zinkoxid wirkt sowohl als Agens als auch als Wärmeisolator für die Reaktorwand. Dieser ROCA kann von der einen Seite kontinuierlich mit Zinkoxid beschickt werden; auf der anderen Seite ist er mit einem Quarzglasfenster versehen, durch das die konzentrierte Solarstrahlung eintritt. Ein zweiter Reaktortyp, SLOPE-Reaktor genannt, beruht auf dem Prinzip einer der konzentrierten Solarstrahlung exponierten schrägen Fläche, auf der das Reaktionsgut durch die heisse Fokuszone rutscht. Die experimentelle Erfassung der Effizienz der in diesen Reaktoren ablaufenden Prozesse wurde realisiert. Die Messdaten wurden mit Hilfe eines im Hause entwickelten numerischen Modells der beiden Prozessarten erfolgreich eingesetzt. Es wurden mit den Forschungsgruppen der Solarofenanlagen in Odeillo, (F) und am Weizmann-Institut in Israel intensive Verhandlungen über ein *Scale-up*-Projekt geführt. Es soll ein 0.5 MW Reaktor gebaut werden, in dem die carbothermische

Reduktion von Zinkoxid im Pilotanlagenmassstab erfolgen kann.

- Die seit rund einem Jahr laufende Untersuchung zur Immobilisierung giftiger oder umweltgefährdender Metalle – z.B. aus Batterien, kontaminierten Schrottteilen, verseuchten Böden, Filterstäuben oder Klärschlämmen – in einer Keramikmatrix mittels solarthermischer Energieeinkopplung verlaufen erfolgreich [7]. Da an diesem Projekt ein Industrieunternehmen beteiligt ist und an vertraulich zu behandelnde verfahrenstechnischen Schritten gearbeitet wird, sollen an dieser Stelle keine weiteren Details beschrieben werden.
- Im Teilprojekt Metalloxide wurde das Reaktorsystem TREMPER weiter modifiziert und optimiert. Temperaturmessungen wurden mit der am PSI entwickelten, erstmals im Solarofen eingesetzten FAMP-Methode sowie mit dem in Zusammenarbeit mit der Firma IMPAC ELECTRONIC GMBH entwickelten Einfarbenpyrometer (sog. *Solar-Blind-Pyrometer*) vorgenommen. Vergleichende Messungen belegten, dass vor allem das Einfarbenpyrometer sehr gute Werte liefert; das FAMP-System muss noch optimiert werden. Es stellte sich im Verlauf von Messkampagnen an unterschiedlichen Metalloxiden heraus, dass das Erreichen höherer Prozesstemperaturen für die vorgesehenen solarthermischen Hochtemperaturreduktionen von Metalloxiden unbedingt erforderlich ist. Als Modellprozesse wurden die thermische Reduktion von Manganoxid und von Eisenoxid charakterisiert. Zusätzlich wurde Ilmenit, ein aus Eisen und Titan aufgebautes Mischoxid, mit Methan umgewandelt. Mit dem gewählten experimentellen Aufbau konnten wohl interessante Produktphasen erzeugt werden, insgesamt aber mit diesem System die angestrebten Ziele noch nicht erreicht werden. Die Frage stellt sich, ob mit Wasserstoff als Reduktionsmittel bessere Resultate erzeugt werden können.
- Neben den oben erwähnten Temperaturmessmethoden wurde das Emissiometer, korrekterweise Reflektometer genannt, mit einer programmierbaren Datenerfassung und -auswertung versehen. Mit diesem System lassen sich nun Emissivitäten sowie die dazu gehörigen Temperaturen reproduzierbar ermittelt werden.
- Im Teilprojekt Photochemie waren die Interessen auf die Frage nach dem Einfluss von Photonen auf heterogene (katalysierte) photochemische Prozesse fokussiert. Als Modell wurde die Reduktion von Kohlendioxid am schichtartig aufgebauten Photokatalysator Rutil verwendet. Mit experimentellen und rechnerischen Methoden wurde der Prozessverlauf simuliert und schlüssig charakterisiert. Das Teilprojekt Photochemie wird auf diesem Stand der Kenntnisse abgeschlossen. In-

samt konnte in den vergangenen Jahren gezeigt werden, dass photochemische Reaktionen auch bei relativ hohen Temperaturen im Bereich von 500 °C durchaus mit respektablem Effizienz ablaufen können. Es wurde festgestellt, dass der geschwindigkeitsbestimmende Schritt die Desorption der Produkte von der Katalysatoroberfläche ist. Da die Lebensdauer der photonisch angeregten Zustände des Katalysators sehr kurz ist (für Zinkoxid im Bereich von 200 ps) und da die Aufenthaltsdauer adsorbierter Moleküle in Abhängigkeit der steigenden Temperatur abnimmt, sind photochemische Reaktionen unter sehr konzentrierter Solarstrahlung nicht effizient.

Insgesamt wurden im Berichtsjahr wichtige Schritte zu einer Schwerpunktbildung der PSI-Aktivitäten vollzogen. In den gut koordinierten Projekten **Direkte Umwandlung von konzentrierter Sonnenenergie in chemische Energieträger** [5] und **Entwicklung und Untersuchung von Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung** [6] sowie **Solarthermische Prozesse in der Kreislaufwirtschaft** [7] wurde die Fokussierung auf technisch relevante Prozesse und die direkte Einbindung von Industriepartnern erfolgreich vorangetrieben.

#### PHOTOELEKTROCHEMISCHE PROZESSE ZUR SPALTUNG VON WASSER

Die zwischen den Universitäten Bern [8] und Genf [9] sowie der EPF-Lausanne [10] laufenden Forschungsaktivitäten zur effizienten photochemischen Spaltung von Wasser wurden erfolgreich weitergeführt. Die Studien an der Universität Genf und an der EPF-Lausanne konzentrierten sich vor allem auf materialwissenschaftliche und verfahrenstechnische Optimierungen der sog. **Tandemzelle**, welche mit zwei gekoppelten Photosystemen arbeitet. Diese Zelle erlaubt die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit sichtbarem Licht. Dabei werden zwei Photosysteme eingesetzt: die im blauen Spektralbereich absorbierende, transparente Photoanode oxidiert den Sauerstoff des Wassers. Sie besteht aus einer dünnen, polykristallinen Wolframtrioxid-Schicht oder anderen Materialien. Die frei werdenden Elektronen werden im zweiten, den grünen und roten Spektralbereich absorbierenden Photosystem eingespeist. Dieses zweite Photosystem besteht z.B. aus einem nanokristallinen Titandioxidfilm, auf den ein Sensibilisator-Farbstoff (Ruthenium-Komplex) aufgebracht ist. Die erzeugte Photospannung liefert dann die Leitungsband-Elektronen für die photokathodische Reaktion: die Erzeugung von Wasserstoff.

Die Photoelektrolyse von Wasser wurde in Abhängigkeit von unterschiedlichen Elektrolyten bzw. Säuren und Säuregehalten geprüft. Es zeigte sich, dass in einigen Fällen der Photostrom markant abnimmt. Auch

die Desorption von sich bildendem Wasserstoffperoxid verläuft sehr unterschiedlich. Es musste schliesslich festgestellt werden, dass bei der Photoelektrolyse von Meerwasser trotz intensiver Bemühungen die Bildung von Chlor nicht unterdrückt werden kann. Dieser Befund relativiert die im letzten Jahresbericht gemachte Aussage, dass die Chlorproduktion vernachlässigbar sei. Die materialwissenschaftliche Optimierung der bewährten Wolframtrioxid-Elektrode erfuhr eine markante Entwicklung, indem versucht wurde, ihre Kenndaten durch das Aufbringen einer nanoskopischen Titandioxid-Schicht gezielt zu beeinflussen. Erste Messungen zeigen, dass der Photostrom durch die Titandioxid-Schicht praktisch nicht verändert wird. Da aber die genannte Funktionsschicht photokatalytische Eigenschaften aufweist, lassen sich neue, kombinierte photoelektrochemische Prozesse (Detoxifizierung, Abbau von organischen Molekülen, etc.) durchführen. Des Weiteren wurde versucht, als Alternative zur Wolframtrioxid-Elektrode nanokristallines Eisenoxid als Photoanoden-Material zu verwenden. Dieser Metalloxid-Halbleiter weist einen schmalen Bandgap auf, was – neben dem sehr günstigen Preis und optimaler Umweltverträglichkeit – für das selektive Verhalten gegenüber bestimmter Wellenlängen von Vorteil ist. Probleme entstanden bei der Fertigung von transparenten Schichten mit genügender Photoaktivität. Erste Erfolge liessen sich durch Dotierungen erreichen. Zur Zeit werden Photostromdichten von 2 mA/cm<sup>2</sup> erreicht. Weitere Fortschritte wurden auch mit elektrochemisch auf goldmodifizierten Zinndioxid-Glas-Elektroden aufgebrachte Ag<sup>+</sup>/AgCl-Schichten erreicht. Diese Kombination erweist sich ebenfalls als geeignete Photoanode für die photokatalytische Oxidation von Wasser zu Sauerstoff. Zur Zeit wird untersucht, welche Halbleitermaterialien sich am besten als Photokathodenmaterial eignen, um die bei der Oxidation frei werdenden Elektronen aufzunehmen und für die Reduktion von Wasser zu Wasserstoff bereitzustellen.

Das der natürlichen Photosynthese in Blättern nachvollzogene Konzept der **Antennen-Solarzellen** wurde weitergeführt. Der experimentelle Funktionsnachweis der Antennenfunktion von mit Pyronin beladenen Zeolith L Nanokristallen, die jeweils am Anfang und am Ende der Zeolith-Kanäle mit einem Oxoxnin modifiziert sind, konnte erbracht werden. Licht, das von blauen oder grünen Farbstoffen absorbiert wird, kann entlang der Kanäle geleitet und strahlungslos an einen Halbleiter abgegeben werden. Der Stand der Forschung erlaubt nun, eine effiziente Farbstoff-Zeolith-Nanoantennen-Solarzelle mit guten Erfolgsaussichten zu konzipieren.

## SPEICHERUNG, TRANSPORT UND NUTZUNG VON WASSERSTOFF

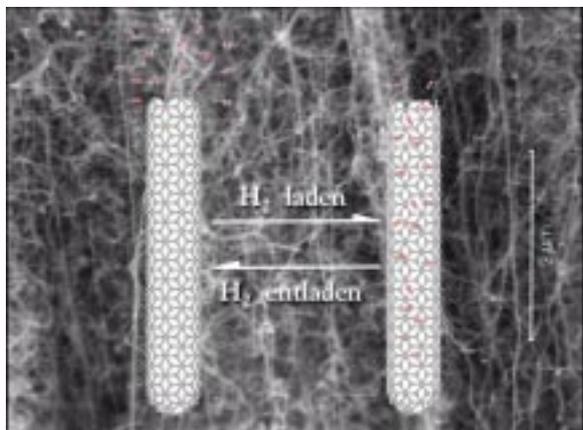
Das Problem der Speicherung und des Transports von Wasserstoff gehört nach wie vor zu den prioritär bearbeiteten Problemstellungen des Programms **Solarchemie / Wasserstoff**. Während die Aktivitäten im Bereich der Wasserstoffherstellung mit solarthermischen oder photoelektrolytischen Methoden erfolgreich weitergeführt wurden, konnten auch für neue Speicher- und Transportsysteme bzw. -materialien interessante und vielversprechende Etappen auf dem Weg zu ökonomischen und sicherheitstechnisch befriedigende Lösungen erreicht werden.

Die an der Universität Genf laufende Entwicklung und Charakterisierung von Metallhydriden als Wasserstoffspeichermaterialien wurde fortgeführt [11]. Die Arbeiten konzentrierten sich auf das Auffinden von wasserstoffreichen Legierungen, die leicht und billig (unter 50 Fr./kg) sind, eine Wasserstoffspeicherdichte von 5 Gewichtsprozent erlauben und bei 1 bar Druck eine Zersetzungstemperatur um 150 °C aufweisen. Diese Kenndaten sind die Garanten für einen Einsatz der Metallhydride in modernen Batteriesystemen und entsprechend – als mittelfristige Option – Speicher für wasserstoffgetriebene Systeme. Es wurde eine überraschend grosse Anzahl neuer Legierungen synthetisiert (in den vergangenen 10 Jahren etwa 80 neue Phasen!). Zur Zeit ist jedoch noch keine Legierung bekannt, die alle obengenannten, auch von der *Inernat. Energy Agency* geforderten Kriterien (Speicherdichte: >5Gew.%; therm. Stabilität: <150 °C) in optimaler Weise erfüllt. Auch die an der Universität Fribourg untersuchten Systeme, d.h. auch Legierungsgemische, führten noch nicht zu rundum befriedigenden Lösungen. Die Suche geht weiter . . .

Seit kurzer Zeit wird ein neuartiges Wasserstoff-Speichermaterial propagiert: Kohlenstoffnanotubes, d.h. röhrenartig aufgebaute, ein- oder mehrwandige nanoskopische Kohlenstoffstrukturen, die durch Pyrolyse bei 630 °C aus Acetylen mit Hilfe von Eisenkatalysatoren hergestellt werden. Von diesen Materialien wird angenommen und in aktuellsten Publikationen auch bewiesen, dass sie grössere Mengen

Wasserstoff aufnehmen, speichern und wieder abgeben können (siehe Abbildung). Die Werte für die Speicherkapazität bewegen sich im Bereich von 3 – 5 Gew.-%, was in Anbetracht der geringen Masse des Kohlenstoffspeichergestüts sehr attraktiv erscheint. An der Universität Fribourg wurde die Synthese und Charakterisierung von Kohlenstoffnanotubes erfolgreich in

Angriff genommen [12]. Die dort hergestellten Proben zeigen einen mehrwandigen Aufbau und sind deshalb für die Wasserstoffaufnahme nicht geeignet. Von anderen Herstellern bezogene einwandige Nanotubes waren jedoch fähig, bis zu 2 Gew.-% Wasserstoff – dies entspricht 552 mAh/g (für Batterieanwendungen) – zu speichern. Das Entwicklungspotenzial dieser Systeme ist sicher noch nicht ausgeschöpft.



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Kohlenstoff-Nanotubes und Modell des Ladens bzw. Entladens dieses neuartigen Speichersystems mit Wasserstoff.

Als Alternativen zu Metallhydriden oder zu Kohlenstoffnanotubes bieten sich auch organische Verbindungen wie Kohlenwasserstoffe (z.B. Methylcyclohexan) oder Methanol an. Im vergangenen Jahr wurde das am PSI seit einigen Jahren laufende Projekt *Hydrogen Supply from Liquid Energy Carriers* abgeschlossen [13]. Der Betrieb einer sog. Dual-Reaktor-Pilotanlage für die Herstellung von Wasserstoff aus Methanol mittels partieller Oxidation (pox) im  $6 \text{ kW}_{\text{therm}}$  Massstab wurde aufgenommen. Zur Optimierung des Reaktors und zur Erfassung von sog. *Hot-Spot / Cold-Spot* Bedingungen wurden Modellierungen und experimentelle Messungen vorgenommen. Die autotherme Konversion von Methanol in Wasserstoff wurde mit zwei industriellen Katalysatoren bestimmt. Im Temperaturbereich von  $250 - 340 \text{ }^\circ\text{C}$  wurden Konversionsraten im Bereich von  $5'000 - 11'800$  Litern Wasserstoff pro Stunde und Liter Reaktorvolumen gemessen (dies entspricht  $15 - 34 \text{ kW}_{\text{therm}}$  für das Dual-Reaktor-System, erfüllt also das Soll von  $6 \text{ kW}_{\text{therm}}$  bei weitem). Die Kinetik des Prozesses wurde gemessen und weitere technische Massnahmen zur Unterdrückung von Kohlenmonoxid (katalytische Konversion in einem Palladium-Tantal-Membran-Rohrsystem) sowie zur Verbesserung der Wärmeleitung im gepackten Katalysator wurden durchgeführt. Insgesamt erlauben die vorliegenden Resultate die konzise Ausarbeitung eines weiterführenden, mit Industriebeteiligung vorgesehenen Projekts.

Da Wasserstoff zu den potenziell wichtigsten zukünftigen Energieträgern zählt, ist dessen Speicherung und

Handhabung in den unterschiedlichen Anwendungen von entscheidender Bedeutung. Die Speicherung in Druckgas tanks gehört neben den erwähnten Speichersystemen zu den aussichtsreichsten Systemen, insbesondere seit der Verfügbarkeit leichter und sicherer Kohlefaserkomposit-Druckgasflaschen. Während die schnelle Umfüllung von Gasen mit der in einem laufenden Projekt verfügbaren Mimik schon getestet und im Pilotmassstab eingesetzt wird, wurden im Berichtsjahr wichtige Durchbrüche für die Abdichtung der Tanks für Wasserstoffbeladung eingeleitet: zusammen mit den an der Produktion beteiligten Unternehmen CYPHELLY, Cudrefin, ULLIT, (F), und KALTENBACHER, Grenchen, wurden Wasserstoffdichte Beschichtungen vorgenommen und die FIRMA MANNESMANN CYLINDER SYSTEMS, (D) führte Leckratenbestimmungen durch [14]. Die Resultate der Untersuchungen sind beeindruckend, da entgegen der im letzten Jahresbericht geäusserten Bedenken gegenüber einer sicheren Wasserstoffspeicherung in diesen Tanks jetzt schon davon ausgegangen werden kann, dass bei gemessenen Leckraten von  $0.12 \text{ ml}$  Wasserstoff pro Stunde und Liter Speichervolumen dem technischen Einsatz kaum noch grosse Probleme im Weg stehen. Ein Teil der Projektarbeiten beschäftigte sich weiterhin mit der Speicherung von Energie in Form komprimierter Luft. Obwohl die Speicherdichte dieses Systems vergleichsweise gering ist, zeigten sich auch aufgrund einer Studie mit dem Titel *Drucklufttechnik und -speicherung: Historische Entwicklung, Anwendungen und Perspektiven* doch sehr vielversprechende, durch hohe Betriebssicherheit und Umweltverträglichkeit ausgezeichnete Einsatzmöglichkeiten.

## KATALYTISCHE REDUKTION VON KOHLENDIOXID

Im Projekt *Katalytische Synthesen ausgehend von Kohlendioxid* an der ETH Zürich [15] konnten erstmalig erfolgreich mesoporöse Ruthenium-Silica-Hybrid-Aerogel-Katalysatoren hergestellt werden. Dank optimaler Textureigenschaften sind diese Systeme für die Synthese von N,N-Dimethylformamid aus Kohlendioxid, Dimethylamin und Wasserstoff sehr effizient. Die neuen Katalysatoren sind an Luft stabil. Unter Reaktionsbedingungen zeigen sie kein *Leaching* der Rutheniumkomponente. Ihre Aktivität ist markant höher als diejenige des in Lösung arbeitenden Rutheniumkatalysators, was äusserst selten beobachtet wird. Auch die Selektivität blieb bei 100%, so dass jetzt wohl der beste Heterogenkatalysator für den genannten, industriell wichtigen Prozess zur Verfügung steht. Erste Versuche, auch andere Dialkylformamide herzustellen, verliefen erfolgreich. Zur Aufklärung der während der Prozesse auftretenden, komplizierten Phasenverhältnisse wurde ein in-situ-Video-Monitoring installiert. Schliesslich wurde auch die katalytische Synthese von Carbamaten aus Kohlendioxid, Alkylamin und terminalem Alkin in Angriff genommen. Da-

mit liesse sich diese für die Pharma- und Agrochemie wichtige Grundsubstanz ohne Einsatz von hochtoxischem Phosgen bewerkstelligen. Die ersten Resultate stimmen zuversichtlich.

### UNTERSTÜTZENDE TECHNIKEN

Um die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in praktische Systeme zu integrieren, oder um bestehende, regenerative Energiesysteme nutzende Technologien zu optimieren, sind unterstützende Techniken oft unabdingbar. So wurde z.B. im Projekt *Elektrophysikalisches System zur Verbesserung der Wärmeübertragung und des Energieverbrauchs für die Wassererwärmung in thermischen Solaranlagen und offenen Rückkühlkreisläufen zur Kälteerzeugung* [16] begonnen, an bestehenden Anlagen durch den Einsatz neuartiger Methoden die Systemeffizienz und -sicherheit zu verbessern. Weitere Projekte mit vergleichbarer Praxisnähe runden das Spektrum des Programms Solarchemie / Wasserstoff ab.

### ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Die Kommunikation der entscheidenden Faktoren für einen zukunftsfähigen Umgang der Menschen mit Energieträgern, Energietechnologien und Rohstoffen wurde verstärkt. Im Rahmen des internationalen Medienprojekt *Prometheus' Diary* [16] wurde zusammen mit dem Sender DEUTSCHE WELLE, Hamburg unter der Leitung von J. Altekruze ein Film mit dem Titel *Die titanische Vision. Energie für die Zukunft* fertiggestellt. Die Ausstrahlung läuft zur Zeit. Durch dieses Projekt, aber auch durch weitere Buchprojekte und Vortragstätigkeiten soll eine Sensibilisierung möglichst vieler Leute für die nicht zu trennende, internationale Energie- und Rohstoffproblematik, also auch für die Notwendigkeit entsprechender, von Staat und Industrie zu fördernden Forschungs- und Entwicklungsprogramme gefördert werden.

## Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit zwischen Projektnehmern aus Hochschulinstitutionen und Industrieunternehmen wurde intensiviert. Zur Zeit sind an etwa der Hälfte der Projekte des Programms **Solarchemie / Wasserstoff** Industriepartner beteiligt. Diese Entwicklung bedeutete jedoch nicht, dass keine originäre Forschungsarbeit mehr unterstützt wurde. Es kann vielmehr als eine Folge der Konzentration der Kräfte und der

Schwerpunktbildung betrachtet werden. Insbesondere für die Förderung der Wasserstofftechnologie erwies es sich klar und deutlich, dass reine Forschungsprojekte nur dann verwertbare Resultate erbringen, wenn sie in den Kontext mit einer praktischen Anwendung in kommunalen oder industriellen Anlagen gebracht werden können.

## Internationale Zusammenarbeit

Die internationalen Aktivitäten waren sehr zahlreich und vielfältig:

Folgende IEA-Aktivitäten wurden mit Mitteln des Programms **Solarchemie / Wasserstoff** gefördert:

- IEA-Programm *SolarPACES*
- IEA Wasserstoff-Forschungsprogramm
- 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 mehreren Partnerinstitutionen. Als wichtigste sind zu nennen:

- Australian National University, Canberra
- Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln

- Festkörperchemie, UNI-Augsburg, Deutschland
- Université de Nancy, Frankreich
- Solarforschungszentrum Odeillo, Frankreich
- Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
- Boreskov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russland
- AG Solar, Nordrhein-Westfalen, Deutschland
- Niedersächsische Energieagentur, Hannover, Deutschland
- Bayerisches Institut für Abfallforschung, Augsburg
- Landesamt für Umweltschutz, Augsburg

## Bewertung der Ergebnisse

Im Berichtsjahr wurde die Struktur des Programms **Solarchemie / Wasserstoff** inhaltlich und finanziell konsolidiert. Die vorgesehenen Programmaktivitäten für die Jahre 2000 – 2003 wurden der CORE im September vorgestellt und vor Jahresende von diesem Gremium akzeptiert. Die beiden Auszeichnungen ETG INNOVATIONSPREIS 1999 für das Projekt *ABSORBER 2000* und der PREIS FÜR TECHNISCHE INNOVATIONEN 1999 der *Institution of Engineers*, Australien, für das Projekt *Solar Thermal Power Plant Using Ammonia-Based Energy Storage System* bestätigen, dass die geförderten Arbeiten ein hohes Niveau

aufweisen und technisch relevant sind. Diese durchaus wünschenswerte Tendenz wird auch durch die zunehmende direkte Beteiligung von Industrieunternehmen an den Projektarbeiten gestärkt.

Auch die forcierten materialwissenschaftlichen Untersuchungen und der Einbezug von stoffkreislaufwirtschaftlichen Betrachtungen haben die Qualität des Programms erheblich verbessert. Dies entspricht insgesamt der Forderung nach einer zukunftsfähigen und wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Nutzung von regenerativen Energiequellen und Ressourcen.

## Ausblick auf das Jahr 2000

Im Jahr 2000 werden die bis jetzt erfolgreich laufenden Projekte weitergeführt: am PSI werden die solarchemischen Prozesse weiter Richtung technisch relevanter Umwandlung und Speicherung von konzentrierter Solarstrahlung betrieben. Zielprodukte sind Wasserstoff, Metalle und Funktionskeramiken. Es wird auch intensiv versucht, übergreifende Projekte – neu soll die Biomasse, später auch die Brennstoffzellentechnik einbezogen werden – aufzubauen. Dabei sollen Synergien gefördert und zu Schwerpunktthemen zusammengeführt werden.

Für die Wasserstoffforschung werden realisierbare technische Konzepte entwickelt. So werden in der Gemeinde Birsfelden, aber auch im Tessin und in der Gotthardregion mit Studien und umfassenden Bestandsaufnahmen das Zukunftspotenzial für die Produktion und den Einsatz von Wasserstoff als Energieträger und als Grundchemikalie durchgeführt.

An der Universität Augsburg werden verstärkt materialwissenschaftliche Untersuchungen für verschiedene Projekte durchgeführt werden. Aufgrund der personellen Situation und der technischen Ausrüstung sollten für die Charakterisierung von Funktionsmaterialien in Zukunft keine Engpässe mehr auftreten.

Die im Programm erreichten Resultate, insbesondere die technischen Errungenschaften, sollen in Zusammenarbeit mit geeigneten Partnern wie z.B. dem DEZA, der DEG, Deutschland, oder mit Industrieunternehmen in Drittländern umgesetzt werden. Diese Vorgehensweise ist deshalb gerechtfertigt, da der Einsatz der entwickelten Technologien gerade in sonnenreiche Regionen Erfolg versprechen.

Die Öffentlichkeitsarbeit wird verstärkt und das Grundkonzept einer zukunftsfähigen Energie- und Ressourcennutzung wird weiter propagiert.

## Liste der Projekte

- [1] J. Geng, A. Schüler, P. Oelhafen, UNI-Basel: *Meatloxide, keramische Materialien und Verbundwerkstoffe in der Solartechnologie* (JB)
- [2] A. Flück NEK, Zürich und A. Reller, UNI-Augsburg: *Sicherheitssystem für Ammoniak-Anlagen* (P+D-JB)
- [3] A. Luzzi, ANU, Canberra (Aus): *Closed-loop Thermochemical Storage of Solar Energy Using Ammonia* (P+D-JB)
- [4] H. Fricker, Rickenbach: *KEREK, keramisches Absorber-/Receiver-System* (JB)
- [5] I. Alxneit, M. Sturzenegger, H.R. Tschudi, PSI-Villigen: *Direkte Umwandlung von konzentrierter Sonnenenergie in chemische Energieträger* (JB)
- [6] A. Steinfeld, PSI-Villigen: *Entwicklung und Untersuchung an Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung* (JB)
- [7] A. Steinfeld, PSI-Villigen und W. Hoffelner, MGC MOSER GLASER, *Solarthermische Prozesse in der Kreislaufwirtschaft* (JB)

- [8] G. Calzaferri, UNI-Bern: *Photochemische und photoelektrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie* (JB/SB)
- [9] 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/SB)
- [10] M. Grätzel, EPF-Lausanne: *Photolyse von Wasser, solare Herstellung von Wasserstoff* (JB/SB)
- [11] K. Yvon, UNI-Genève: *Synthese und Charakterisierung von neuartigen ternären und quaternären Metallhydriden* (JB)
- [12] A. Züttel, L. Schlapach, UNI-Fribourg: *Entwicklung von Niedertemperatur-Hydridlegierungen hoher Speicherkapazität* (JB)
- [13] T. Schucan und E. Newson, PSI-Villigen: *Hydrogen Supply from Liquid Energy Carriers* (SB)
- [14] I. CYPHELLY, Cudrefin: *Schnelle Umfüllung von Gasen* (P+D-Projekt, SB)
- [15] A. Baiker, ETH-Zürich: *Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen* (JB)
- [16] R. Müller und A. Flück, NEK Umwelttechnik, Zürich: *Elektrophysikalisches System zur Verbesserung der Wärmeübertragung und des Energieverbrauchs für die Wassererwärmung in thermischen Solaranlagen und offenen Rückkühlkreisläufen zur Kälteerzeugung* (JB)
- [17] J. Altekruse, A. Reller, Hamburg: *Prometheus' Diary* (JB)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden  
 (ZB) Zwischenbericht 1999 vorhanden  
 (SB) Schlussbericht 1999 vorhanden

## Publikationen

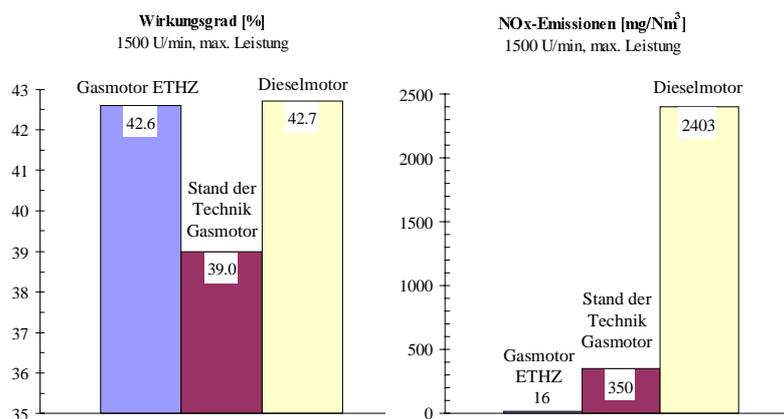
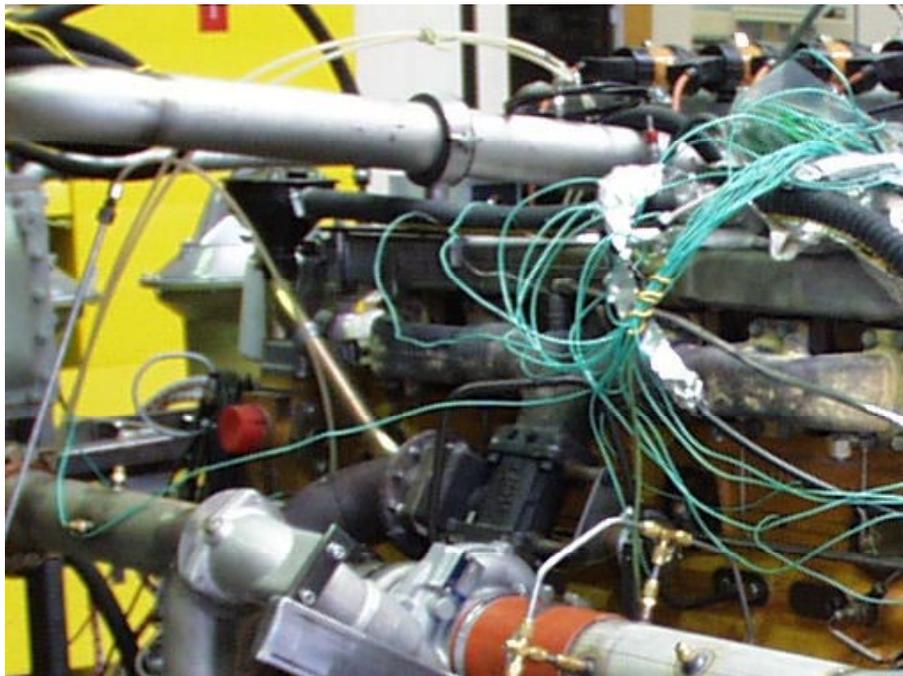
Über die geleisteten Arbeiten wurde eine grosse Anzahl von Publikationen und Berichten in der Fachliteratur und in der Tagespresse veröffentlicht. Die Resultate der Projektarbeiten wurden auch an zahlreichen internationalen Konferenzen in Form von Vorträgen und Postern erfolgreich präsentiert. Detaillierte Aufgaben können den Jahresberichten der Projektleiter entnommen bzw. vom Programmleiter bezogen werden.

## FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Alphons Hintermann**

[alphons.hintermann@bfe.admin.ch](mailto:alphons.hintermann@bfe.admin.ch)



### Weltrekorde bei Gasmotoren (200kW)

Der mit Unterstützung vom BFE und FOGA in Zusammenarbeit mit den Firmen LIEBHERR & DIMAG am Laboratorium für Verbrennungsmotoren und Verbrennungstechnik der ETH Zürich entwickelte Gasmotor für Blockheizkraftwerke erreicht sowohl beim Wirkungsgrad als auch bei den NOX-Emissionen Weltrekord.

## Programmübersicht und anvisierte Ziele

Im Programm **Feuerung & Verbrennung** [26] werden seit 1988 die **Grundlagen der Verbrennungsprozesse** in stationären atmosphärischen Feuerungen (inkl. Abfallverbrennungsanlagen), der motorischen Verbrennung sowie in Gasturbinen erforscht und gefördert. Die Zielsetzungen sind eine international anerkannte Fachkompetenz der Forscher und eine konsequente Umsetzung der Forschungsergebnisse in der Privatwirtschaft.

Das Fachwissen ist an der ETH-Zürich im Laboratorium für Verbrennungstechnik und Verbrennungsmotoren (LVV) und im Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT) sowie am PSI konzentriert. Die beiden Forschungsschwerpunkte **Numerische Simulation** und **Optische Messmethoden** sind einem raschen Technologiewandel unterworfen und setzen daher die Forscher vor immer neue Herausforderungen. Der dritte Schwerpunkt beinhaltet **Schadstoffreduktion und Schadstoffanalytik**, wobei wir heute aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse betreffend der Schadstoffbildungsmechanismen während der Verbrennung in der Lage sind, massgebend zur Entwicklung zukunftsweisender schadstoffarmer Verbrennungssysteme [14, 16-18, 21] beizutragen. Die Verbrennung soll so gesteuert werden, dass – neben optimaler Leistung – die erzeugten Schadstoffe möglichst ohne Abgasnachbehandlung die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) unterbieten, resp. letztere dank neuentwickelter Technologien europaweit weiter verschärft werden können.

Erfolge zu vermelden und **mit neuen, marktfähigen Produkten aufzuwarten**, ist das Hauptziel der P+D-Aktivitäten, die vernetzt zwischen den Hochschul- und den Industriepartnern definiert und ausgearbeitet werden: So konnte der in den letzten Jahren in Zusammenarbeit mit dem LTNT und mit BFE- und FOGA-Mitteln entwickelte YGNIS Varino-Brenner – er setzte

für Gasbrenner neue Standards – im Berichtsjahr mit Erfolg auch im Ausland verkauft werden. Im Bereich der instationären (motorischen) Verbrennung arbeitet das LVV erfolgreich mit andern Hochschul- und mit verschiedenen nationalen und ausländischen Industriepartnern zusammen. Insbesondere werden die im *Off-road*bereich stark vertretenen LIEBHERR-Motoren auf die Erfüllung der zukünftigen EURO-III- und EURO-IV-Emissionsvorschriften getrimmt. Darauf gestützt, wird vom Industriepartner die Einführung dieser Technologie in die Serie möglichst innerhalb der nächsten 2 Jahre angestrebt. Zusätzlich beschloss kürzlich die Fa. *Wärtsilä NSD*, die Konsortiumsaktivitäten zusammen mit dem LVV für 2 Jahre fortzusetzen, um *Computational Reactive Fluid Dynamics* (CRFD) verstärkt als Werkzeug in die Entwicklung von neuen Produktgenerationen einzusetzen. Ferner wurde in der katalytischen Verbrennung am PSI der Sprung von den Grundlagen zur Anwendung durch ein neues Projekt mit der Gasturbinenindustrie geschafft. Auch die auf der Titelseite erwähnten und in Zusammenarbeit des LVV mit den Firmen LIEBHERR und DIMAG erzielten Weltrekorde [18] bei Gasmotoren sind kein Zufallsprodukt sondern eine Folge des durch das Programm längerfristig gesicherten hohen Niveaus des Fachwissens am LVV.

Ein weiterer Beweis der starken internationalen Anerkennung unserer Forschungsergebnisse liefert die kürzlich eingegangene Meldung der SAE International (*The Engineering Society For Advancing Mobility*), dass Herrn Prof. K. Boulouchos und seinen Mitarbeitern der *Arch T. Colwell Merit Award* für seine Publikation [39] zugesprochen wurde. Von den in den *Proceedings* der SAE-Kongresse des Jahres 1998 insgesamt 2160 publizierten Arbeiten wurden 19 mit verschiedenen *Awards* ausgezeichnet. Der erwähnte Preis ist einer der prestigeträchtigsten davon.

## 1999 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

### GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Physikalische Modelle turbulenter Verbrennung sind Gegenstand der vierten Phase des Projekts **Turbulente, chemisch reaktive Stömung in Motoren Brennräumen** [1]. Der Schwerpunkt im Berichtsjahr lag in der 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. Der Rechencode wurde weiter entwickelt und seine Effizienz um einen Faktor zehn gesteigert. Dies ermöglichte die Berechnung komplexerer Phänomene wie die Wechselwirkung zwischen Diffusionsflamme und Vortices oder den Übergang zwischen Diffusionsflamme und *Edge*flamme. Die Ergebnisse wurden in zwei Beiträgen für das 28<sup>th</sup> *Int. Symposium on Combustion* (Edinburgh, Juli 2000) eingereicht.

Aufgrund der Experimente am Testreaktor zum Studium der katalytisch stabilisierten Verbrennung von Methan und Wasserstoff unter turbulenten Bedingungen konnte im Vorhaben **Tiefemperaturverbrennung bei hohen Drücken** [2] eine detaillierte Datenbank für die turbulente, katalytische Verbrennung erstellt werden, die auch für die Verifikation verschiedener Turbulenzmodelle bezüglich dem numerischen Einsatz bei turbulenter, katalytischer Verbrennung verwendet werden kann. Vergleiche mit Messungen (LIF, Ramanstreuung und CARS) zeigten, dass mit dem Simulationsprogramm sowohl der Zündpunkt in der Gasphase als auch die Mittelwerte von Hauptspezies und Temperatur gut vorhergesagt werden können. Der durch die numerische Simulation vorhergesagte Brennstoffumsatz stimmt mit dem im Experiment gemessenen Umsatz gut überein.

Im letzten Jahr wurde der lang angestrebte Durchbruch bei den operativen Zielparametern beider Hochtemperaturdruckzellen (am LVV und am PSI) erzielt. Es steht somit in 2-facher Ausführung ein Versuchsträger für die Untersuchung der Verbrennung und Schadstoffbildung von Zweiphasen, instationären Strömungen mit chemischen Reaktionen im Projektverbund **Dieselmotorische Gemischaufbereitung** [3, 24] zur Verfügung, der Forschungsarbeiten an weltweit vorderster Front [24] ermöglicht. Die erreichten Betriebsparameter (knapp 100 bar Druck und eine Temperatur von ca. 900K) sind im internationalen Vergleich Spitzenwerte.

### OPTISCHE MESSMETHODEN

Im Vorhaben **Thermochemische Charakterisierung und spektroskopischer Nachweis von Sauerstoffverbindungen im Zusammenhang mit der Verbrennung sauerstoffhaltiger Brennstoffe** [4] sind Azetale wie Methylal und Butylal als Brennstoffzusätze für Dieselfahrzeuge in Untersuchung. Beimischungen im Bereich von 10 - 20% von Azetalen im Dieseltreibstoff bewirken eine wesentliche Reduktion des Russausstosses. Die zur Beschreibung der Verbrennung von DME und Methylal gültigen Reaktionsschemata sind noch nicht optimiert. Zudem fehlen zum Teil die thermochemischen Daten wichtiger Zwischenprodukte. Für die Untersuchung von Dissoziationsprozessen werden Pyrolyseprodukte von Azetalen in einem Molekularstrahl präpariert und anschliessend spektroskopisch und massenspektroskopisch identifiziert. Für den Nachweis von Spezies in Flammen werden parallel dazu nichtlineare Spektroskopien entwickelt. Eine spezielle Methode, Two-Colour Four Wave Mixing, zeigt ein grosses Potential, Stossrelaxationen von Molekülen im elektronischen Grundzustand (die für die Chemie relevanten Zustände) zu messen.

In den letzten Jahren haben die wachsenden Besorgnisse der Bevölkerung um die gesundheitlichen Auswirkungen der Partikelemissionen aus Verbrennungsvorgängen die Erforschung neuer Messverfahren beschleunigt. Mit der neuen zeitaufgelösten Technik der laserinduzierten Gitter (LIG) wurde im Projekt **Laserspektroskopische Methoden zur Analyse von Flammen und Brennstoffsprays** [5] gezeigt, dass die lokale Temperatur, die O<sub>2</sub>-Konzentration und die Konzentration der O<sub>2</sub>-Stoss-partner simultan während des Verbrennungsprozesses bestimmt werden kann. Ferner konnten mit einem neuen experimentellen Aufbau einige Einschränkungen der früheren Messtechnik vermieden werden.

### NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSVORGÄNGEN

Bei der Wasserstoffverbrennung steht die Bildung des thermischen NO<sub>x</sub> im Vordergrund, bei der Verbrennung von Methan spielt ebenso die Bildung von prompt Stickoxid eine wichtige Rolle. Im Projekt **NO<sub>x</sub>-Modellierung mittels PDF-Transportgleichungen** [6] wird die Verbrennung dieser Gase untersucht. Erste Berechnungen wurden an einer turbulenten H<sub>2</sub>-Flamme durch-

geführt und mit experimentellen Daten verglichen. Neu wurde die Methode der Repro-Modellierung mit der PDF-Transport Methode kombiniert, was die Effizienz der Rechnungen erhöht. 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<sub>x</sub>-Reduktion ähnlich wie Vormischflammen, jedoch ohne die Gefahr einer Rückzündung. Im Projekt **Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung** [7] werden Teilvormischsysteme numerisch betrachtet. Neu wurde die chemische Reaktionskinetik detailliert analysiert mit der Zielsetzung, im fetten Bereich die genauen Reaktionsmechanismen zu bestimmen. NO<sub>x</sub>- und CO-Messungen an einem 20kW ELCO Brenner liessen ein erhebliches Schadstoffreduktionspotential erkennen.

Modellierung und Messung turbulenter Verbrennungsvorgänge sind grosse Herausforderungen an den Ingenieur. Die Simulation der Turbulenzphänomene mit Einbezug einer detaillierten Verbrennungsschemie ist sehr komplex. Da stets an den Grenzen der heutigen Computerkapazitäten gerechnet wird, ist sie erst ansatzweise gelöst. Neue numerische Ansätze werden im Projekt **Struktur turbulenter Diffusionsflammen** [8] unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Verbrennung in sogenannten Flamelets stattfindet und einer genügend detaillierten Verbrennungsschemie, untersucht.

Experimentell werden die Projekte [7, 8] im Vorhaben **Experiment turbulente Gegenstromflamme** [9] unterstützt um möglichst genaue Informationen zur Flammenstruktur in der Teil-Vormischverbrennung zu liefern. Vormischverbrennung ist 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.

**Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung** [10] heisst die Zusammenarbeit 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 substantieller 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]. Beide Gruppen untersuchten zusammen die Grenzen der Auflösung turbulenter Strukturen einer LES für eine zweidimensionale Kanalströmung bei einer Reynoldszahl von 10000.

## SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

Obwohl in der stationären Verbrennung Wirkungsgradverbesserungen kaum mehr möglich sind, liegt noch ein grosses Verbesserungspotenzial bei der Schadstoffminimierung und im Gesamtwirkungsgrad der Anlagen. In der motorischen Verbrennung genügt es nicht, Russbildungsmechanismen zu untersuchen [12] oder durch innermotorische Massnahmen Schadstoffreduktionen am Labormotor nachzuweisen. Vielmehr müssen diese Fortschritte durch weitere Massnahmen im Gesamtsystem (z.B. Auto) konsequent mit P&D-Projekten optimiert werden.

Im Vorhaben **NO<sub>x</sub>-Reduktion mit Harnstoff-SCR** [11] 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. Ein weiteres Katalysatormodul wurde hergestellt und auf dem Dieselmotorenprüfstand am LIEBHERR-Motor getestet. Es

zeigte sich, dass diese SCR-Beschichtungen reproduzierbar herstellbar sind [37]. Das PSI-Fachwissen fliesst direkt in das Verbundprojekt "GD-Kat" der deutschen Automobilindustrie ein, das die Weiterentwicklung von Harnstoff-SCR für den PKW-Dieselmotor zum Ziel hat.

Die atmosphärische CO<sub>2</sub>-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 Vorhabens **Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration anhand polarer Eiskerne** [13], die Zuverlässigkeit und die Präzision solcher Messungen zu verbessern. Mit verbesserten und zuverlässigeren Daten sollen dann neue Erkenntnisse über kleinere Variationen von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und insbesondere auch über die Ursachen und Mechanismen von CO<sub>2</sub>-Schwankungen in früheren Zeiten untersucht werden.

## Nationale und internationale Aktivitäten und Zusammenarbeit

Die **Schweizerische Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV)** hat im Berichtsjahr eine Webseite eingerichtet.

Die SVV lud am 25. Januar 1999 an der ETH-Zürich zum Thema **Entwicklungsprojekte für die Brennerindustrie** ein. Die Entwicklung einer neuen, schadstoffarmen Brennergeneration (NO<sub>x</sub> < 9 ppm) ist heute möglich. Die anwesenden Vertreter der Brennerindustrie zeigten sich aufgrund der negativen Erfahrungen mit der Einführung der LRV92 wenig begeistert, an einem solchen Projekt mitzuarbeiten.

Das siebte Jahrestreffen des **ERCOFTAC-Kompetenzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffbildung** fand am 28. Mai 1999 mit rund 50 Teilnehmern aus Industrie und Hochschule an der ETH-Zürich statt. Die Schwerpunkte waren die Verbrennungsmodellierung und der gegenwärtige Stand der Messtechniken in der Entwicklung und im Einsatz bei Laborexperimenten und bei P&D-Anlagen [31].

Dem Thema **Schadstoffemissionen** war die vierte Jahrestagung der SVV gewidmet [33]. Die rund 60 Teilnehmer aus der Privatwirtschaft und den Hochschulen wurden u. a. vom BUWAL über den Stand der Luftreinhaltung in der Schweiz, von einem Heizungsfachmann über die infolge der zu rasch umgesetzten LRV92

ausgelösten Probleme in der Heizungsbranche und von der EMPA über nichtlimitierte Schadstoffe im Abgas von Verbrennungsmotoren informiert.

Im zweiten Zehnjahresbericht des *IEA-Implementing Agreements Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* [30] sind unsere Forschungsergebnisse sehr gut vertreten. Am *IEA-Task-Leaders Meeting* [32] in *Kyoto* konnten unsere Kontakte mit den japanischen Forschern weiter vertieft werden.

Die zweite Generalversammlung der SVV fand am 1. Juli 99 an der ETH-Zürich statt. Die 8 Firmen- und 11 Vertreter von Behörden und Hochschule orientierten sich vorher über die Möglichkeiten der Simulation in der Brennerentwicklung und besuchten das LVV-Labor.

Nebst diesen IEA-Aktivitäten präsentierten unsere Forscher ihre Arbeiten an verschiedenen internationalen Konferenzen. *Invited talks* (Referent K. Boulouchos) für Übersichtsvorträge erfolgten an der Tagung der Techn. Akademie *Esslingen "Dieselmotorentechnik"*, 9.-10. Dezember 1999 [35] sowie anlässlich des *SAE World Congress 2000*, March 6-9, *Detroit USA*. [36].

Mit Titel **Forschung auf Bedürfnisse der Industrie zugeschnitten** [34] erschien in der Zeitschrift **Gesundheit- und Umwelttechnik** ein Interview des Programmleiters mit einem verantwortlichen Redaktor.

## P+D-Projekte und Transfer in die Praxis

Im Bereich der motorischen Verbrennung wird weiterhin eine stürmische Entwicklung von der konstanten Verschärfung der Emissionsgrenzwerte (bald nach EU-

RO-IV) und der Anforderung nach Reduktion des Brennstoffverbrauchs vorangetrieben. Wesentliche Beiträge werden hier vom LVV in folgenden Projekten

und Arbeitsgebieten geleistet: Neue Brennverfahren für Nutzfahrzeugdieselmotoren in Zusammenarbeit mit LIEBHERR, inkl. Einsatz von sauerstoffhaltigen Brennstoffen ([14], s. auch Verbindung mit Projekt [24] am PSI), Simulations- und experimentelle Methoden für DI-Ottomotoren (zusammen mit der FVV in Deutschland, s. Projekt [25]), CRFD-Konsortium mit *Wärtsilä* NSD, Entwicklung von optischen Sensoren für die direkte Brennraumdiagnostik zusammen mit KISTLER [23], Darstellung eines energieeffizienten, extrem schadstoffarmen Gasmotors für stationäre Anwendungen ([17]), sowie drei weitere – nicht BFE-finanzierte – Projekte, nämlich: ein neu zugesprochenes EU-Projekt (zusammen mit IVECO, BOSCH, AVL, Univ. *Valencia*) betreffend Simulationsverfahren für zukünftige Nutzfahrzeugdieselmotoren, und ein zusammen mit IVECO, *Wärtsilä* NSD, LIEBHERR, der deutschen Firma DEA und mit Unterstützung des FEV (Erdölvereinigung), dem BUWAL und neu der KTI auszuführendes Projekt zur vergleichenden Untersuchung der Feinpartikelemissionen aus der motorischen Verbrennung über einen weltweit einmalig breiten Bereich von Maschinengröße und Leistungsklasse. Schliesslich hat mit Unterstützung des Nationalfonds das gemeinsame Grundlagenforschungsprojekt (Stabilität von Diffusionsflammen) des LVV mit der EPFL Fortschritte gemacht und nähert sich dem Abschluss.

Im Vorgängerprojekt **Swiss Common Rail** wurde der Beweis erbracht, dass die EURO-III Normen prinzipiell ohne Abgasrezirkulation und –nachbehandlung mittels Hochdruck Common Rail Einspritzung erfüllt werden können. Im von den Industriepartner LIEBHERR, SIG, HYDROMAG unterstützten Folgeprojekt **Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren** [14] gibt es zwei Schienen: es geht einerseits um die lichtleitergestützte Untersuchung der Verbrennung und Russbildung (Mehrfarbenpyrometrie) im 1-Zyl. Forschungsmotor (siehe auch [23]) und andererseits um den Einsatz am gleichen Motor von Butylal als idealen Vertreter der Sauerstoffhaltigen Brennstoffe (zusammen mit gekühlter AGR) zur Erfüllung der EURO-IV Vorschriften (siehe auch [24]). Beide Teilprojekte sind auf gutem Weg und erste Ergebnisse sind sehr ermutigend.

Zur Sicherung der industriellen Serienproduktion des *Swiss Common Rail* Projekts wurde die SIG mit dem Projekt **Entwicklung einer Hochdruckpumpe mit Regelung** [15] beauftragt. Die Hochleistungspumpe steht nun auf den Dauerlaufprüfständen im Einsatz und hat in über tausend Betriebsstunden verschiedene Dauerversuche erfolgreich absolviert.

Nach dreijähriger Modellentwicklungszeit steht nun das Vorhaben **Einsatz der rechnergestützten Simulation (CRFD) für die turbulente Verbrennung in der industriellen Produkteentwicklung** [16] mit starker, finanzieller Unterstützung des Industriepartners *Wärtsilä* NSD definitiv in der produktiven Phase. Mit Hilfe der am LVV in langjähriger Arbeit verbesserten KIVA-Untermotoren gelang es erstmals, experimentelle

Trends an den weltweit ersten mit *Common Rail* Einspritzung ausgerüsteten Grossdieselmotoren nicht nur für die Wärmeentwicklung, sondern auch weitgehend für die NO<sub>x</sub> richtig wiederzugeben. Einen Knacknuss stellt noch die Wiedergabe der richtigen Trends bei der thermischen Bauteilbelastung dar. Gestützt auf dieser Erfolge beschloss *Wärtsilä* NSD, das Vorhaben für 2 weitere Jahre, möglichst im Rahmen eines KTI-Gesuchs zu unterstützen (inkl. neue Dissertation).

Im Programm **Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung** wurde das Projekt **Swiss Motor** wesentlich vorangetrieben und in diesem Programm mit zwei verschiedenen Konzepten erfolgreich zum Abschluss gebracht. Die Arbeiten an der EPFL führten zur Darstellung eines Magermotors, der die Schweizer-LRV-Grenzwerte für Biogas erfüllt und diejenigen für Erdgas ohne Katalysator nur knapp verfehlt [17].



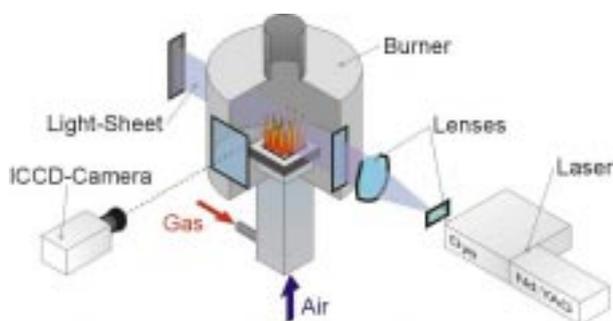
Die Arbeiten am LVV [18] innerhalb dieses Projektes werden nach den beeindruckenden Erfolgen vom Jahr 1999 nun vom FOGA für die Abschlussphase (bis 31.12. 2000) finanziert. Inzwischen hat man am LVV mit einem Wirkungsgrad von 42,5% dieselmotorische Werte bei gleichzeitigen NO<sub>x</sub>-Emissionen von wenigen ppm (also weniger als bei einer modernen Gasturbine!) erreicht, was für die Leistungsklasse 200kW Weltrekord bedeutet. Zu erinnern ist, dass diese Ergebnisse, ohne die Zwischenfinanzierung aus dem BFE-Programm *Feuerung & Verbrennung* in der kritischen Periode 1997-99 gar nicht zustande gekommen wären. Selbstverständlich müssen jetzt aufwendige Feldversuche bei Kunden den Firmen LIEBHERR und DIMAG durchgeführt werden, um die Dauerhaltbarkeit des Konzepts zu optimieren, was ja für eine erfolgreiche Marktdurchdringung unabdingbar ist.

Im Projekt **NO<sub>x</sub>-Reduktion beim YGNIS Varino-Brenner** [21] wird in Zusammenarbeit mit YGNIS der Matrixbrenner optimiert. Eine Methode für die genauere Berechnung adiabatischer Flammentemperaturen und ein Modell für die qualitative Untersuchung der Abgasrezirkulation wurden vorgeschlagen.

Das PSI bearbeitet mit der Firma Lambiotte (B) das Projekt **Investigation of Soot and NO-Production in Spray Combustion of Acetal/Diesel Mixtures** [24] mit dem Ziel, die motorische Diesel Spray-Verbrennung in der Hoch Temperatur Druck Zelle (HTDZ) zu untersuchen.

Spray- und Verbrennungsvorgänge wurden mittels Schattenbildern, Mie-Streuung, Bildern der natürlichen Fluoreszenz und Laser Induzierten Inkandeszenz (LII) erfasst. Mit diesen Messmethoden kann auf die Ausbreitung des flüssigen Diesels (Spraykern) und des verdampften Diesels geschlossen werden. Weiter können Zeit und Ort der Zündung sowie die örtliche Verteilung von Russpartikeln bestimmt werden. Die Auswertung erster Messungen scheinen neue konzeptuelle Vorstellungen der Diesel Spray Verbrennung zu bestätigen.

Bei Gasturbinen lassen sich durch die Vormischverbrennung wesentlich tiefere Schadstoffwerte erreichen. Zur Entwicklung und Optimierung der entsprechenden Brennertypen werden detaillierte Kenntnisse der Vorgänge bei der Mischung von flüssigen Brennstoffen und Luft benötigt, welche bislang noch weitgehend unbekannt sind und im PSI-Teilprojekt **Mischung und Verdampfung von Brennstoffsprays in Gasturbinen-Vormischbrennern** [19] mittels laseroptischen Methoden (LIF) mit hoher Genauigkeit unter Betriebsbedingungen von Gasturbinenbrennern untersucht werden.

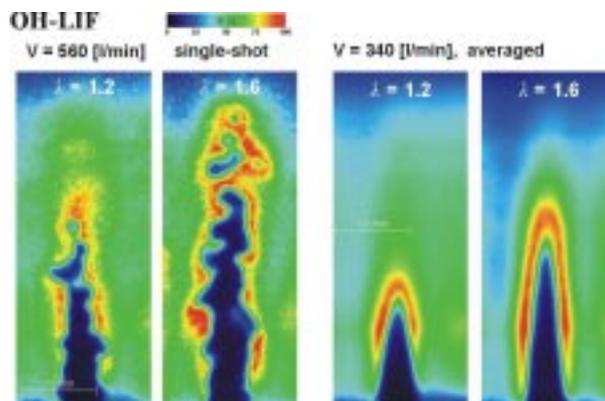


Auf Wunsch des Industriepartners ABB wurde das dritte Projektjahr mit einer geänderten Thematik (Diagnostik und Charakterisierung turbulenter Flammen in der homogenen Verbrennung) angegangen. Am PSI ist es erstmals gelungen, einen atmosphärischen, turbulenten Vormischbrenner in dem Sinne umfassend zu charakterisieren, dass planare Messungen der turbulente Strömung (PIV), der Reaktionszonenverteilung (OH-LIF)

und der NO<sub>x</sub>-Entstehung erfolgreich durchgeführt wurden. Im LVV-Teilprojekt **Flammenstruktur und NO<sub>x</sub>-Bildung in turbulenten Vormischflammen** [20] wurden neue Verdampfungsmodelle, die Mehrkomponenten Brennstoffe zulassen, entwickelt und im KIVA-3 Code implementiert und validiert. Die PSI-Experimente und die erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem LVV-Simu-

lationsteil (die Dissertation [29] entstand in weniger als vier Jahren) hat Mustercharakter auch für die Zukunft.

Die Druckmessung im Verbrennungsraum ist bei der Motorenentwicklung in den letzten Jahren zum Standardwerkzeug geworden. Die immer strenger werdenden Abgasgrenzwerte fordern aber neue Analysewerkzeuge in der Motorenentwicklung.



Im Projekt **Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen** [23] lieferte die in Zusammenarbeit zwischen der Firma KISTLER und dem LVV entwickelte neue Brennraumsonde zur integralen Lichtleitmessung sehr aussagekräftige Resultate bezüglich Erkennung des Zündverzugs und der besseren Erkennung des Brennbeginns in Otto- und Dieselmotoren.

Probleme gab es im Projekt **Effiziente Energienutzung durch intelligente Regelung des Verbrennungsvorgangs in Müllverbrennungsanlagen** [22] in der Zusammenarbeit der Universität Freiburg mit der VON ROLL AG. Die von der Doktorandin abgelieferte Arbeit war ungenügend und das Projekt musste gegen Mitte 1999 abgebrochen werden.

Das LVV arbeitet auch im Auftrag der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV), die Mitglieder (Automobilhersteller und -Zulieferer) aus dem gesamten EU-Bereich vereint. Beim vom BFE und von der FVV gemeinsam finanzierten Vorhaben **Modellbildung DI-Ottomotor** [25] wurden sowohl experimentell als auch in der Simulation wesentliche Fortschritte gemacht. Erste optische Messungen mit dem neuen Brennverfahren wurden erfolgreich durchgeführt und der KIVA-Code wurde für die Beschreibung von "hollow-cone-sprays" schon geeignet angepasst.

## Bewertung 1999 und Ausblick 2000

Der gewonnene SAE-Preis [39] und die am LVV beim modifizierten LIEBHERR Motor erzielten Weltrekorde in Bezug auf Wirkungsgrad und NO<sub>x</sub>-Emissionen zeigen, dass die Programmaktivitäten eine gute Mischung von den Grundlagenarbeiten bis hin zur Industrieanwendung gefunden hat und sich das Programm auf dem richtigen Weg befindet. Das LVV und das PSI arbeiten erfolgreich mit europäischen Industrien zusammen und

neue Anfragen zur Zusammenarbeit mit französischen Automobilherstellern liegen vor und werden geprüft.

Trotz der erfolgreichen Anwendung der numerischen Simulation des LTNT bei ihren Industriepartnern (OERTLI Novobloc-Brenner) und (YGNIS Varinobrenner) 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<sub>x</sub>-Brenner – nur noch im Rahmen eines EU-Projekts realisierbar sein.

Planmässig konnte 1999 soll der Ausbau der P+D-Aktivitäten mit den neuen Projekten [23-25] abgerundet werden. Weitere geplante Aktionen wie der Ausbau der Kontakte mit anderen Forschungsförderungsorganen (FEV, KTI, FOGA) und Projekteinreichungen für EU-Forschungsprogramme werden sich noch bis ins Jahr 2000 fortsetzen. Dasselbe gilt mit dem Vorhaben, im Rahmen des SVV das Terrain auszuloten, mittelfristig in Zusammenarbeit Hochschule – Privatwirtschaft in Bezug auf die schadstoffarme stationäre Verbrennung einen neuen Quantensprung (< 9 ppm NO<sub>x</sub>) zu erreichen. Die Erfahrungen, die die Brennerfirmen mit der Einführung der LRV92 machten, lassen grüssen!

Ein besonderes Anliegen des Programmleiters ist die stärkere Koordination zwischen den verschiedenen Forschungsförderungsorganen (BFE, FEV und FOGA). Ab 2000 wird eine neu konzipierte Begleitgruppe mit Vertretern des BFE, FEV, FOGA, BUWAL und der Privatwirtschaft die Beurteilung der BFE-Projekte sowie die notwendige Koordination unter den verschiedenen Forschungsförderungsorganen sicherstellen.

Die wichtigsten Konferenzen werden die zweite Europäischen Kleinbrennerkonferenz (Stuttgart, März 2000, mit LTNT als Koorganisator) sowie das *Combustion Symposium* (Edinburgh, (UK), Juli 2000) sein, an denen wir mit Beiträgen dabei sein werden.

Betreffend Verstärkung der Öffentlichkeitsarbeit ist neben dem Forschungsprogramm 2000-2003 die Präsenz des Programms im Internet mit höchster Priorität durchzuführen. Dem vermehrten Publizieren von Fachartikeln für ein breiteres Publikum wird ebenfalls hohe Priorität zukommen.

## Liste der Projekte

- [1] J. Lee et al. LVV/ETH-Zürich: *Turbulente, chemisch reaktive Strömung in Motorenkammern* (JB)
- [2] I. Mantzaras et al. PSI-Villigen: *Tiefemperaturverbrennung bei hohen Drücken* (JB)
- [3] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung* (SB)
- [4] T. Gerber et al. PSI-Villigen: *Thermochemische Charakterisierung und spektroskopischer Nachweis von Sauerstoffverbindungen im Zusammenhang mit der Verbrennung sauerstoffhaltiger Brennstoffe* (JB)
- [5] W. Hubschmid et al. PSI-Villigen: *Laserspektroskopische Methoden zur Analyse von Flammen und Brennstoffsprays* (JB)
- [6] A. Obieglo und J.Gass, LTNT/ETH-Zürich: *NO<sub>x</sub>-Modellierung mittels PDF-Transportgleichungen* (JB)
- [7] P. Bajaj und J.Gass, LTNT/ETH-Zürich: *Schadstoffreduktion durch Teil-Vormischung* (JB)
- [8] L. Demiraydin und J. Gass. LTNT/ETH-Zürich: *Struktur turbulenter Diffusionsflammen* (JB)
- [9] L. Blum et al., LTNT/ETH-Zürich: *Experiment turbulente Gegenstromflamme* (JB)
- [10] R. Jeltsch et al., SAM/ETH-Zürich: *Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung* (JB)
- [11] M. Koebel, PSI-Villigen: *NO<sub>x</sub>-Reduktion mit Harnstoff-SCR* (JB)
- [12] B. Ineichen, LVV/ETH-Zürich: *Ermittlung des geometrischen Aufbaus von Russ-Primärpartikeln und Validierung der Simulation des Russbildungsmechanismus* (SB)
- [13] B. Stauffer, UNI-Bern: *Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration anhand polarer Eiskerne* (JB)

## Liste der P+D-Projekte

- [14] R. Schubiger et al., LVV/ETH-Zürich: *Common Rail Brennverfahren für EURO-III und EURO-IV-taugliche Nutzfahrzeugdieselmotoren* (JB)
- [15] F. Spinner, SIG, Neuhausen: *Entwicklung einer Hochdruckpumpe mit Regelung, Phase II* (JB)
- [16] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Einsatz der rechnergestützten Simulation für die turbulente Verbrennung in der industriellen Produktentwicklung (CRFD)* (JB)
- [17] 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* (JB)
- [18] Ch. Nellen et al., LVV/ETH-Zürich: *Swiss Motor, FOGA Projekt*
- [19] W. Hubschmid et al. PSI-Villigen: *Mischung und Verdampfung von Brennstoffsprays in Gasturbinen-Vormischbrennern* (JB)

- [20] K. Herrmann et al., LVV/ETH-Zürich: *Flammenstruktur und NO<sub>x</sub>-Bildung in turbulenten Vormischflammen* (JB)
  - [21] J. Gass et al. LTNT/ETH-Zürich: *NO<sub>x</sub>-Reduktion beim Ygnis Varino-Brenner* (JB)
  - [22] R. Berksun, IIUF, Universität Freiburg: *Effiziente Energienutzung durch intelligente Regelung des Verbrennungsvorgangs in Müllverbrennungsanlagen* (JB)
  - [23] B. Ineichen et al., LVV/ETH-Zürich: *Demonstration eines optischen Sensors zur Unterstützung der Entwicklung von schadstoffarmen motorischen Verbrennungssystemen*
  - [24] Th. Gerber, PSI-Villigen: *Investigation of Soot and NO-Production in Spray Combustion of Acetal/Diesel Mixtures* (JB)
  - [25] M. K. Eberle, LVV/ETH-Zürich: *Modellbildung Direct Injection (DI) Ottomotor* (JB)
- (JB) Jahresbericht 1999 [vorhanden](#)  
(SB) Schlussbericht vorhanden

## Referenzen

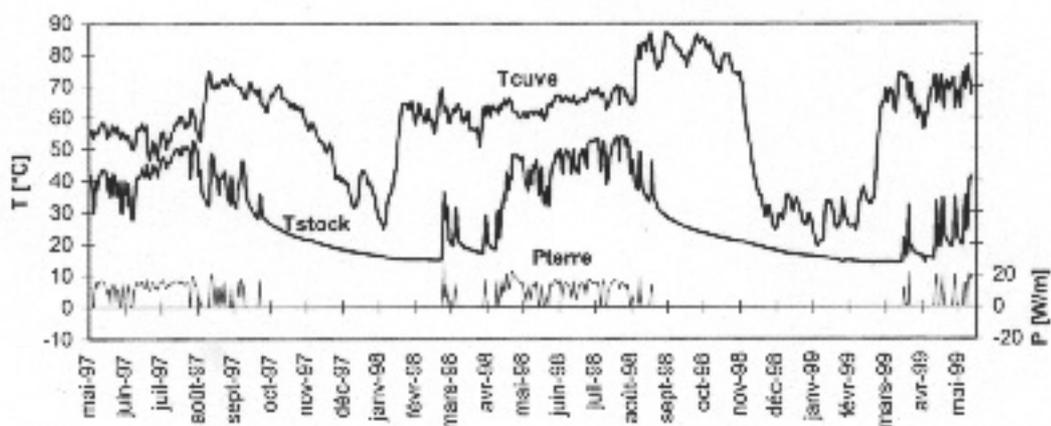
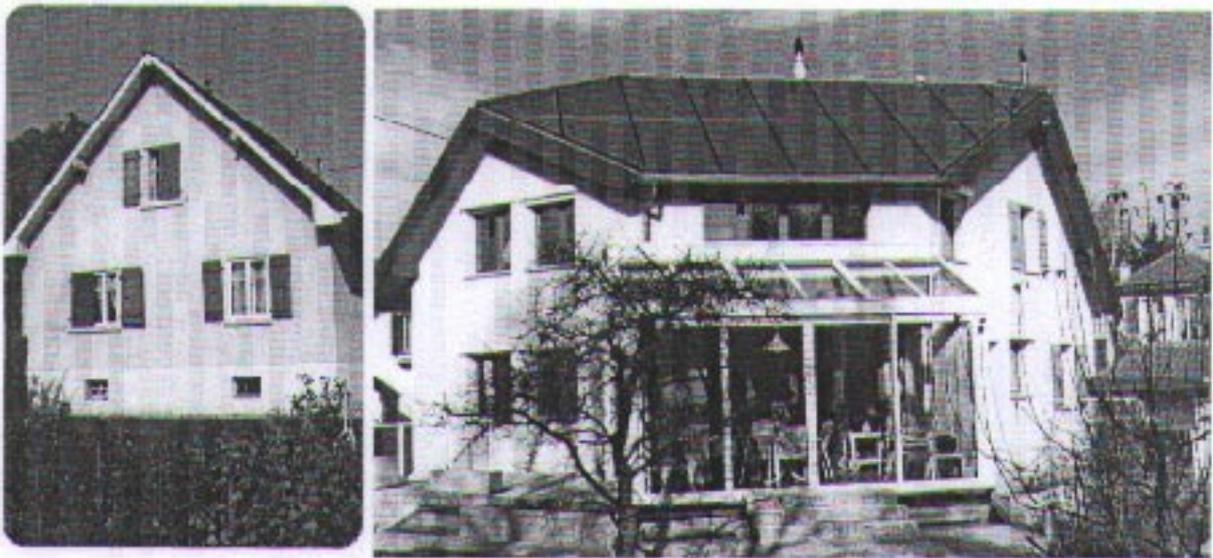
- [26] A. Hintermann: *Forschungsprogramm 2000-03 "Feuerung&Verbrennung"*, BEW, zu beziehen bei ENET
- [27] M. Ochs: *Verdunstung monodisperser, frei beweglicher Brennstoff-Tropfen in einer turbulenten Heissluftströmung*, Dissertation ETH-Zürich No. 12984, (1999)
- [28] J. Maurer: *A Genuinely Multi-Dimensional scheme for the Navier-Stokes Equations and its Applications to LES with a Scale-Residual Model*, Dissertation ETH-Zürich No. 13304, (1999)
- [29] T. Gradinger: *Spray Modelling with Application to Fuel Air Premixing* Dissertation ETH-Zürich No. 13497, (1999)
- [30] G. B. Drummond, Ed.: *Conservation in Combustion, Celebrating the second decade of international collaborative research*, June 1999.
- [31] J. Gass, *Programm und Abstracts des siebten Jahrestreffens des ERCOFTAC-Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffbildung*, Mai 1999
- [32] G. B. Drummond, Ed.: *XX Task-Leaders-Meeting*, Proc. IEA-Conf. Ohtsu, September 1999
- [33] Th. Gerber, *Programm und Abstracts der vierten Jahrestagung der (SVV)*, August 1999
- [34] A. Hintermann, *Forschung auf Bedürfnisse der Industrie zugeschnitten*, Gesundheit- und Umwelttechnik, Okt.1999
- [35] K. Boulouchos, *Methoden der dieselmotorischen Verbrennungssimulation: Physikalische Grundlagen, Leistungsgrenzen und Zukunftspotential*
- [36] K. Boulouchos, *Strategies for Future Engine Combustion Systems – Homogeneous or Stratified Charge?*
- [37] M. Kleemann: *Beschichtung von Cordierit-Wabenkörpern für die selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden*, Dissertation ETH-Zürich No. 13401, (1999)
- [38] M. Flury: *Experimentelle Analyse der Mischungsstruktur in turbulenten nicht vorgemischten Flammen*, Dissertation ETH-Zürich No. 13312, (1999)
- [39] K. Boulouchos and H. Stebler, *Combustion Features and Emissions of a DI-Diesel Engine with Air Path Optimization and Common Rail Fuel Injection*, SAE-Technical Paper No 98193, (1998).

## STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse  
sur les activités 1999 du programme de recherche et du programme P+D

**Jean-Christophe Hadorn**

[jchadorn@swissonline.ch](mailto:jchadorn@swissonline.ch)



### RENOVA

Une rénovation exemplaire: elle a atteint l'autonomie avec des énergies renouvelables (85 MJ/m<sup>2</sup> an de bois) avec 30 m<sup>2</sup> de toiture solaire et 11 m<sup>3</sup> de stock à eau. Le prototype de stock saisonnier diffusif individuel est peu efficace (évolution des températures de la cuve et du stock souterrain de mai 97 à mai 99).

## Centres de gravité du programme

Le programme de recherche "Stockage de chaleur" a été organisé pour toute la période 1996-1999 autour de trois types de stockage saisonnier : cuve à eau, stocks diffusifs, stockage en aquifère.

Les centres de gravité ont été en 1999:

- de préparer le document vulgarisant les résultats d'analyse de deux ensembles d'habitation, l'un neuf, l'autre à rénover, pour lesquels une installation solaire avec un **stock souterrain diffusif** a été optimisée en 1997/98,

- de soutenir l'étude du système avec **stock diffusif** prévu par la SUVA à Root,
- d'obtenir les résultats de tous les stocks pilotes en cours d'étude depuis 3 ans,
- de finaliser une thèse sur le stockage en aquifère,
- d'initier des travaux de recherche en matière de **nouveaux matériaux de stockage** pour le solaire actif.

## Buts visés pour 1999

### a) Stockage en cuve à eau

Le rapport final de l'installation RENOVA était attendu, avec les conclusions quant à l'autonomie énergétique et aussi l'intérêt d'un stock souterrain diffusif pour une villa.

L'étude des possibilités de se passer de cuve solaire dans un bâtiment d'une certaine ampleur devait conduire à des recommandations quant au concept de capteurs solaires couplés à une dalle active.

### b) Stockage diffusif

Une brochure de synthèse de tous les résultats obtenus à Winterthur après 3 ans de recherche sur l'optimisation d'installations solaires avec stockage saisonnier diffusif était attendue.

Le suivi du Collège de Peseux, équipé d'un stock diffusif de 23'000 m<sup>3</sup> qui fonctionne très bien, était à poursuivre pour optimiser encore les conditions de marche du système de cogénération. Les bons résultats obtenus sur ce pilote devaient être diffusés en trois langues.

Le bilan de 5 années de mesures du projet SERSO de dégivrage en hiver d'un pont par un stock de chaleur solaire d'été était attendu.

Un test de réponse thermique du sous-sol *in situ* à Root pour un éventuel stock saisonnier pour le nouveau complexe de la SUVA devait être réalisé. Il doit servir de base à une étude d'optimisation avec le logiciel PileSim pour rassurer et convaincre le promoteur du projet de s'intéresser à cette nouvelle technologie déjà démontrée à Peseux et Wollerau.

Les résultats des pilotes de Buchrain et de St Gall étaient souhaités.

### c) Stockage en aquifère

Les travaux d'une thèse de 3 ans sur les conditions de fonctionnement de petits stocks en aquifère devaient se terminer par une soutenance de thèse en 2000.

### d) Stockage en nouveau matériau

La recherche de nouveaux matériaux pour le stockage à court terme de l'énergie solaire thermique, comme la zéolithe, devait débiter par une analyse bibliographique.

## Travaux effectués et résultats obtenus

### a) Stockage en cuve

Les pertes thermiques de la cuve de stockage saisonnier de l'installation solaire du bâtiment de l'**Office fédéral de la statistique (OFS)** ont été analysées en détail, une fois les mesures faites avant le remplissage de la cuve. Pour arriver aux valeurs mesurées, il faut multiplier les valeurs calculées par 1,3 environ pour tenir compte de la mise en place

réelle de l'isolant avec des joints imparfaits (12 cm de laine minérale et 60 cm de polystyrène expansé) et des ponts thermiques inévitables, notamment par la base du stock. Le coefficient k moyen de l'enveloppe est de 0,23 W/m<sup>2</sup>·K. Le stock est en exploitation depuis l'été 1999 et les premières mesures indiquent que les consommations du bâtiment sont plus importantes que prévues, et ainsi déchargent rapidement le stock [1].

À Chambésy près de Genève, les mesures du projet **RENOVA** sont terminées. L'installation comporte une cuve de 11 m<sup>3</sup> chargée par 31 m<sup>2</sup> de capteurs solaires, ainsi qu'un stock souterrain diffusif de 7 sondes de 7 m placées sous la maison. À la base, la maison est ancienne et a été agrandie et rénovée tout en essayant de tendre vers l'autonomie de la production en chaleur par une combinaison solaire-bois. Le pari est atteint : le chauffage au gaz n'a pas été utilisé pendant les deux années de mesure et l'indice de consommation énergétique a été de 85 MJ/m<sup>2</sup>·an en bois. Les conclusions du CUEPE concernant les composants de l'installation sont les suivantes [2]:

- lors de rénovations, c'est l'isolation de l'enveloppe qui est déterminante,
- l'apport de l'énergie solaire active pour le chauffage direct, sans stockage saisonnier, est limité, même avec une toiture solaire de haute qualité. Le rendement annuel atteint 36%, la productivité est de 470 kWh/m<sup>2</sup>·an, mais seulement 21 kWh/m<sup>2</sup>·an sont utilisés pour l'eau chaude et 25 pour le chauffage, le reste étant injecté dans le stock souterrain et n'étant pratiquement jamais récupéré. Il convient pour la villa individuelle de ne pas sur-dimensionner la surface de captage puisque nous n'avons pas de solutions de stockage saisonnier (10 à 12 m<sup>2</sup> sont suffisants pour une villa type MINERGIE),
- le stockage saisonnier diffusif est impraticable pour les maisons individuelles, même si dans le cas de RENOVA quelques apports passifs par le sous-sol ont pu être mesurés,
- la puissance évacuée en été par les sondes a été de 15 à 25 W/m, soit 60 W/m de forage, et la température du sol proche des sondes atteint 55 °C en fin d'été,
- les pertes du stockage à eau de 11 m<sup>3</sup> représentent 35% de l'énergie injectée. Le facteur k de la cuve est de 21 W/K.

En conclusion de ce projet, une maison rénovée peut être autonome du point de vue de la chaleur grâce à l'énergie solaire, mais nous n'avons pas d'autre solution de stockage saisonnier pour une villa qu'une cuve très isolée de taille importante (1 à 3 m<sup>3</sup> par m<sup>2</sup> de capteur).

#### b) Stockage diffusif

À l'École d'ingénieurs de Winterthur (ZHW), le projet de recherche sur la réduction du coût du **stockage souterrain diffusif** et l'analyse des conditions optimales d'une réalisation dans la région de Zurich a été achevé par la publication du rapport final (300 pages) et la réalisation d'une plaquette de 8 pages résumant les résultats de l'optimisation systémique [3]. Cette plaquette doit être distribuée en 2000 dans «Ingénieurs et Architectes suisses»,

version alémanique, dans le but de motiver un groupe d'architectes, d'ingénieurs ou de promoteurs pour une réalisation que nous recherchons. Les résultats principaux du projet sont les suivants:

1. un stockage saisonnier diffusif n'est envisageable que pour une charge thermique annuelle de 1'000 MWh dans le cas d'une rénovation et de 600 MWh dans le cas d'une construction neuve. Ceci limite singulièrement les cas d'application en Suisse où l'habitat individuel est la règle.
2. Le volume minimal de stock «thermiquement» viable, faiblement isolé artificiellement, est de 5'000 m<sup>3</sup>, mais il vaudrait mieux viser un stock de 50'000 m<sup>3</sup> pour atteindre des efficacités annuelles dépassant 50%, sans recours à une pompe à chaleur.
3. Dans le cas de la rénovation de 135 logements dans la région de Zürich (surface de référence énergétique de 14'000 m<sup>2</sup>), une couverture solaire de 54% est à recommander. Elle nécessite 1'800 m<sup>2</sup>, un stock de 8'800 m<sup>3</sup> et un stock tampon de 180 m<sup>3</sup>. Les surcoûts se monteraient à 2,1 MCHF (millions de francs), soit 15'500 CHF par logement.
4. Dans le cas de logements neufs à Zürich (120 appartements, 230 MJ/m<sup>2</sup>·an), une fraction solaire de 60 à 70 % demanderait 1'650 m<sup>2</sup> de capteurs, un tampon de 160 m<sup>3</sup> et un stock saisonnier de 10'000 m<sup>3</sup>. L'investissement pour le solaire serait de 1,5 MCHF, ou 12'500 CHF par logement.

Avec la publication de ces résultats, nous espérons voir naître dans les deux ans à venir un projet d'installation solaire avec stockage diffusif capable de couvrir sans pompe à chaleur plus de 50% des besoins d'un ensemble de plus de 100 logements. Il s'agirait d'un premier pilote en Suisse, pour une solution pleine d'avenir qui est techniquement peu risquée si elle est bien étudiée. Nous avons en Suisse le savoir-faire pour une telle réalisation : il manque le promoteur et le financement. Le projet de recherche sera poursuivi dans cette voie, pour pouvoir proposer une solution avec différents types de financement dont le *contracting* énergétique.

À l'aéroport de Zurich sera prochainement construit un grand bâtiment nécessitant 350 pieux de fondation. Le bâtiment **Dock Midfield** devrait être chauffé et climatisé en utilisant le sous-sol via le concept de pieux échangeurs [5]. Après avoir mesuré la caractéristique thermique de l'échange fluide-sol *in situ* par un test de réponse, une simulation détaillée de l'installation avec le logiciel PileSim, mis au point en 1997/98 par le LASEN-EPFL, a été réalisée. L'installation a pu être optimisée avec les outils de calcul les plus modernes avant la construction. Rappelons que cette méthode, souvent décriée par les ingénieurs ne maîtrisant pas

les outils de simulation, a donné des résultats très probants pour le Collège de Peseux, dont l'installation fonctionne comme prévu, évitant ainsi déception et analyse *a posteriori* de ce qui aurait dû être fait. Dans le cas de Dock Midfield, en mi-saison, chauffage et refroidissement peuvent alterner dans une même journée rendant l'analyse dynamique absolument nécessaire. La conductibilité thermique du sol a été déterminée par mesure à 1,8 W/m.K, les besoins en chaleur ont été estimés à 2'720 MWh/an et ceux de froid à 1'240 MWh/an. PileSim indique que 306 pieux de 26,8 m de long sont nécessaires, pour une injection spécifique de 135 kWh/m.an et une extraction de 48 kWh/m.an. La pompe à chaleur devrait couvrir 85% des besoins en chaleur, et 90% des besoins en froid devraient être couverts en direct par les pieux. Une analyse de sensibilité a été faite ; cela est nécessaire lorsque l'on sait combien difficile est l'évaluation des charges de froid dans un bâtiment complexe. Les résultats sont très précieux pour les ingénieurs chargés de l'exécution et associés à cette recherche dès le début.

PileSim, outil unique pour le calcul des systèmes de pompe à chaleur sur pieux, a été rendu disponible publiquement début 1999 via ENET pour un prix de 500 CHF. Le support est assurée par le chercheur principal via Internet. La promotion a été faite dans le cercles des spécialistes sur Internet via email. Elle s'avère insuffisante pour atteindre les chiffres de vente espérés (50 exemplaires vendus en 2 ans).

Le projet **SERSO** 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 m<sup>3</sup>, chargé en été par un collecteur de 200 m<sup>2</sup> situé dans la chaussée. L'hiver 1998/99 a été particulièrement froid, et pour la première fois depuis 5 cycles, il a été soutiré en hiver 120 MWh, soit plus d'énergie que les 100 MWh injectés durant l'été, ce qui a rééquilibré le bilan des 5 années passées. La charge de l'été 99 a été efficace, du fait de la température du stock plus basse (40% de rendement en fonctionnement, 17% sur l'ensemble de l'été). La température du stock évolue entre 10 et 14 °C. Le stock peut paraître sur-dimensionné avec un si faible différentiel de travail. L'installation fonctionne au mieux après divers ajustements faits dans le but de réduire les temps de fonctionnement des circulateurs de charge du stock (600 à 800 heures par an). C'est le HTA Burgdorf qui a effectué le suivi des cycles 4 et 5. La suite de l'exploitation devrait se faire avec un suivi minimum de la part du propriétaire. Nous poursuivrons la recherche par l'analyse par simulation comparée aux mesures pour pouvoir effectuer des analyses de sensibilité, notamment autour du volume et donc du coût du stock [6].

L'installation SERSO fonctionne bien grâce à une surveillance active ; mais, du fait de son coût, la

technologie peine à trouver un marché (ponts, routes, aéroports, parking de grand magasin,...). Dans une telle application, le concurrent est le sel, dont le coût direct est cependant faible. Les coûts externes indirects (personnel présent de toute façon, corrosion des véhicules, pollution des lacs) ne sont malheureusement pas comptabilisés.

### c) Stockage en aquifère

Dans une thèse sur la **faisabilité générale du stockage de chaleur en aquifère**, le Laboratoire de géologie de l'EPFL a poursuivi, après l'analyse de l'échec de Saillon, l'étude par simulation des conditions qui permettraient de réaliser des stocks saisonniers en aquifère de taille modeste, adaptés aux conditions de la Suisse. Il a été découvert qu'il existe un débit d'injection optimal pour une épaisseur donnée de l'aquifère, que l'accroissement du débit de charge augmente l'efficacité du stockage jusqu'à une limite, et que la naissance de la convection naturelle, qui peut ruiner le stockage, dépend de manière complexe des trois facteurs, perméabilité, épaisseur de l'aquifère, et débit de charge [4].

Cette étude se terminera en 2000 avec la soutenance de la thèse du chercheur, qui devrait donner les conditions minimales de réussite d'un stock thermique à plus de 30 °C en aquifère.

### d) Nouveaux matériaux de stockage thermique

Dans une étude prospective bibliographique, le SPF de Rapperswil, centre de recherche solaire suisse, a évalué les possibilités de la **zéolithe** pour le stockage solaire. 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.

Les propriétés thermiques du matériau permettent d'envisager une réduction de volume d'un facteur 3 pour le stockage court terme, voire 4, pour du stockage saisonnier. Le coût pourrait cependant annuler cet avantage.

L'idée de la zéolithe n'est pas nouvelle en Europe, mais n'a encore jamais vraiment abouti pour des raisons qui sont actuellement analysées. Le SPF envisage de construire un prototype de laboratoire, de taille adaptée au besoin d'une villa, soit en système ouvert avec l'air humide comme caloporteur, soit en système fermé nécessitant le vide.

D'autres matériaux, comme le silicagel, sont aussi à évaluer, techniquement et économiquement ; mais des données scientifiques de comportement en phase d'échange manquent et nécessiteraient des travaux de recherche [7].

## Coordination et collaboration nationale

La coordination avec les programmes "Géothermie" et "Chaleur de l'environnement" est régulière. Nous avons participé au comité scientifique de la conférence internationale « Géothermie » qui a eu lieu à Bâle en automne 1999.

Nous visitons régulièrement toutes les équipes de recherche et leur rapportons les progrès nationaux et internationaux.

Nous voulons maintenir la compétence internationale de l'EPFL en matière de simulations d'installations solaires avec stocks diffusifs et de pompes à chaleur sur pieux échangeur. Ceci nous permet d'être efficace avec des ressources limitées.

La collaboration nationale dans les divers projets de stockage est bonne.

## Coordination et collaboration internationale

Nous suivons en détail le projet allemand de Neckarsulm (stock diffusif de 5'000 m<sup>3</sup>, pilote d'un stock de 100'000 m<sup>3</sup> à terme, chargé par 10'000 m<sup>2</sup> de capteurs solaires, pour une fraction solaire de 50% sans pompe à chaleur). Nous aimerions réaliser en Suisse une telle installation qui nous semble être très généralisable à l'avenir. C'est dans cette optique que le développement du projet de Winterthur a été conçu. Il faut désormais concrétiser la chose par une réalisation que nous recherchons.

En ce qui concerne l'AIE, nous suivons, sans participation officielle de la Suisse, le projet intitulé UTES (*Underground Thermal Energy Storage*). Les réussites

récentes concernent les stocks de froid en aquifère dont le développement économique se poursuit dans les pays du nord de l'Europe et notamment aux Pays-Bas, avec plus de 100 réalisations en fonctionnement, avec des temps de retour sur investissement de moins de 5 ans.

D'une manière générale, nos collaborations internationales en matière de stockage sont faibles, faute de moyens financiers et de projets très novateurs. Nous espérons que la recherche sur la zéolithe pourra générer à terme un projet AIE.

## Transferts à la pratique, Projets P+D

Le programme de recherche « stockage de chaleur » a été orienté vers la pratique, afin de trouver des solutions économiquement viables pour le stockage saisonnier. Cet objectif s'avère impossible à atteindre dans les conditions actuelles du marché de l'énergie sous forme de chaleur.

Les projets P+D du programme ont été orientés depuis 1991 principalement sur le stockage diffusif, avec pompe à chaleur et recharge estivale pour de grands bâtiments.

Le programme souffre depuis 2 ans du manque de grandes constructions neuves en Suisse, et du coût des solutions alternatives.

Au cours de 1999, presque tous les 12 projets pilotes sont arrivés à terme, sauf deux qui sont en retard suite à des mises en service plus difficile qu'espéré.

Le plus remarquable pilote est l'installation du **Collège de Peseux**, Neuchâtel [9]. Le stock de 29'000 m<sup>3</sup> avec ses 30 sondes de 60 m de profondeur fonctionne comme prévu par les simulations faites lors du dimensionnement. Plusieurs publications ont été réalisées en 1999 pour faire connaître le concept et les résultats. Rappelons que la rentabilité économique n'est pas lointaine. Il faudrait un gaz à 6.4 cts/kWh au lieu des 5 actuellement. Le suivi continue en 1999/2000 pour

confirmer les conclusions que nous avons résumées dans notre rapport annuel 1998. L'exemple de Peseux sera peut-être déterminant pour le grand projet de la SUVA à Root, pour lequel le choix doit intervenir en 2000, après 3 ans de discussion et de génération de variantes auxquelles nous avons été associés et auxquelles nous avons apporté notre savoir-faire.

Le projet pilote de **Wollerau** est terminé. Les mesures détaillées ont été analysées depuis juin 1996. Le rapport final a été publié [8]. Le stock évolue entre 1,5 °C et 16 °C et fonctionne selon l'attente. Le cop annuel de la pompe à chaleur est de 3,9. Les difficultés ont surtout été liées à la mise en service d'une installation complexe. Comme à Peseux, la technologie de stockage de chaleur à basse température dans le sous-sol en été, la reprise en hiver par une pompe à chaleur à bonne performance dans une installation fonctionnant en monovalent et l'utilisation estivale en *free-cooling* sont prouvées. Nous utiliserons les mesures dans un modèle de simulation à développer en 2000 pour rechercher l'optimum d'une telle installation. Le coût de l'énergie est difficile à comparer avec celui d'une installation conventionnelle puisque l'on produit du chaud et du froid. Il est de l'ordre de grandeur d'environ 16 à 20 cts/kWh.

Le rapport final concernant l'installation de démonstration de **Buchrain** est disponible. L'installation sollicite une masse de 200'000 m<sup>3</sup> de rocher par 19 sondes en double-U de 40 mm de diamètre, de 200 m de profondeur, espacées de 7,90 m et disposées sur deux rangées distantes de 10 m. Elle chauffe un complexe résidentiel et commercial de 460 kW de demande. Les mesures (de novembre 1996 à novembre 1998) ont montré que 85% de l'énergie annuelle (690 MWh/an) a été fournie par la pompe à chaleur de 250 kW condenseur avec un cop annuel de 2,71. Ce résultat, obtenu après diverses améliorations (2,13 durant le premier hiver de mesures), est à la limite inférieure de la prévision, du fait des températures de départ plus élevées que prévues (50 à 62 °C) et de la pompe de 4 kW pour le stock qui a fonctionné toute l'année pour absorber les 100 kW de rejet des réfrigérateurs alimentaires. Cette pompe devrait être équipée en 2000 d'un dispositif de variation de fréquence. La pompe à chaleur a un cop mesuré de 3,3 dans les conditions standards (circuit évaporateur à 6/3 °C, condenseur à 50/40 °C). La chaleur produite en été par l'installation frigorifique du centre commercial Migros-Tschannland (130 kW de froid) a été absorbée en totalité par le stockage en rocher, régénérant ainsi le stock en été. Les 3'600 m de forage (14'500 m de tubes échangeurs) constituant le stock ont absorbé 96 kWh/m en recharge (max. 20 W/m) et fourni 114 kWh/m en décharge (max. 50 W/m). Il n'a pas été possible d'utiliser le stock en *free cooling*, sa température ne descendant jamais sous la limite de 12 °C. Les températures de fluide caloporteur ont évolué entre 7 °C en février 1997 et 17 °C en août 1998. Le coût de l'énergie fournie (chaleur + froid) a été d'environ 6 cts/kWh, en ne considérant que l'électricité (en moyenne 16 cts/kWh) et le mazout (5,9 cts/kWh) consommés, sans les amortissements.

Le pilote réalisé et mesuré est conforme à l'attente et fonctionne à satisfaction du maître d'ouvrage. Il est prouvé que le stockage saisonnier diffusif de grande taille peut jouer le rôle d'encaisseur d'énergie issue du refroidissement en été et de fournisseur de chaleur en hiver. Il fonctionne également comme stock tampon journalier lorsque les besoins de froid industriel persistent toute l'année comme à Buchrain [13].

Le projet pilote du bâtiment de la Caisse d'assurances cantonales de Lucerne, **Buchenhof**, à Aarau comporte 20 sondes de 120 m. Une fuite dans le circuit de liaison entre le stock et la chaufferie, détectée tardivement, n'a pas permis une mise en service complète du stock avant juin 1999, soit avec un an de retard. La présence d'une chaudière de sécurité capable de tout assumer en hiver n'est de ce point de vue pas favorable pour forcer une réparation rapide. La première charge du stock en été 1999 a permis d'injecter 457 MWh entre 25 et 31 °C, issus du refroidissement du bâtiment (2 x 337 kW). Les mesures se poursuivront en 2000 pour obtenir au moins un cycle complet [15].

Le projet pilote de la **Hochschule St. Gallen** comporte un groupe de sondes délimitant un stock de 20'000 m<sup>3</sup>, utilisé en hiver par une pompe à chaleur et régénéré en été par les rejets de climatisation de l'école. Après injonction, le bureau d'études a finalement répondu à nos demandes. La mise en service de l'installation a été très difficile, avec un système centralisé de commande dont la programmation n'avait pas été terminée par le fournisseur. Après 2 ans de retard dans la mise en service, les premiers résultats montrent que le stock n'est pas totalement rechargé en été du fait d'une médiocre performance de la machine en groupe de froid, qui pourrait être due à des valeurs de consigne incorrectes. La pompe à chaleur a un cop mensuel moyen de 2,3 en hiver et de 1,2 en été ! En 1999, l'appoint a fourni deux fois plus que prévu, soit 180 MWh ou 52% de la demande en chaleur. Les mesures doivent se poursuivre en 2000 [10].

Les deux bâtiments au standard MINERGIE du projet **Plan-Léman** de 20 appartements ont été réalisés à Renens (7'800 m<sup>3</sup> chauffés, 40 kW max., 14 W/m<sup>2</sup> de plancher). Leur particularité est d'avoir une dalle active de type BATISO de l'ex société Geilinger, qui peut jouer le rôle de stock actif pour une installation solaire. Il s'agit d'un cas d'étude concret mais théorique, le propriétaire étant hésitant pour le choix final du solaire. À terme, les bâtiments pourraient s'insérer dans un ensemble plus large et être connectés à un stock diffusif central. Le LASEN EPFL évalue par simulation avec TRNSYS les possibilités optimales. Un modèle dynamique de bâtiment (Type 56) a été utilisé. La demande d'énergie de chauffage est de 90 MJ/m<sup>2</sup>.an, ce qui laisse 70 MJ/m<sup>2</sup>.an pour l'eau chaude sanitaire si l'on veut satisfaire Minergie. Une installation solaire sera nécessaire pour rester au standard Minergie.

Les simulations indiquent que des absorbeurs solaires, non vitrés, connectés à la dalle active, sont économiquement intéressants pour des fractions solaires annuelles inférieures à 30%. Au delà, des capteurs vitrés (investissement de 500 CHF/m<sup>2</sup> contre 250 pour les absorbeurs) sont nécessaires pour atteindre 60%, qui est la limite de couverture que l'on peut réaliser avec un stock par dalle active dans un climat comme celui de Renens. Le coût du solaire augmente très fortement et dépasse 40 cts/kWh, si l'on cherche à faire plus de 30% solaire. Avec un chauffage de sol, moins inerte qu'une dalle, on réaliserait un système appelé « PSD » ou plancher solaire direct, et la limite serait encore plus basse (20% solaire sans autre type de stockage). La dalle active a donc un avantage sérieux par rapport au chauffage de sol, outre qu'elle peut permettre un refroidissement agréable en été [16].

Après trois ans d'avant-projet, la **SUVA** est en passe de choisir une solution avec stockage saisonnier proche du concept du collège de Peseux pour son grand projet de **Root** (LU). Compte tenu de la jeunesse de la technique et donc de la méconnaissance par les ingénieurs des méthodes de dimensionnement dynamique qui sont absolument nécessaires pour un

projet fiable, nous avons soutenu les travaux de simulations prévisionnelles par le spécialiste suisse pour un système optimal. Les travaux ont été réalisés en deux temps, comme pour Dock Midfield. Deux tests de réponse sur deux sondes de 160 m réalisées sur le futur site ont été conduits par les géologues et analysés numériquement pour déterminer les caractéristiques thermiques du sol. Les résultats donnent 3,0 W/m.K pour la conductibilité thermique du terrain et 0,1 K/(W/m) pour la résistance thermique effective des sondes. Puis le logiciel Pilesim a été utilisé pour déterminer le stock idéal satisfaisant les demandes en chaleur et en froid prévues par les ingénieurs de projet. Les résultats conduisent à 49 sondes de 160 m de profondeur, espacées de 6,5 m, connectées en parallèle. Il n'est pas recommandé de tenter de gérer deux zones dans le stock, l'une froide à l'extérieur et l'autre chaude au centre, comme certains ingénieurs le proposent. Ceci complique inutilement la gestion du stock. L'expérience nous a appris que les charges de froid estimées en avant-projet sont bien supérieures à la réalité, ce qui limitera la recharge du stock en été. Il a donc été recommandé de recourir à plus de 900 m<sup>2</sup> d'absorbeurs solaires pour recharger le stock dans toutes les hypothèses. Un concept de système a été suggéré parmi 3 variantes et dimensionné [14].

Les projets précédents concernaient des bâtiments collectifs. Au cours du programme 1996-1999, des projets

pilotes de stockage en habitat individuel ont été testés. SOLERI s'est terminé en 1998, RENOVA en 1999, deux autres installations n'ont pas encore donné des résultats probants, Les Brenêts et Épalinges.

L'installation de **Les 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 m<sup>2</sup> de capteurs à air. La couverture transparente de la façade solaire, qui était devenue non transparente, devait être changée depuis 1997. Après analyse détaillée de divers matériaux anti-reflets, le propriétaire a opté pour le polycarbonate Chairmat en 2 mm. Ce n'est qu'en novembre 1999 que la nouvelle façade a pu être opérationnelle, le retard étant occasionné par la difficulté d'obtenir une décision de la commune et par la foudre qui a endommagé l'ordinateur de mesure et de commande. Ce projet est en auto-construction avec des moyens limités, et les résultats ne sont plus attendus avant 2000. Ils seront cependant médiocres, au vu de ce qui a déjà été testé [12].

Un stock diffusif constitué de 7 forages de 70 m pour une villa familiale à **Épalinges** est chargé à partir de 36 m<sup>2</sup> de capteurs solaires. Ce projet, en test depuis 3 cycles, n'a donné aucun résultat probant quant au stock saisonnier, dont les pertes thermiques sont importantes et dont la charge estivale est insuffisante. Le rapport annuel 1999 n'a toutefois pas été reçu [11].

## Évaluation 1999

La recherche sur les configurations optimales de stockage solaire diffusif a livré ses résultats. Il faut désormais les concrétiser par des réalisations, mais nous avons peu de prise sur le marché.

Les outils de simulation que nous avons à disposition sont désormais de bonne qualité et permettent d'envisager un projet à prévision fiable, afin d'emporter les dernières hésitations des promoteurs. Deux études pilotes ont été financées dans cet esprit : Dock Midfield, à Kloten, et Suva, à Root. Nous pensons que cela est une bonne stratégie pour diffuser les connaissances tout en réalisant des pilotes.

La recherche concernant les nouveaux matériaux de stockage solaire à court terme (zéolithe) a débuté. Il y a un certain espoir, mais la complexité par rapport à un stock à eau semble un obstacle majeur.

En ce qui concerne les projets pilotes, on confirme que les stocks diffusifs de grande taille exploités avec des pompes à chaleur et une recharge estivale sont une technologie opérationnelle sans problème spécifique. Reste le problème du coût de l'énergie d'un facteur 1,5 plus élevé que les solutions conventionnelles en chauffage. Cependant en combinaison chaud et froid pour des bâtiments nécessitant du refroidissement, la technologie apparaît concurrentielle.

Les nouveaux projets sont depuis 1998 très peu nombreux, d'une part, à cause de la faiblesse du secteur du bâtiment et, d'autre part, à cause d'un certain rejet de solutions vues comme trop complexes, et aussi par manque d'information et de conviction des maîtres de grands ouvrages.

Le stockage souterrain à l'échelon de la villa n'est pas faisable et son étude sera abandonnée.

## Perspectives 2000

Une nouvelle orientation du Programme pour 2000-2003 a été préparée en 1999 et acceptée par la CORE.

Nous recherchons un projet de stockage solaire diffusif sans pompe à chaleur de plus de 600 MWh. Les méthodes de financement seront évaluées par Winterthur

pour compléter le dossier « installation solaire optimale avec stockage diffusif » et convaincre des promoteurs.

Nous utiliserons les données des mesures de SERSO et Wollerau pour simuler ces installations, valider le mo-

dèle et effectuer des variations paramétriques. Nous sommes convaincus qu'une expérience pilote est d'autant plus enrichissante que l'on utilise les mesures pour valider les simulations afin de mieux comprendre ce qui s'est passé, et ce que l'on pourrait améliorer, cela dans l'optique de réduire le coût tout en augmentant performances et fiabilité. C'est un principe méthodologique scientifique que nous défendons avec succès depuis 20 ans.

Le stockage en aquifère sera abandonné comme thème de recherche, peu porteur, car trop complexe à maîtriser actuellement, compte tenu du coût bas de l'énergie sous forme de chaleur. Seuls des projets réels

avec climatisation active par aquifère pourraient nous faire changer d'avis.

Le travail de recherche sera plus orienté vers le stockage solaire à court terme au SPF Rapperswil, dans le but de réduire le coût spécifique ou/et le volume de stockage. Un prototype de 1 m<sup>3</sup> avec la zéolithe devrait être construit.

Le projet de la SUVA à Root devra démarrer en 2000 et mobilisera des moyens financiers importants, compte tenu de la taille du projet pilote.

## Liste des projets de recherche

- [1] P. Jaboyedoff, SORANE, *Lausanne: Mesures et calcul des pertes de chaleur de la cuve de stockage de l'installation solaire de l'OFS à Neuchâtel* (RF révisé décembre 1999)
- [2] B. Lachal, CUEPE, *Genève: RENOVA: installation solaire active avec injection de chaleur en sous-sol* (RA) <http://www.unige.ch/cuepe/rapport/>
- [3] H. Juzi, TWI, *Winterthur: Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden zur Wärmeversorgung von grösseren Überbauungen* (RF)
- [4] S. Dupasquier, EPFL-Lausanne: *Faisabilité du stockage de chaleur en aquifère en Suisse* (RA)
- [5] D. Pahud, A. Fromentin, EPFL-Lausanne, M. Hubbuch, *Zürich: Heat Exchanger Pile System of the Dock Midfield at the Flughafen Zürich Airport. Detailed Simulation und Optimisation of the Installation* (RF)
- [6] J. Mechter, HTA, *Burgdorf: SERSO, Sonnenenergie rückgewinnung aus Strassenoberflächen, Messkampagne und Simulation des saisonalen Erdspeichers* (RA) <http://www.hta-bu.bfh.ch>
- [7] P. Gantenbein, U. Frei, SPF- HS Rapperswil: **Zeolithspeicher in der Solartechnik: Machbarkeit und Potential** (RA)

(RA) Rapport annuel disponible

(RF) Rapport final disponible

## Liste des projets P+D

- [8] C. Kapp, NEK UMWELTTECHNIK, *Zurich: Erdwärmesondenfeld (Heizen- Kühlen- Speichern) für den Produktions-Neubau Meister + Co., Wollerau SZ* (RF)
- [9] 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*
- [10] H. Schär, *St Gallen: Erdspeicheranlage für das Weiterbildungszentrum Hochschule St. Gallen* (RA)
- [11] F. Fleury, *Épalinges: Villa solaire avec stockage saisonnier en molasse*
- [12] P. Léchaire, *Les Brenêts: Maison solaire avec stockage saisonnier central chauffé par capteurs à air* (RA)
- [13] M. Morath, C. Kapp, NEK UMWELTTECHNIK, *Buchrain: EWS-Anlage Tschannland, Buchrain* (RF)
- [14] D. Pahud, EPFL-LASEN, *Lausanne: Simulation thermique du stockage de chaleur diffusif des bâtiments de la SUVA à Lucerne* (RA)
- [15] S. Wiederkehr, JOBST WILLERS ENGINEERING, *Rheinfelden: Verwaltungsgebäude Buchenhof, Aarau. Messkampagne des saisonalen Erdspeichers* (RA)
- [16] D. Pahud, EPFL-Lausanne: *Optimisation d'un stockage de chaleur en dalle active* (RA)

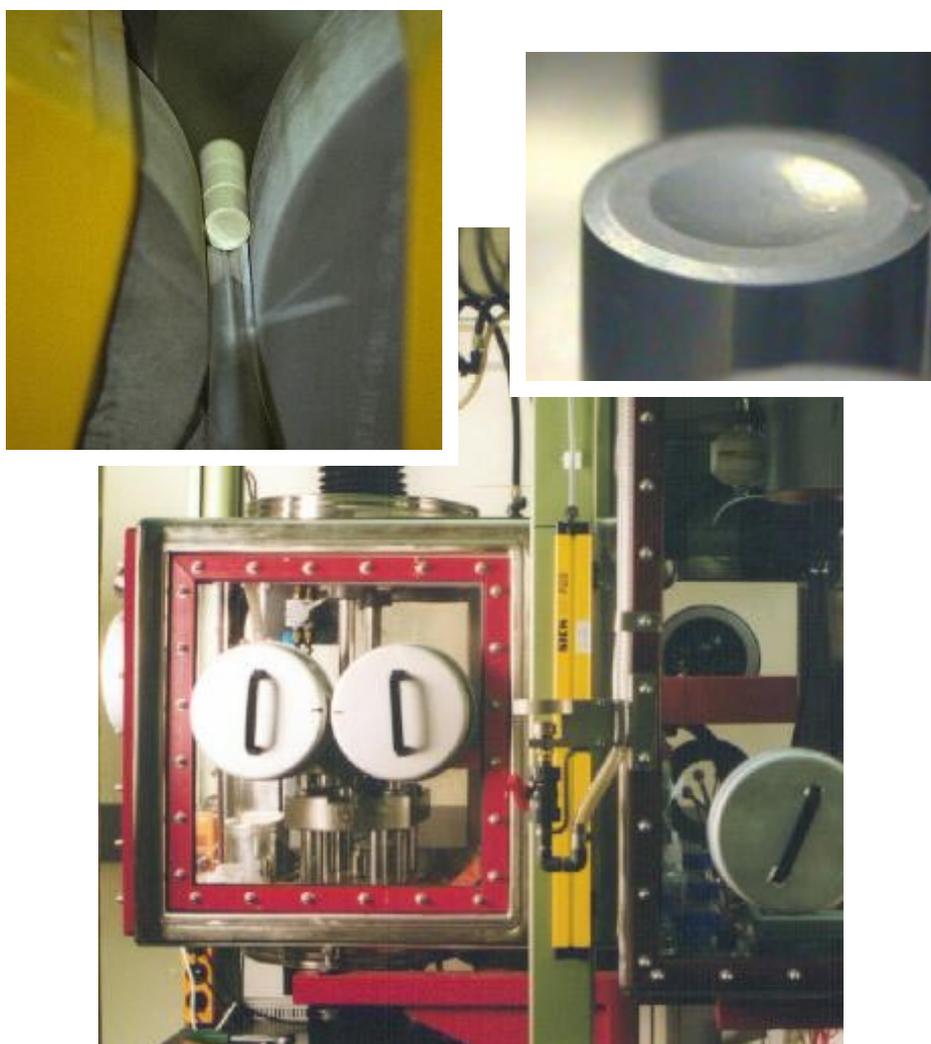
## NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Wolfgang Kröger**

[kroeger@psi.ch](mailto:kroeger@psi.ch)

---



Erstmals wurden am PSI IMF-Tabletten mit Plutonium nach zwei Verfahren (Mischfällung, Mischmahlung) hergestellt; die Qualität ist hinsichtlich Spaltstoff-Homogenität, Porenverteilung und Kornstruktur mit Mischoxid-Brennstoffen vergleichbar. Die Tabletten wurden mittlerweile für Bestrahlungsversuche zum Halben-Testreaktor der OECD/NEA transportiert.

## Programmziele

Forschung auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit und Entsorgung in der Schweiz leistet Beiträge zum sicheren Betrieb bestehender Kernkraftwerke (KKW) und zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Im Zentrum des Interesses stehen dabei das Verhalten eingesetzter Materialien und Komponenten mit zunehmender Einsatzdauer sowie Rückhalte- und 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 die-

sem genannten Rahmen werden auch wissenschaftliche Expertisen bearbeitet und Dienstleistungen erbracht.

Der geographische Schwerpunkt dieser Forschung liegt im Bereich "Nukleare Energie und Sicherheit" des Paul Scherrer Instituts (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-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.

## Arbeiten und Ergebnisse 1999

### SICHERHEIT & SICHERHEITSBEZOGENE BETRIEBSPROBLEME VON SCHWEIZER KKW

#### STARS

Das Projekt STARS [1], das in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt wird und sich in seiner Phase III befindet, zielt auf die Analyse postulierter Unfallsequenzen in den schweizerischen KKW mit Rechencodes nach dem Stand der Technik und detaillierten reaktorphysikalischen und thermohydraulischen Systemmodellen.

Nach der Genehmigung der Leistungserhöhung im KKW Leibstadt (KKL) auf 115% wurden im September 1999, am Anfang des laufenden Reaktorzyklus, mehrere Tests bei einer Reaktorleistung von 109% durchgeführt. Sie umfassten eine Turbinenschnellabschaltung und einen begrenzten Speisewasserverlust; deren Ziel war die Untersuchung der Margen zur Reaktorschnellabschaltung (Scram) für diese und verwandte Anlage-transienten. Das Projekt STARS wurde von der HSK beauftragt, Vorrechnungen für zwei mögliche Testvarianten durchzuführen. Unter den Zielen dieses Auftrags war die Bestätigung der Wahl der Turbinenschnellabschaltung als restriktivere Testvariante wie auch die Qualifizierung der STARS-Rechenmethodik für diesen Transiententyp. Das KKL besitzt eine 100%-Kapazität für Turbinen-Bypass. Somit kann im Falle eines Schliessens der Turbineneinlassventile der nominelle Dampfstrom durch rasche Öffnung der Bypass-Ventile ohne grosse Druckänderungen im Reaktor direkt

in den Kondensator umgeleitet werden. Deshalb kann der Reaktor zusammen mit einer Senkung der Kernleistung – durch Kombination eines Einfahrens vorge-wählter Steuerstäbe und einer Reduktion des Kern-durchsatzes – einen Lastabwurf oder eine Turbinen-schnellabschaltung "überstehen", ohne dass durch das Reaktorschutzsystem ein Scram ausgelöst werden muss. Die dafür überwachten Parameter sind u.a. hoher Neutronenfluss, Dampfmassenstrom und Reaktordruck.

Bei den untersuchten zwei Störfällen besteht der kleinste Abstand zur Auslösung eines Scram infolge von hohem Reaktordruck und hohem Dampfmassenstrom in der Hauptdampfleitung. Das Schliessen der Turbinen-Einlassventile erzeugt eine Reaktordruckerhöhung. Dem wird durch das Öffnen der Bypass-Ventile entgegengewirkt. Damit verbunden ist ein rasches Ansteigen des Dampfmassenstroms. Die Logik der Ventilansteuerung ist derart ausgelegt, dass sie anfänglich zwecks Druck-senkung eine rasche Öffnung der Bypass-Ventile initi-iert, danach aber die Öffnung so begrenzt, dass ein zu rasches "Hinausschiessen" des Dampfes in den Kondensator vermieden werden kann. STARS benutzte den Re-chencode RETRAN-3D zusammen mit einem detail-lierten Modell des Regel- und Schutzsystems, um diese Transienten zu simulieren. Code und Modell wurden geprüft, indem ein früherer Turbinenschnellschlusstest

bei einer Reaktorleistung von 65% analysiert wurde. Auf der Basis des dadurch gewonnenen Vertrauens wurden die Rechnungen bei einer Leistung von 109%

durchgeführt. Sie zeigten, dass die Turbinenschnellabschaltung gegenüber dem Generatorlastabwurf die gravierendste der zwei Transienten wäre.

## HUMAN RELIABILITY ANALYSIS (HRA)

Im dritten Jahr dieses von der HSK unterstützten Projekts [2] wurde die Forschungsarbeit auf drei Linien fortgesetzt: Verbesserungen aktueller HRAs in den probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSAs) für die schweizerischen KKWs, Behandlung der sog. *errors of commission (EOCs)* und dynamische Simulation des Systems "Operateur-Anlage".

In Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Ablagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS) wurden fünf Methoden zur bislang problematischen Erfassung von unerwünschten Handlungen untersucht. Eine vergleichende Bewertung, basierend teilweise auf einer Anwendung der Methoden zur Analyse des Davis-Besse-Ereignisses (1985), zeigte, dass das Konzept der "fehleraufzwingenden Bedingungen" vielen gemeinsam ist. Dennoch gibt es wesentliche Unterschiede in den einzelnen Ansätzen für die Identifizierung dieser Bedingungen und potentieller EOCs. Die vielversprechendsten Elemente

dieser Methoden werden nun synthetisiert im Hinblick auf die Pilotanwendung auf eine CH-Anlage. In dazugehöriger Arbeit wird die CODA-Methodik zur retrospektiven Analyse menschlicher Fehler als voraussagende HRA-Methodik weiterentwickelt.

Auf dem Gebiet der dynamischen Simulation des Systems Operateur-Anlage, konzentrierte sich die Arbeit auf den Entwurf eines dynamischen Sicherheitsbewertungsrahmens, mit Hauptgewicht auf der Rolle der Werkzeuge zur Simulation von "Operateur-Anlage" in diesem Zusammenhang, und auf die erforderlichen Anpassungen existierender methodischer Elemente und Software-Komponenten. Für das Projekt bildet nun die Implementierung der Komponenten und eine umfassende Anwendung der dynamischen Sicherheitsbewertung das nächste Ziel, das zusammen mit europäischen Partnern aus Forschung und Industrie realisiert wird.

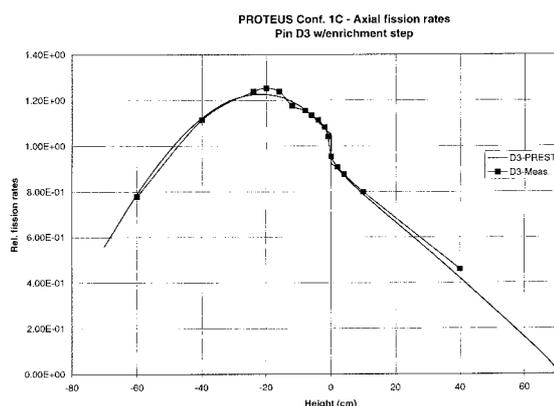
## LWR-PROTEUS

Ziel dieses vom UAK und den Kernkraftwerken unterstützten Projekts [3] ist die Erzeugung 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.

In der gegenwärtig laufenden Phase des Projekts werden im Nullleistungsreaktor PROTEUS detaillierte Untersuchungen zum reaktorphysikalischen Verhalten von modernen, kommerziellen SWR-Brennelementen durchgeführt, die später in einem schweizerischen KKW eingesetzt werden sollen.

Die bisher erzielten Resultate haben national wie auch international beträchtliches Interesse geweckt. Der ersten Kritikalität Ende 1998 folgten Anfang 1999 Inbetriebnahmetests der Anlage und die Entwicklung neuer sowie Anpassung bestehender Messtechniken. Dies erlaubte die Untersuchung und Quantifizierung systematischer Unsicherheiten und die Bestätigung der Zielgenauigkeiten. Sechs unterschiedliche Anordnungen der Testzone wurden im laufenden Jahr gemessen, alle mit voller Wasserdichte, was als Referenz dient. Diese Anordnungen entsprechen etwa der Hälfte der geplanten 13 Konfigurationen der Phase I des Experimentierprogramms. Die durchgeführten Untersuchungen sind repräsentativ für zwei mittlere Anreicherungen im Brennelement, bei unterschiedlicher Beladung mit abbrennbaren Giften, wobei über axial homogene Regionen und auch über die Anreicherungsgrenze gemessen wurde. Es wurden dabei sowohl Bedingungen ohne Kontrollabsorber als auch die Auswirkungen eines Absorberkreuzes untersucht.

Die Zielgenauigkeiten ( $1\sigma$ ), die mit den Messungen erreicht wurden, entsprechen statistischen Fehlern von  $<0.5\%$  für relative Leistungsverteilungen ( $\gamma$ -scanning) und etwa 1% für einzelne Reaktionsraten. Relative Reaktivitätseffekte, wie z.B. durch das Entfernen einzelner Brennstoffstäbe mit und ohne abbrennbare Gifte, wurden ebenfalls mit einer Genauigkeit von etwa 1% gemessen. Vergleiche von Vor- und Nachrechnungen mit den experimentellen Resultaten wurden in enger Zusammenarbeit mit den Hauptpartnern der Phase I, d.h. mit EGL und ABB durchgeführt. Die in diesen Vergleichen benutzten Brennelement-Codes sind HELIOS, CASMO, BOXER und PHOENIX.



Die Figur zeigt als Beispiel die berechneten und gemessenen ( $\gamma$ -scanning) Resultate für die axiale Leistungsverteilung über die Anreicherungsgrenze (Höhe = 0) der Testbündel im Kern 1C des LWR-PROTEUS.

## LWR-KONTAMINATION

Ziel des mit Unterstützung der HSK durchgeführten Projekts [4] sind Studien zur Rolle der Wasserchemie in Reaktorsystemen für die Aktivitätsaufnahme (und damit für die Strahlenexposition) und für das Alterungsverhalten von Komponenten.

Die PSI-Methoden zur Untersuchung der Korrosions- und Kontaminationsvorgänge wurden mit einem neuen Instrument für photoelektrochemische Analysen erweitert. Damit kann man die Halbleiter-Eigenschaften oxidischer Filme bestimmen und das Korrosions- und Kontaminationsverhalten von Stählen charakterisieren. Die Autoklaven mit der elektrochemischen Ausrüstung für Hochtemperatur-Messungen wurden im Hinblick auf deren langfristige Verfügbarkeit und Dekontamination modifiziert. Darüber hinaus wurde die keramische Schnittstelle der Hochtemperatur-Referenzelektrode wesentlich verbessert. In Zusammenarbeit mit dem Forschungsbereich Allgemeine Energie (ENE) wurden SWR-Oxide mittels XPS-Messungen untersucht, um die Zusammensetzung der Oxide quantitativ zu analysieren und den Oxidationszustand der Elemente in den Oxiden

zu ermitteln.

Rechnungen gemäss der *Mixed Potential Theory* haben die Resultate der Messungen vom elektrochemischen Potenzial in einem Couette-Autoclaven unter Heisswasser-Bedingungen und wohldefinierten hydrodynamischen Bedingungen bestätigt. Diese Arbeit bildet den theoretischen Rahmen für die Untersuchungen zur  $H_2$ -Wasserchemie und die Technik der *Noble Metal Chemical Addition*.

Die Modellierung zum Aktivitätsaufbau unter SWR-Bedingungen wurde abgeschlossen. Im vergangenen Jahr wurden mehrere Modelle auf der Basis von Migrations- und Diffusionsvorgängen analysiert. Der Vergleich von Daten aus dem KKL mit den berechneten Daten aus dem Diffusionsmodell stimmen gut überein. Vorbereitende Experimente zur Co-Diffusion in SWR-Oxiden in den PSI-Labors zeigen ein Konzentrationsprofil, wie dieses vom Diffusionsmodell vorausgesagt wird.

## EDEN

Die Arbeit im Projekt EDEN (Entwicklung, Anwendung und Evaluation von Nachbestrahlungsuntersuchungen) [5] fokussierte auf der Untersuchung der Korrosion der Zircaloy-Hüllen von Brennstäben bei Hochabbrand und langem Einsatz im Reaktor. Die Forschung fand im Rahmen mehrerer Vorhaben statt, die z.T. von der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft und der Herstellerindustrie unterstützt wurden. Sekundärphasenteilchen (SPP) spielen eine wichtige Rolle im Korrosionswiderstand der Legierungen. Da sie durch Neutronenstrahlung beeinflusst werden, ist es wichtig, deren Entwicklung als Funktion der Fluenz im Reaktor zu kennen. Mittels Transmissionselektronenmikroskopie wurden SPP in verschiedenen Legierungen bis zu hohen Abbränden analysiert. Die Untersuchungen zeigten, dass feinste Teilchen, obwohl vorteilhaft hinsichtlich der **modularer** Korrosion, unter Neutronenbestrahlung rasch aufgelöst werden und eine verstärkte gleichmässige Korrosion auslösen. Die Anwendung einer EDX-Abbildungstechnik erlaubte zwischen verschiedenen Teilchentypen zu unterscheiden und deren individuelle Auflösungskinetik zu bestimmen. Wasserstoff entsteht während des Korrosionsvorgangs und wird z.T. vom Metall aufgenommen, was zur Versprödung führt. Die  $H_2$ -Verteilung zwischen der Zirkoniumlegierung und ihrer Korrosionsschicht wurde mit einer neuentwickelten Methode der fraktionierten Wasserstoffanalyse untersucht. Der Gehalt in der Oxidschicht erreichte 10-25% der gesamten  $H_2$ -Menge je nach Zusammensetzung der Legierung. Die  $H_2$ -Konzentration im Oxid war annähernd unabhängig von der Schichtdicke. Während die genannte Methode Informationen über die ganze Probe liefert, wurde auch eine Methode entwickelt, um den lokalen Hydridgehalt zu bestimmen. Diese basiert auf

der Bestimmung des Flächenanteils der Hydride mittels Rückstreuелеktronen im Rasterelektronenmikroskop.

Die Anzahl defekter Brennstäbe in den Reaktoren wurde in den vergangenen Jahren wesentlich reduziert, und die meisten der Primärdefekte können jetzt auf Abnutzungsschäden zurückgeführt werden. An einem defekten Siedewassersreaktorstab wurden wichtige Erkenntnisse über die Art und Ursache der Rissentstehung gewonnen. Der Primärdefekt, genannt "X-Marke" nach seinem Aussehen, konnte durch visuelle Inspektion und Wirbelstrom-Methoden lokalisiert werden. Neutronenradiographie zeigte jedoch keine Besonderheit im Vergleich zu einem gesunden Stababschnitt. Eine metallographische Präparation des Stabquerschnitts durch schrittweises Schleifen offenbarte, dass der Riss vom Inneren der Hülle ausgeht und sich ohne grosse Verzweigungen durch die Hüllrohrwand ausbreitet. Das Pellet am Rissursprung zeigte eine fehlende Oberfläche, wodurch Biegespannungen im Hüllrohr während einer Leistungstransiente verursacht wurde.

Zusammen mit vier Europäischen Forschungsinstituten und einem Industriepartner wurde ein Vorschlag für das 5. EU-Rahmenprogramm eingereicht; die strahlungsinduzierte Rissbildung in der Wärmeeinflusszone von Schweissungen soll detailliert untersucht werden. Die Doktorarbeit zur Untersuchung der Mikrostruktur und der Verformungscharakteristik von neutronen- und protonenbestrahlten rostfreien Stählen wurde abgeschlossen. Es konnte eine gute Korrelation zwischen der Spannungsrisskorrosionsanfälligkeit bestrahlter Stähle und deren Deformationsmechanismen gefunden werden. Während die anfälligere Legierung 304 bei Verformung eine Versetzungsbandstruktur ausbildete, zeigte der Typ

## BAUTEILSICHERHEIT

Das Projekt Bauteilsicherheit [6], teilweise von der HSK unterstützt, untersucht die Strukturintegrität sicherheitsrelevanter KKW-Komponenten unter besonderer Berücksichtigung von Alterungsvorgängen. Der Einfluss mechanischer Lasten und der Umgebung (Wasserchemie, Strahlung) auf mikrostrukturelle Werkstoffveränderungen, deren Früherkennung und Schadensvorhersage mit fortschrittlichen Modellen stehen im Mittelpunkt der Forschung.

Eine neue Herausforderung für fortschrittliche Prüfsysteme der zerstörungsfreien Prüfung ist die Entwicklung von Frühwarnsystemen, die in der Lage sind, Veränderungen in den Mikrostrukturen von Stählen frühzeitig zu erkennen und zu überwachen. Besondere Bedeutung erlangt die Schadenfrüherkennung in der Kernkraftwerkstechnik, da sie zur Erhöhung der Sicherheit und zu Verbesserungen im Lebensdauer-Management einzelner Komponenten beitragen kann.

Das Projekt FEVER befasst sich mit der Charakterisierung und Überwachung mikrostruktureller Veränderungen im Vorriss-Stadium bei niederzyklischer Ermüdung ("LCF") in austenitischen Rohrleitungsstählen. Wiederholt aufgetretene thermo-mechanische Belastungen, die durch Temperaturschichtungen in Rohrleitungen bei An- und Abfahrvorgängen sowie anderen transienten Laständerungen im Kraftwerksbetrieb vorkommen, wurden simuliert. Das Fortschreiten der LCF-Schädigung im metastabilen Rohrleitungsstahl verursacht eine deformations-induzierte Phasentransformation vom Austenit zum Martensit. Verschiedene Niveaus von LCF-Schädigung (Erschöpfungsgrad) wurden in speziellen Ermüdungsproben (ASTM E606) bei dehnungsgesteuerter Versuchsdurchführung eingebracht. Neutronenbeugungs-Messungen an verschiedenen axialen Positio-

nen mit einer Strahlhöhe von 2 mm (Pulverdiffraktometer an der SINQ des PSI) ergaben Korrelationen zwischen dem lokalen Martensitgehalt und der adäquaten Lastamplitude. Erstmals war es möglich, den Gehalt der martensitischen Strukturen in der LCF-Schädigungszone mit einer zerstörungsfreien Methode zu quantifizieren und deren Einflussgrößen zu identifizieren. Es wurde gezeigt, dass es Schwellenwerte für die Lastamplitude und die Zyklenzahl gibt, unterhalb derer keine Martensitbildung auftritt. Nach Überschreiten der Grenzwerte steigt der Martensitgehalt annähernd linear mit steigender Lastamplitude und Zyklenanzahl an.

Messungen der magnetischen Streufeldstärke mit hochempfindlichen Magnetfeld-Sensoren (Fluxgate, SQUID) sowie Messungen mit miniaturisierten Wirbelstromsonden wurden durchgeführt, um die Resultate der Werkstoffcharakterisierung auf eine zerstörungsfreie on-line Überwachungsmethode zu übertragen. Die in den Neutronenbeugungs-Messungen ermittelten Martensitgehalte wurden dabei zur Kalibrierung der Magnettechniken verwendet. Die ferromagnetische Martensitphase kann nach angelegter externer Gleichfeldmagnetisierung als remanentes magnetisches Streufeld ausserhalb der Proben gemessen werden. Eine alternative Nachweismethode ergibt sich bei Anwendung des Wirbelstromverfahrens. Dabei ist die Messgrösse durch die magnetische Permeabilität gegeben, die lokal durch die Ausbildung der martensitischen Phase beeinflusst wird. Der Einsatz miniaturisierter Wirbelstromsonden ermöglichte die Darstellung der Martensitverteilung an der Probenoberfläche und in einem Längsschnitt, was wertvolle Hinweise zum Schädigungsmechanismus ergab. Sowohl Streufeld- als auch Wirbelstrom-Messungen konnten den relativ geringen Martensitanteil (0.5 - 3.1 Vol.% bei Erschöpfungsgraden von 0 bis 1.0) sehr gut auflösen.

## FORSCHUNG ZU SCHWEREN UNFÄLLEN

Diese Forschung mit finanzieller Unterstützung des UAK [7] zielt auf ein besseres Verständnis von Phänomenen die im Zuge schwerer Reaktorunfälle auftreten könnten. Dadurch lassen sich radioaktive Freisetzungen in die Umgebung (Quellterme) genauer abschätzen und vorgeschlagene *Accident Management*-Massnahmen verlässlicher bewerten.

Das Projekt CONGA (Teil des 4. EU-Rahmenprogramms) untersuchte den Einfluss von Aerosolteilchen auf passive Systeme zur Nachwärmeabfuhr aus dem *Containment*, wie sie für den SWR1000 von Siemens und möglicherweise für die Nachrüstung heutiger DWR ausgelegt wurden. Die Versuche zu den Wärmeabfuhrmerkmalen dieser zwei verschiedenen Wärmetauscher-Auslegungen während eines postulierten Unfallablaufs ergaben für eine DWR-Anwendung, dass die Abnahme des Wärmeübergangs in Folge von Aerosolablagerun-

gen auf den Wärmetauschereinheiten vernachlässigbar ist; für SWR-Anwendungen wurde dagegen eine Verschlechterung von bis zu 37% beobachtet. Dieses ist auf die für die SWR-Anwendungen spezifizierte höhere Kondensationsrate (verstärkte diffusiophoretische Effekte) und geometrische Unterschiede zurückzuführen.

Im Rahmen des internationale Projekts PHEBUS-FP wird gezielt Kernschmelzen herbeigeführt, um Spaltproduktfreisetzung und -transport im Primärkreislauf, Wechselwirkungen der Spaltprodukte mit den Steuerstabmaterialien und das chemische Verhalten von Aerosolen und Jod im *Containment* zu untersuchen. Das PSI hat weitere Beiträge zum Projekt geleistet, mit *in-situ*-Experimenten zur radiolytischen Stabilität von Silberjodidlösungen unter  $\beta$ -Bestrahlung und mit Berechnungen zur Voraussage des Phebus-Tests FPT1. Die Experimente haben bewiesen, dass sich Silberjodid (AgI)

zersetzen kann, wobei der Grad der Jodfreisetzung aus der wässrigen AgI-Lösung von der jeweils dominierenden Strahlungsart und der thermischen Jod-Chemie abhängt.

Bei Risikobetrachtungen für Druckwasserreaktoren spielen Kernschmelzunfälle mit gleichzeitig bedingten oder unabhängigen Brüchen von Dampferzeuger-Heizrohren eine wichtige Rolle. Zwar ist die Häufigkeit solcher Unfälle ausserordentlich gering, aber die Freisetzung von Spalt- und Aktivierungsprodukten in die Umgebung des KKWs könnte hohe Werte annehmen, weil der Reaktordruckbehälter mit dem zerstörten Kern und der übrige Primärkreislauf über die gebrochenen Heizrohre direkt mit der sekundärseitigen Abblasestation verbunden sind. Die Abblasestation spricht wegen des mit dem Heizrohrbruch einhergehenden Anstiegs des Dampfdrucks im Sekundärkreislauf sofort an. Spaltedelgase, gasförmiges Jod und Aerosolpartikel, von denen ein Teil radioaktiv ist, könnten daher, ohne im Si-

cherheitsbehälter zurückgehalten zu werden, mit dem Dampf in die Umgebung gelangen (*Bypass* des Sicherheitsbehälters).

International besteht erhebliches Interesse daran, die Rückhaltewirkung von Dampferzeugern für Jod und Aerosolpartikeln bei verschiedenen postulierten Kernschmelzunfällen mit Dampferzeuger-Heizrohrbruch zu beschreiben. Für die NOK ist von besonderem Interesse, dass entsprechende Experimente mit einem Simulator eines Dampferzeugers durchgeführt werden, der denen der Kernkraftwerke Beznau (KKB) entspricht. Dabei werden die geometrischen Abmessungen und die Strömungsverhältnisse im Massstab 1:1 modelliert. Auf diese Weise können quantitative Ergebnisse auch ohne Rechnungen direkt auf das Rückhaltevermögen der Dampferzeuger des KKB übertragen werden. Eine Reihe von 4 Experimenten wird zudem in das Projekt SGTR des 5. EU-Rahmenprogramms zur Nuklearen Sicherheit integriert. Es wird im Jahr 2000 beginnen.

## ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE [8]

Ziel der Arbeiten ist es, im Hinblick auf die Sicherheitsanalyse von Endlagern Modelle zu entwickeln und zu testen sowie spezifische Daten zu gewinnen. Die Arbeiten finden im Auftrag des Bundes und in enger Zusammenarbeit sowie finanzieller Unterstützung der Nagra statt. Die Kompetenzfelder des PSI sind Chemismus des Endlagersystems und Transport von Radionukliden in der Geosphäre.

Im Berichtsjahr lag ein Schwergewicht auf Arbeiten zum anstehenden Entsorgungsnachweis für hochaktive Abfälle/Brennelemente bei einer Endlagerung in Opalinuston. Zwei Gesichtspunkte sind dabei für uns von zentraler Bedeutung: erstens Transportprozesse, und zweitens Sorptionsmechanismen in dichten Tongesteinen. Es wurden erste, detaillierte Planungsschritte durchgeführt, um sowohl im Labor als auch im Feld (Felslabor Mont Terri) die Diffusion von Spurenelementen zu untersuchen. In den vergangenen Jahren wurde ein mechanistisches Sorptionsmodell entwickelt. Dieses wurde nun im Rahmen einer Modellvalidierung auf die Sorption von Caesium auf vier verschiedenen tonigen Gesteinen (Opalinuston, Mergel, Oxfordton, Boomton) angewendet. Die Übereinstimmung mit den experimentellen Daten ist exzellent. Auch XAFS-Oberflächenstudien tragen zur Validierung des Sorptionsmodells bei. Solche Resultate dienen dann als wissenschaftliche Grundlage für die erarbeitete Sorptions-

datenbasis zur Sicherheitsanalyse.

Modellvalidierung ist auch ein Generalthema der Arbeiten zum Transport in gespaltenen porösen Medien. Hier wurde die Modellierung von Feldexperimenten in Äspö, Schweden, mit gutem Erfolg fortgesetzt, sodass diese Arbeiten im Jahr 2000 abgeschlossen werden können.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Untersuchungen zum Verhalten von Radionukliden in Zementsystemen. Im Vordergrund standen Experimente zur Sorption von Se, Zn, Eu und Th auf Zement und Zementphasen. Auch hier tragen XAFS-Messungen zur Aufklärung der Sorptionsmechanismen bei. Die Modellierung von Diffusionsexperimenten mit den Tracern Chlorid, Iodid, Caesium und Nickel wurde abgeschlossen. Es hat sich dabei kein konsistentes Bild ergeben und neue Experimente drängen sich auf.

Schliesslich seien noch die Arbeiten zur Thermodynamik von sicherheitsrelevanten Elementen erwähnt, welche die Grundlage zur Spezifikation und Löslichkeit von Radionukliden im Endlagersystem und in Grundwässern bilden. Neu evaluiert wurden die Daten für Carbonate und Sulfide. Es ist vorgesehen, die thermodynamische Nagra/PSI-Datenbank aus dem Jahre 1992 sukzessive zu erneuern.

## SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

### FORTGESCHRITTENE BRENNSTOFFZYKLEN [9]

Die Arbeit fokussierte 1999 auf die Beurteilung verbesserter Konzepte für die Plutoniumnutzung. Die dabei erwartete Reduktion von Abfallvolumina kann als Beitrag der Kernkraftnutzung zur nachhaltigen Entwicklung gesehen werden.

Erstmals wurden am PSI Brennstoffpellets in industrieller Qualität im Rahmen der Zusammenarbeit mit Japan (KAERI) hergestellt. Durch Zugabe eines Porenbildners wurde die Zieldichte von 95% der theoretischen Dichte von MOX-Pellets mit geringer Streuung erreicht. Das Material mit homogener Pu-Verteilung wird im

Halden-Testreaktor bestrahlt, zusammen mit MOX industrieller Herkunft (BNFL) und "Inert Matrix Fuel" (IMF) aus dem PSI (siehe Titelbild), in einem voll instrumentierten Testelement. Mit der erfolgreichen Herstellung von hochqualitativem IMF auf der Basis stabiler Zirconoxide, mit Erbium als abbrennbares Gift, wurde der erste Schritt zum Machbarkeitsnachweis eines solchen Materials für Plutoniumnutzung vollbracht. Nach zwei Herstellungsschemata wurde Material mit einer Pu-Dichte von  $0.9 \text{ g/cm}^3$ , verschiedenen Strukturen (grosse und kleine Körner) und relativen Dichten von 95% bzw. 88% der theoretischen Materialdichte vorbereitet. Als Nebenprodukt erhielt man Material für ein reaktorphysikalisches Experiment zur Codevalidierung und Überprüfung von Kerndaten. Arbeit wurde auch dem "Cercer"-Konzept gewidmet (keramische Brennstoffpartikel in einer keramischer Matrix): Es wurden Kompatibilitätstests von Spinell mit Pu-haltigen

IMF-Mikrokugeln durchgeführt und IMF-Mikrokugeln für das OTTO-Projekt am NRG (NL) geliefert. Die Materialherstellung wurde von umfassenden Charakterisierungsarbeiten begleitet. Neben den Standardtechniken (Keramographie, Dichtemessung, geometrische Dimensionen der Pellets), wurden bezüglich der Kristallstruktur die EXAFS-Strahllinie am Stanford Synchrotron Radiation Laboratory für inaktive Proben und Röntgendiffraktometrie für Pu-haltige IMF eingesetzt.

Hinsichtlich reaktorphysikalischer Fragen wurde die Entwicklung der Nuklidvektoren von Pu und höherer Actiniden in einem IMF-Brennelement, umgeben von üblichen  $\text{UO}_2$ -Brennelementen, berechnet und mit den Resultaten der Partner der IMF-Initiative verglichen. Dabei wurden z.T. bedeutende Unterschiede festgestellt; eine detaillierte Analyse der Resultate ist derzeit im Gang.

### PASSIVE WÄRMEABFUHR (ALPHA)

Auch in der zweiten Phase des ALPHA-Projekts [10] wird die langfristige Nachwärmeabfuhr mittels passiver Systeme aus dem Sicherheitsbehälter von fortgeschrittenen LWRs experimentell und analytisch untersucht. 1999 wurden die Projekte IPSS und TEPSS innerhalb des 4. EU-Rahmenprogramms erfolgreich abgeschlossen. Andere Aktivitäten bezogen sich auf das internationale Standardproblem (PANDA ISP-42), das vom PSI unter der Aufsicht des OECD/NEA-CSNI mit finanzieller Unterstützung des PSEL durchgeführt wird, sowie vom UAK geförderte *in-kind*-Beiträge für den *European Simplified Boiling Water Reactor*. Nach dem Abschluss zahlreicher experimenteller Untersuchungen bildeten im Berichtsjahr verschiedene entsprechende analytische Untersuchungen mit Systemcodes und dreidimensionalen *Containment*- sowie *CFD-Codes*, insbesondere im Hinblick auf dreidimensionale Effekte von Vermischungs- und Stratifizierungsphänomenen von Gasen in grossen Volumen, einen wichtigen Schwerpunkt. Nachfolgend wird eine dieser Analysen näher beschrieben.

Bei einigen Tests in der PANDA-Anlage zur Simulation der langfristigen passiven Kühlung des Sicherheitsbehälters wurde unter gewissen Bedingungen ein asymmetrisches Verhalten der drei passiven Kühler (PCC) beobachtet. Um dieses zu erklären, wurden die dreidimensionalen Strömungsmuster in der PANDA *Drywell* (DW)-Anordnung mittels verschiedener CFD-Rechnungen mit dem Code CFX-4 berechnet. Das PANDA-DW besteht aus zwei grossen Gefässen, die über ein grosses Rohr verbunden sind. Die drei PCC sind asymmetrisch platziert, indem zwei PCC-Speiseleitungen oben am DW2 angebracht sind, jedoch nur eine oben am DW1. Wird während eines Tests Dampf symmetrisch in die zwei DWs eingespeist, sollten alle drei

PCCs mit gleich grossen Strömungsraten beaufschlagt werden, da im grossvolumigen DW praktisch kein Strömungswiderstand auftritt und die drei PCC mit ihren Speiseleitungen geometrisch identisch sind. Diese Erwartung wird durch Berechnungen des stationären Zustands bei zwei verschiedenen, für die PANDA-Transienten typischen Dampfeinspeiseraten bestätigt. Weitere Rechnungen haben bewiesen, dass auch mögliche Ungleichheiten in der Druckverlustcharakteristik der drei PCC-Speiseleitungen nur einen kleinen Einfluss auf die Zuflussrate hat: eine Änderung des Drucks in einem PCC um 14% erzeugt lediglich eine Änderung von 3% in der Strömungsrate. Damit kann der beobachtete asymmetrische Leistungsabfall von PCC2 weder durch die asymmetrische Strömungstopologie noch durch Unsicherheiten im Ausgangsdruck erklärt werden.

Der beobachtete Leistungsabfall von PCC2 kann auch durch eine asymmetrische Akkumulation von Luft in den drei PCC, und damit verschieden grossen aktiven Kondensationsflächen, verursacht werden. Unter der realistischen Annahme, dass während der PANDA-Tests Spuren von Luft im RDB frei werden und symmetrisch in die beiden DWs gelangen, wurden entsprechende Transientenrechnungen mit dem Code CFX-4 durchgeführt. Diese Berechnungen sind sehr aufwändig und zur Zeit erst für die Hälfte der relevanten Transiente durchgeführt (kontinuierlicher Betrieb einer schnellen Workstation für mehr als ein Jahr). Die bisher erzielten Resultate weisen darauf hin, dass sich im PCC2 vergleichsweise viel Luft ansammelt, womit das experimentell beobachtete asymmetrische Verhalten der PCC erklärt werden könnte.

### GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN (GaBE)

Das multidisziplinäre Projekt GaBE [11] liefert wissenschaftlichen *Input* zu energiepolitischen Entscheiden in

der Schweiz, unterstützt internationale Aktivitäten zur vergleichenden Bewertung von Energiesystemen und

entwickelt Methoden- und Datenbanken weiter.

Die im Rahmen des Projekts "Dezentral" durchgeführte Analyse der schweizerischen Energieversorgungsszenarien bis zum Jahr 2030 wurde durch die Betrachtung zusätzlicher Optionen mit starker Förderung erneuerbarer Energiequellen und Sparmassnahmen erweitert. Wie bis anhin wurden prospektiven technologischen Fortschritten für Systeme wie gasgefeuerte Kombikraftwerke, dezentrale Wärmekraftkopplung oder Wärmepumpen voll Rechnung getragen. Die Bewertung betrifft die gesamte ökologische und ökonomische Leistungsfähigkeit der Alternativen. Insbesondere wurde die in Kyoto eingegangene Verpflichtung, die Treibhausgas-Emissionen bis 2010 um 8% unterhalb des Niveaus von 1990 zu reduzieren, als Referenz genutzt. Der Erhalt der heutigen, auf Wasser- und Kernkraftnutzung basierenden Stromversorgung, oder der Ersatz der KKW's durch fossilgefeuerte und die gleichzeitige starke Förderung von Sparmassnahmen, Wärmepumpen und neuen erneuerbaren Systemen (Biomasse, Sonne, Wind, Geothermie) würde erlauben, die Treibhausgas-Emissionen aus dem Strom- und Wärmesektor auf dem Niveau von 1990 zu

stabilisieren. Die letztgenannte Alternative ist jedoch viel teurer. Wesentliche Emissionsreduktionen weit unterhalb des Kyoto-Niveaus wären machbar, würde man nukleare Stromversorgung mit starker Förderung von Sparmassnahmen, Wärmepumpen und neuen erneuerbaren Systemen kombinieren. Die dazugehörigen Jahreskosten würden in diesem Fall weit höher als heute liegen, d.h. in der gleichen Grössenordnung wie für die genannte fossilbasierte Option.

Um die Ergebnisse des GaBE-Projekts verstärkt der interessierten Öffentlichkeit bekannt zu machen, wurde eine neue Publikation, der "Energie-Spiegel" geschaffen. Dessen Ziel ist, in ausgewogener Weise und allgemein verständlicher Form Fakten für die Energiepolitik von heute und morgen darzulegen und Unterstützung bei der Entscheidungsfindung von Politikern, Industriellen, Fachleuten und jenen, die sich allgemein für Energiefragen interessieren, zu bieten. Der "Energie-Spiegel" erscheint dreimal jährlich. Die erste Ausgabe befasste sich mit dem Potenzial der "neuen" erneuerbaren Energien und Sparmassnahmen im Strom- und Wärmesektor.

## Internationale Zusammenarbeit

- **HRA:** EU-FTE-Rahmenprogramm, GRS (D), OECD/CSNI
- **STARS:** 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:** 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), JNC (JPN).
- **Fortg. Brennstoffzyklen:** CEA (F), JAERI, JNC (JPN), OECD/NSC und OECD/Halden (N), NRG (NL), int. Programme (FIGARO, ARIANE).
- **ALPHA:** EU-FTE-Rahmenprogramm, EPRI, GE (USA), Siemens / KWU (D), OECD/CSNI.
- **GaBE:** OECD/NEA und -/IEA, IAEA-Programme, ABB-CETP, MIT (USA); Univ. of Tokyo (JPN)

## Perspektiven für 2000

Die dargestellten Programme sind mittel- und langfristig angelegt. Im Jahr 1999 wurden tiefgreifende organisatorische Veränderungen vorgenommen, um neuen Prioritäten und Gegebenheiten besser zu entsprechen; ferner war die durch stetige Abnahme der Forschungsmittel reduzierte Grösse der Abteilung zu berücksichtigen. So wurde das bisherige Labor für Sicherheits- und Unfallforschung per Ende 1999 aufgelöst und seine zwei Sektionen in das Labor für Thermohydraulik bzw. für Werkstoffverhalten integriert, wodurch eine bessere Nutzung von Synergien erwartet wird.

Zahlreiche Vorschläge aus allen Arbeitsbereichen für Projekte sind innerhalb des 5. EU-FTE-Rahmen-

programms zusammen mit europäischen Partnern eingereicht worden, soweit bisher erkennbar mit Erfolg. Parallel zu deren Inangriffnahme soll substantiell zur Entwicklung eines Flüssigmetalltargets für Spallationsquellen beitragen (Projekt MEGAPIE). Es soll in die PSI-SINQ eingebaut und dort getestet werden, stellt aber auch ein wesentliches Element dar für sog. *Accelerator Driven Systems* (ADS), etwa zur Actinidentransmutation, in der fernerer Zukunft. Ferner steht der Entscheid über Bau und Betrieb der 5. SLS-Strahllinie als EXAFS-Anlage an, die hilft, zukünftige Bedürfnisse der nuklearen Energieforschung zu decken und die internationale Konkurrenzfähigkeit zu stärken. Schliesslich sollen Arbeiten fortgeführt werden, um den Begriff der

"nachhaltigen Entwicklung" durch die Aufstellung einer Reihe konsistenter, repräsentativer und quantifizierbarer

Indikatoren zu konkretisieren und zu operationalisieren.

## Publikationen

Im Rahmen der beschriebenen Projekte wurden 1999 rund 130 Arbeiten in Fachzeitschriften und Tagungsbänden publiziert; hinzu kommen ca. 113 Arbeiten zu Kolloquien und Seminaren. Diese sind im PSI-Jahresbericht (*Scientific Report*) aufgeführt. Herausragend sei

die Sonderausgabe des *Journal of Nuclear Materials* erwähnt, die den Stand von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der fortgeschrittenen nuklearen Brennstoffe dokumentiert, wie er in Papers anlässlich des 4. IMF-Workshop, der am PSI stattfand, präsentiert wurde.

## Liste der Projekte

Alle aufgeführten Programm- und Projektleiter sind vom PSI, Villigen.

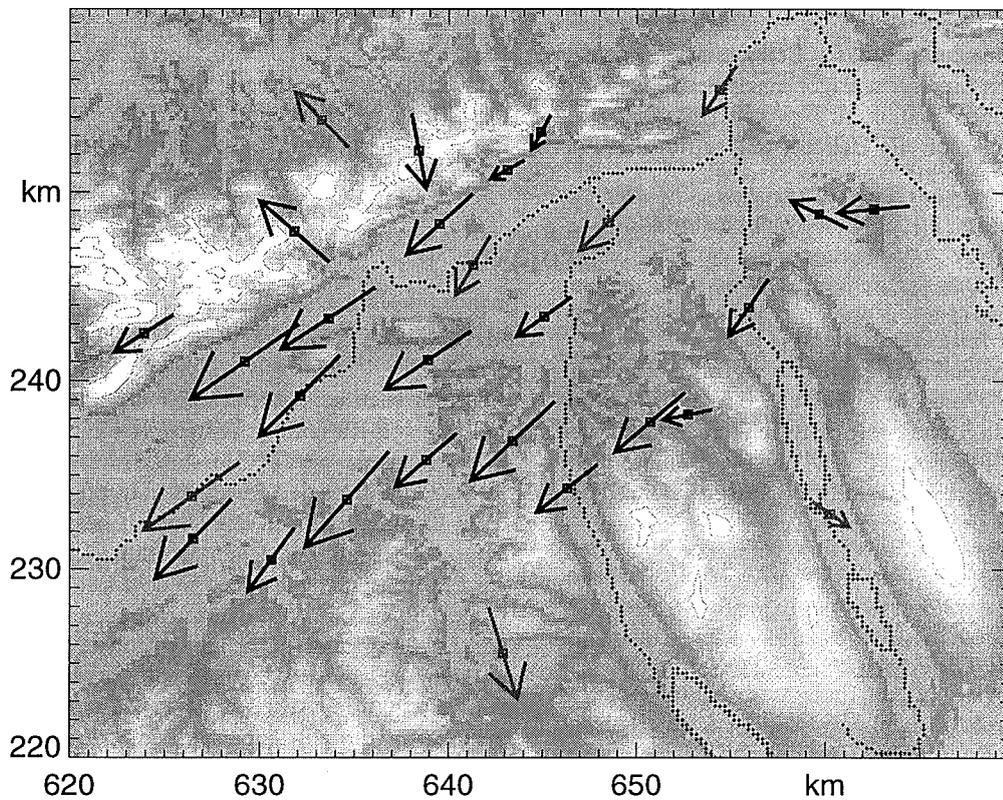
- [1] M. Zimmermann: *STARS*
- [2] V. Dang: *HRA*
- [3] F. Jatuff: *LWR-PROTEUS*
- [4] A. Hiltbold: *LWR-Kontamination*
- [5] F. Gröschel: *EDEN*
- [6] D. Kalkhof, P. Seifert: *Bauteilsicherheit*
- [7] P. Hosemann, S. Güntay: *Forschung zu schweren Unfällen*
- [8] J. Hadermann: *Entsorgung radioaktiver Abfälle*
- [9] R. Chawla, G. Ledergerber: *Fortgeschrittene Brennstoffzyklen*
- [10] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard: *ALPHA-II*
- [11] St. Hirschberg: *GaBE*

# REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Philip Tipping**  
tipping@hsk.psi.ch

---



## Windmessungen um Gösgen

Das Beispiel vom 3. Juli 1999, 16 Uhr, zeigt eine generelle NE-Strömung im Mittelland. Winde über den Messtationen mit maximaler Pfeillänge von 4,1 m/s. Routinestationen sind hell, temporäre Stationen dunkel eingezeichnet.

## Einführung

Die regulatorische Sicherheitsforschung auf dem Gebiet der Kernenergie ist notwendig, solange Kernkraftwerke (KKW) betrieben werden. In der Schweiz tragen die KKW etwa 40% zur Stromproduktion bei. Forschung im Kernenergiebereich ist wichtig, u.a. um die Sicherheit der Kernanlagen stetig zu erhöhen und/oder auf einem hohen Sicherheitsstand zu halten und um noch offene Detailfragen in einzelnen Bereichen, z.B. bei der Risikobewertung, zu beantworten. Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass viele Fragen aus der Kernenergieforschung auch für andere technische Bereiche von Interesse sind, beispielsweise Fragen zum Verhalten von Operateuren unter Stress, wie sie bei einer Anlagestörung auftreten können.

Für die Aufsichtsbehörde ist die Unterstützung der Sicherheitsforschung von grosser Bedeutung, da sie von Gesetzes wegen die Kernanlagen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu bewerten hat. Dies wird erleichtert, wenn sich die Behörde selber mit den For-

schungsergebnissen auseinandersetzt und aufgrund ihrer Aufsichtstätigkeit auch auf Kenntnislücken und Unsicherheiten hinweist, für die vertiefte Untersuchungen und Abklärungen wichtig und notwendig sind. In diesem Sinn ist die Behörde sowohl Nutzniesser der Forschung als auch Initiator für Forschungsarbeiten. Die nachfolgend aufgeführten und von der HSK unterstützten Forschungsvorhaben sind unter diesem Blickwinkel zu verstehen.

Die Forschungen umfassen ein weites Feld und reflektieren damit auch die verschiedenen Bereiche der Kernenergie. Die Arbeiten umfassen Fragen zur Alterung von Materialien, zum Einfluss der chemischen Umgebung auf das Materialverhalten, Fragen zum Brennstoffverhalten, zur Mensch-Maschine Wechselwirkung, Fragen zum Verhalten von Operateuren bei Störfällen, Fragen im Zusammenhang mit dem Verhalten radioaktiver Stoffe innerhalb und ausserhalb einer Kernanlagen im Normalbetrieb und bei Störfällen, usw.

## Projekte

### **WINDBANK: mittleres Aaretal [1]**

In vorangegangenen PSI Projekten sind die Windfeldsituationen im oberen und unteren Aaretal erfasst und nach meteorologischen Gesichtspunkten klassifiziert worden. Im Folgeprojekt gilt es, die Windfeldsituationen im mittleren Aaretal zu erfassen (siehe Titelbild).

Während 4 Monaten von Juli bis Oktober 1999 sind in einem Quadrat von ca. 30 km auf 30 km um das Kernkraftwerk Gösgen 22 Messstationen und 2 SODARS (*Sound Detection And Ranging*) betrieben worden. Diese temporär an wichtigen Stellen im Mittelland platzierten meteorologischen Messstationen lieferten mit den in dieser Region fest installierten Messstationen den Datensatz der Messkampagne. Die Datenhandhabung und Datenauswertung ist gegenwärtig in Bearbeitung.

Nach Abschluss dieses Projekts im mittleren Aaretal werden für alle schweizerischen KKW dreidimensionale Windfelddatenbanken bereit stehen. Damit wird der Notfallorganisation ein wichtiges Hilfsmittel zur Verfügung stehen.

### **Ausbreitungsprognose (A-PROG) [2]**

Das Projekt A-PROG, welches im Rahmen einer Dissertation abgewickelt wird, dient zur Entwicklung von Methoden für Diagnose und Prognose der Ausbreitung von Luftfremdstoffen. Projektbeginn der Uni-Bern war Anfang 1999. Seither ist ein systemtheoretischer Ansatz zur On-line-Bestimmung von Windfeldklassen entwickelt worden, woraus weiterführend ein Model zur Windfeldklassendiagnose mittels einer geringen Anzahl von On-line-Messstationen erarbeitet wurde.

### **Methodische Weiterentwicklungen in Aeroradiometrie [3]**

Aeroradiometrische Messungen ermöglichen die Herstellung von Karten zur Verteilung radioaktiver Isotope in der Schweiz. Solche Messungen liefern wichtige Informationen über das Ausmass von möglichen radioaktiven Kontaminationen der Umwelt bei Notfallsituationen oder bei radiologischen Störfällen. Aeroradiometrie wird in Europa gegenwärtig in acht Ländern eingesetzt, wobei hinsichtlich Messeinrichtungen, Methodologie und Erfahrung noch erhebliche Unterschiede bestehen; es gilt u.a. diese Unterschiede zu bereinigen. Ein Schwerpunkt der Arbeit der ETHZ ist die Entwicklung einer anwendungsorientierten Methodologie, insbesondere im Hinblick auf die Notfallbereitschaft der HSK

Im Rahmen des Projekts, das in die *ECEAGS (European Concerted Action of Environmental Airborn Gamma Spectroscopy)* eingebettet ist, wurden 1997 und 1999 Vergleichsmessungen mit österreichischen und deutschen Messteams durchgeführt. Weiter war eine On-line-Auswertung und ein Validierungs-System entwickelt worden, das bei den Messflügen 1999 erfolgreich eingesetzt wurde.

### **OECD Halden-Reaktor-Projekt [4]**

Das Halden-Reaktor-Projekt der OECD ist ein internationales (20 Länder) Forschungsprojekt und hat zwei Forschungsschwerpunkte: Brennstoff und Werkstoffe (F+M) sowie Mensch-Maschine-Wechselwirkung (MMI). Das Projekt dient auch zur Weiterbildung von Kernfachleuten. Über die Jahre hinweg sind 7 Wissenschaftler aus der Schweiz als so genannte "*Secondes*" (Auszubildende) nach Halden delegiert worden und haben mit Erfolg in verschiedenen F+M- und MMI-

Projekten mitgearbeitet. Im Folgenden werden die Zielsetzungen der von der HSK unterstützten Forschungsprojekte in Halden kurz dargelegt.

### **Brennstoff und Werkstoffe (F+M)**

Kernbrennstoff und Werkstoffe werden unter den in den Kernkraftwerken beim Normalbetrieb und bei Störfällen vorhandenen Bedingungen getestet. Beim Kernbrennstoff stehen Aspekte der Zuverlässigkeit und der Sicherheit im Vordergrund des Interesses, während bei den Werkstoffen deren altersbedingtes Verhalten untersucht wird.

Der derzeitige Schweizer "Secondee" im F+M-Gebiet hat wesentlich dazu beigetragen, dass die reaktorphysikalischen Berechnungen in Halden nun mit dem modernen Rechencode HELIOS durchgeführt werden. Dies erlaubt generell eine genauere und der Wirklichkeit näher kommende Auswertung der Experimente. Ferner hat er an der Auslegung eines neuen, vom PSI vorgeschlagenen Bestrahlungsversuchs mit MOX (Uran-Plutonium-Mischoxid)-Brennstoff und uranfreiem (Inert-Matrix-Brennstoff [IMF]) Brennstoff mitgewirkt, dessen Start für den Beginn des Jahres 2000 vorgesehen ist.

### **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 den verschiedensten Situationen untersucht. Die Ergebnisse sind auch für laufende Kernanlagen von Bedeutung und zielen auf eine Reduktion und eine bessere Prognostizierbarkeit des menschlichen Verhaltens. 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 die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Systemen werden Methoden entwickelt, um sicherheitsrelevante Software mit höher Qualität zu entwickeln und zuverlässig zu bewerten.

### **STARS-III: Simulationsmodelle zur Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz [5]**

Mit dem Forschungsprojekt "STARS" wird seit einigen Jahren am PSI eine Gruppe von Experten aufgebaut, die mit adäquaten Rechenprogrammen Kern- und Störfallanalysen für alle schweizerische KKW durchführen

kann. Das Ziel ist, deterministische Sicherheitsanalysen zur Überprüfung des Brennstoff- und Anlageverhaltens durchzuführen. Das Projekt enthält die Bereitstellung und Validierung geeigneter Rechenmodellen, forschungsorientierte Arbeiten sowie auch Dienstleistungen für die HSK in der Form von sog. "On-Call"-Aufträgen.

Das Projekt STARS-III wurde als Folgeprojekt von STARS-II, das Ende 1996 erfolgreich abgeschlossen worden war, im 1997 begonnen und ist 1999 in eine entscheidende Phase gekommen, in der die Fertigstellung der Anlagenmodelle zum grössten Teil abgeschlossen werden konnte. Im Rahmen der forschungsorientierten Arbeiten wurde die Validierung der Anlagenmodelle weitergeführt; ebenso wurde die Validierung der Rechenprogramme fortgesetzt, u.a. mit der Analyse von Leistungstransienten, die in einer japanischen Testanlage durchgeführt wurden. Weiterhin wurde das Stabilitätsverhalten von Siedewasserreaktoren, insbesondere das Auftreten von sog. regionalen Oszillationen, vertieft analysiert.

Die eingesetzten Rechenprogramme enthalten realistische Modelle und Annahmen ("best-estimate"); folglich ist die Abschätzung der dabei auftretenden Unsicherheiten wichtig. Ein systematisches Verfahren der Unsicherheitsanalyse basierend auf objektiv ermittelten Unsicherheitsparametern wurde erstmals erprobt.

Im Rahmen der On-call-Aufträgen der HSK sind u.a. die Vorausrechnung verschiedener Tests bei erhöhter Leistung für das KKW Leibstadt, die Überprüfung von Kritikalitätsrechnungen einer Transportflasche für das KKW Gösgen und die Analyse der für die sog. "Shutdown PSA" (probabilistische Sicherheitsanalysen für die Stillstand- und Schwachlastphasen) verwendeten thermohydraulischen Rechnungen für das KKW Beznau zu erwähnen. Bei diesen Fällen handelt es sich um Rechnungen, die der HSK zur Beurteilung der Anlagesicherheit von Nutzen waren. Durch diese On-call-Arbeiten wurde die Belastbarkeit der Rechenmethoden sowie auch das Potenzial des STARS-Teams als Leistungserbringer erfolgreich bestätigt.

Insgesamt sind die STARS-Arbeiten für die HSK weiterhin von hoher Bedeutung, da die HSK selbst keine unabhängige quantitative Überprüfung der vom Hersteller oder Betreiber eingereichten Störfallanalysen durchführen kann. Somit erfüllt das STARS-Projekt eine für die HSK wichtige Aufgabe.

### **Human Reliability Analysis, Applications and Methods Development [6]**

"Human Reliability Analysis" (HRA) läuft seit 1997 als ein vom PSI, der HSK und den Werken 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 Unfäl-

len. Damit leistet sie auch einen Beitrag zur Weiterentwicklung der PSA-Methodik insgesamt und dies in Richtung einer dynamischen Modellierung von Unfallabläufen.

Mit den heute verfügbaren HRA-Methoden können spontane, von den Vorschriften nicht verlangte Handlungen, welche unter Umständen den Verlauf eines Unfalls negativ beeinflussen (sogenannte "Error of Commission" EOC) nicht systematisch erfasst werden.

In Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) wurde 1999 ein Reihe von neuen methodischen Ansätzen zur Analyse von EOC beurteilt. Mit den Methoden ATHEANA (NRC, USA), Borssele-Screening (Borssele, NL), CREAM (Hollnagel, Halden), CAHR (Sträter, GRS) und CODA (Reer, PSI) wurden zwei Zwischenfälle analysiert, in denen tatsächlich EOCs aufgetreten sind. Damit konnten wertvolle Erkenntnisse über Vor- und Nachteile des jeweiligen Ansatzes gewonnen werden. Das Hauptproblem bleibt die Identifikation möglicher EOC, wozu verschiedene Suchstrategien entwickelt wurden. In zukünftigen, leistungsfähigeren HRA-Methoden sollen diese Suchstrategien kombiniert werden.

Im HRA Projekt wird auch die Interaktion zwischen einem Operateur und der Anlage mit Hilfe eines dynamischen Modells simuliert. Die dynamischen Eigenschaften der Mensch-Maschine Interaktion in Unfallszenarien verlangen eine detaillierte, zeitabhängige Modellierung. Die heute in der PSA üblichen Fehler- und Ereignisbaummodelle werden dem dynamischen Charakter der Mensch-Maschine Interaktion nur bedingt gerecht.

Am PSI wurden zwei verschiedene, komplementäre Simulationsmethoden für dynamische PSA-Analysen untersucht, und deren Vor- und Nachteile wurden beschrieben. Bei der Umsetzung der Methode in ein Simulationstool konnte auf bereits bestehende Elemente zurückgegriffen werden (das Simulationsprogramm für das Anlageverhalten konnte beispielsweise vom STARS-Projekt übernommen werden).

#### **Schwere Unfälle (Severe Accident Research) [7]**

Forschungen zum besseren Verständnis des Anlageverhaltens bei schweren Unfällen sind aufwändig und können meist nur als gemeinsame Forschungsprojekte mit finanzieller Unterstützung mehrere Länder durchgeführt werden. Auch wenn schwere Unfälle sehr unwahrscheinlich sind, ist ein genaueres Verständnis über deren Ablauf von Interesse, um eine plausible Risikoabschätzung durchführen zu können. Zudem geben Ergebnisse solcher Unfallforschungen auch Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten in den Anlagen selber, um damit sowohl die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls noch weiter zu reduzieren als auch die Auswirkungen eines schweren Unfalls weiter einzuschränken.

Seit Jahren hat sich die Schweiz an internationalen Forschungsvorhaben beteiligt, sowohl finanziell als auch durch gezielte Forschungsarbeiten zu Teilaspekten. Diese Vorgehensweise ermöglicht der Schweiz, wichtige Informationen und Ergebnisse aus den Forschungsvorhaben direkt zu erhalten und auch die Forschungs-

schwerpunkte mitzubestimmen.

Wichtige und interessante Forschungsvorhaben auf dem Gebiet der "Schweren Unfälle" werden seit Jahren in den USA durchgeführt. Die Schweiz hat sich deshalb im Rahmen von Abkommen mit der amerikanischen Sicherheitsbehörde (NRC) an einigen dieser Forschungsvorhaben beteiligt. Nachfolgend sind die wichtigsten Verträge mit der NRC aufgelistet.

Mit einem Ende September 1999 zwischen dem BFE und der US-NRC unterzeichneten Vertrag ist die HSK an folgenden Projekten beteiligt:

- *Co-operative Probabilistic Risk Assessment Programme (COOPRA)*
- *Co-operative Severe Accident Research Programme (CSARP)*
- *Exploratory Research Programme on the Effects of Deregulation on Plant Safety Aging Related Research Programs (ARRP)*.

Ebenfalls Ende September 1999 wurde eine Vereinbarung über "Arrangement for the Exchange of Technical Information and Co-operation in Nuclear Safety Matters" unterzeichnet. Bereits im Februar 1998 wurde ein Vertrag zwischen dem PSI und der US-NRC zum Thema "Thermal-Hydraulic Code Applications and Maintenance (CAMP)" unterzeichnet, von dem die HSK indirekt Nutzniesserin ist.

Die US-NRC ist ihrerseits interessiert an den von der HSK unterstützten Entwicklung eines "Accident Diagnostic, Analysis and Management (ADAM)" Codes, mit dem im Falle einer Störung mit Hilfe der HSK von den Kernkraftwerken on-line übertragenen Parametern Störfalldiagnosen und -prognosen sehr schnell durchgeführt werden können.

#### **PHEBUS: Fission Product (FP) Programme [8]**

Die Schweiz beteiligt sich am PHEBUS-FP-Programm in Cadarache, Frankreich. PHEBUS FP ist das gegenwärtig grösste internationale Programm zur Untersuchung der Freisetzung radioaktiver Stoffe bei schweren Unfällen.

Das PSI nimmt an der Konzipierung und technischen Vorbereitung teil, führt Nachbestrahlungsuntersuchungen und -analysen durch und unterstützt die Interpretation der erhaltenen Daten mit realitätsnahen Laborexperimenten. Ziel der Schweizer Beteiligung, die durch Vertreter der KKW, der HSK und des PSI wahrgenommen wird, ist es, international validierte Daten zu erhalten, die in Codes für die Analyse "Schwere Unfälle" integriert werden können und Massnahmen für moderne Sicherheitskonzepte und -vorkehrungen abzuleiten.

1999 wurden unter massgeblicher Mitarbeit der Schweiz die grundsätzlichen Parameter für den "Borcarbidtest" erarbeitet, der auch für KKW-Betreiber von Siedewasserreaktoren von Interesse ist. Für den im Juli 1999 im PHEBUS-Reaktor durchgeführten Kernschmelztest wurde das Filtersystem für die Abtrennung der freigesetzten Brennstoff- und Reaktionsprodukte am PSI konzipiert und getestet. Die Filterproben werden

nach einer Abklingphase analysiert. Weiterhin wurden die Zusammensetzung und das Temperaturprofil von Corium-Proben des vergangenen Tests durch Mikroanalyse im PSI-Hotlabor bestimmt. Eine Hochleistungs-Beta-Strahlenquelle (hochkonzentrierte  $^{188}\text{Re}$ -Lösungen) für In-situ-Untersuchungen von Radiolysevorgängen im Reaktorsumpf während eines schweren Störfalls wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Die begonnenen Experimente zur Jodfreisetzung aus Silberiodid-Suspensionen werden fortgesetzt.

#### **Wasserchemie: Kontaminationskontrolle im Primärkreislauf von schweizerischen Siedewasserreaktoren [9]**

Seit dem Jahr 1989 bearbeitet das PSI im Auftrag der HSK Fragen der Wasserchemie und der Kontaminationsmechanismen bzw. Aktivitätsablagerungen auf rostfreien Stählen in schweizerischen Siedewasserreaktoren. Wertvolle Erkenntnisse sind vorhanden (siehe z.B. die Jahresberichte 1997 und 1998). Dazu gehören auch die sog. "On-Call"-Dienstleistungen, welche das PSI für die HSK durchführt. Ein Beispiel für eine solche Dienstleistung war die Arbeit betreffend die Korrosionsschäden an den Hüllrohren der Brennelemente im KKW Leibstadt. Im Hinblick auf die Probleme mit Spannungsrisskorrosion an Kerneinbauten und der damit vorgeschlagenen Änderungen der Wasserchemie (*Hydrogen Water Chemistry, Noble Metal Chemical Addition*), um die Spannungsrisskorrosion zu mildern bzw. zu vermeiden, sind neue Forschungsarbeiten nötig, um den Einfluss von Änderungen der Wasserchemie auf Aktivitätsablagerungsprozesse abzuklären. Mit Hilfe empirischer Modellansätze für den Stofftransport basierend auf Stoffaustauschkoeffizienten, partikulärem Transport und einem Diffusions- und Migrationsansatz konnte der Aktivitätsaufbau in einem Siedewasserreaktor (SWR) nachvollzogen werden.

Die Aktivitätsaufnahme voroxidierter Proben soll unter SWR-Bedingungen in Abhängigkeit vom Korrosionspotenzial bestimmt werden, wobei der Schwerpunkt auf der Übertragbarkeit der Resultate liegt.

Empirische Daten aus den Kraftwerken sollen experimentell nachvollzogen und die Auswirkungen künftiger Änderungen der Wasserchemie bestimmt werden. Die Experimente werden von thermochemischen Rechnungen begleitet.

#### **Spannungsrisskorrosion (SpRK) von Stählen für Reaktorkomponenten in sauerstoffhaltigem Heisswasser [10]**

Ausgelöst wurde diese Studie durch die zu Beginn des Projekts herrschende Unsicherheit bei der Einschätzung der Gefährdung des Reaktordruckbehälters (RDB) durch korrosionsgestütztes Risswachstum unter Bedingungen, die dem stationären Normalbetrieb des Siedewasserreaktors entsprechen.

Im PSI wurden in den letzten fünf Jahren Untersuchungen zur SpRK durchgeführt, die sehr hohen Qualitätssicherungs-Standards unterliegen. Inzwischen verfügt das PSI weltweit über eine der umfangreichsten Datenbanken für Risswachstumgeschwindigkeiten bei RDB-Stählen. Die Ergebnisse zeigen, dass im Normalbetrieb

kein sicherheitstechnisch relevantes Risswachstum durch Spannungsrisskorrosion auftritt. Internationale Ringversuche, z. B. mit der MPA, Stuttgart, und dem VTT, Finnland, bestätigen den Befund des PSI. Die Untersuchungen werden zur Zeit ergänzt mit Versuchsreihen, die den Langzeiteinfluss von Last-Transienten und Schwingungen auf das Risswachstum bei RDB-Stählen erforschen.

Umgebungsbedingte Risskorrosion, Rissentstehung und Risswachstum, entstehen durch das Zusammenwirken werkstoffspezifischer Eigenschaften (Mikrostruktur), Spannungseinfluss (statisch, zyklisch, oft Schweiss-eigenstressungen) und einer chemisch wirksamen Umgebung. Im Hinblick auf die älter werdenden Kernkraftwerke gewinnt die Abklärung einer möglichen Gefährdung sicherheitsrelevanter Bauteile durch Risskorrosion an Bedeutung.

Mit den weiteren Untersuchungen, die z. Zt. am PSI durchgeführt werden, soll abgeklärt werden, wie sich entstandene Risse nach Last-Transienten verhalten, die beispielsweise beim An- und Abfahren des Kraftwerks oder einzelner Systeme und bei Laständerungen auftreten. Auch wird der Einfluss von zyklischer Beanspruchung auf die SpRK (z.B. durch strömungsbedingte Schwingungen) und das Verhalten der Risse in Schweissnahtbereichen untersucht.

#### **Früherkennung von Ermüdungsschädigung an Kernkraftwerkskomponenten (FEVER) [11]**

Eine neue Herausforderung für fortschrittliche Techniken der zerstörungsfreien Prüfung ist die Entwicklung von Frühwarnsystemen, die in der Lage sind, Veränderungen in den Mikrostrukturen von Stählen frühzeitig zu erkennen und zu überwachen. Besondere Bedeutung erlangt die Schadensfrüherkennung in der Kernkraftwerkstechnik, die zur Erhöhung der Sicherheit und zu Verbesserungen im Lebensdauer-Management von einzelnen Komponenten beitragen kann. Im Projekt FEVER am PSI werden Untersuchungen zur Bewertung des Ermüdungszustands im Vorrissstadium an austenitischen Stählen durchgeführt. Dabei werden Betriebsbedingungen simuliert, die der thermischen Ermüdung infolge von Temperaturschichtungen entsprechen. Diese Materialbelastung führt zu niederzyklischer Ermüdungsschädigung. Sie verursacht einen verformungsinduzierten Phasenübergang im Material. Es wurden erste Strukturuntersuchungen mittels Metallographie und Neutronendiffraktometrie und erste Messungen mittels zerstörungsfreier magnetischer Prüfmethode durchgeführt.

#### **Zusammenarbeit in der Dosimetrie [12]**

Die Personendosimetrie bei äusserer und innerer Bestrahlung ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Gemäss neuer Strahlenschutzverordnung werden erhöhte Anforderungen an die Dosimetrie gestellt. Die Arbeiten im Jahr 1999 betrafen den vereinbarten Schwerpunkt "Technische Umsetzung der neuen Dosimetrieverordnung" und die Prüfung von Freimessschranken, die für die Inaktivfreigabe von Materialien aus der kontrollierten Zone eingesetzt werden. Speziell zu erwähnen ist Folgendes:

Die Mess- und Rechenergebnisse der Kalibrierung eines in einem Kernkraftwerk eingesetzten Triagemonitors für Inkorporation lieferte der Expertengruppe Dosimetrie der EKS die Grundlagen für die "Empfehlung zur Standardisierung der Kalibrierung und Prüfung von Ganzkörper oder Teilkörpermessplätzen". Damit wird ein wichtiger Teil der Ausführungsbestimmungen zur neu in die Dosimetrieverordnung (DoV) aufgenommenen Inkorporationsüberwachung einheitlich festgelegt.

Es ist geplant die Kalibrierung der Triagemonitore der andern Kernkraftwerke innerhalb der Übergangsfrist der neuen DoV, die seit Januar 2000 in Kraft ist, zu überprüfen.

Zum Nachweis, dass Materialien aus der kontrollierten Zonen nicht mehr in den Geltungsbereich der Strahlenschutzverordnung fallen und damit konventionell entsorgt werden können, setzen die Kernanlagen mehr und mehr Freimessschranke ein. Die Überprüfung der Kalibrierung der in einem Kernkraftwerk eingesetzten Geräte zeigte, dass die Freimessschranke zur Freimessung von Materialien geeignet sind. Voraussetzung dafür ist jedoch eine sorgfältige, dem Messgut angepasste Kalibrierung. Aus diesem Grund sollen im Rahmen dieser Vereinbarung bei allen eingesetzten Freimessschranken die Kalibrierungen überprüft werden.

Bei den Transporten von abgebrannten Brennelementen wird die Kontamination der beladenen Behälter in der Regel mit Wischtests ausgemessen. Anlässlich einer Voruntersuchung wurde in Zusammenarbeit mit dem PSI festgestellt, dass die Nachweisgrenze dieser Messmethode von der verwendeten Messgerät abhängig ist. Diese von der HSK *ad hoc* eingebrachte Feststellung soll im kommenden Jahr in einem Projekt vertieft untersucht werden.

#### **Zusammenarbeit in der Radioanalytik [13]**

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 Alphastrahlen) 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 Alphastrahlen in Urin- und Stuhlproben und bei der Neuentwicklung eines Analyseverfahrens zur Bestimmung von Transuranen in Materialproben aus Kernkraftwerken. Derzeit werden zahlreiche Bodenproben in der Umgebung der ZWILAG AG auf die typischen Gehalte an Photonen-Strahlern und oben genannten Spezialnuklide im Rahmen des Projekts Beweissicherung analysiert. Alle Neuentwicklungen wurden als Laborvorschriften in das durch das Eidgenössische Amt für Messwesen akkreditierte radioanalytische Labor übernommen und mehrere Publikationen in Fachzeitschriften erstellt.

#### **Radioökologie: Studien und wissenschaftlich-technische Dienstleistungen [14]**

Das Studium des Verhaltens radioaktiver Nuklide in Böden und Pflanzen sowie die Validierung radioökologischer Rechenmodelle sind wichtige Strahlenschutzanliegen für die HSK. Labor- und Feldversuche liefern u.a. Hinweise auf mögliche Ingestionspfade über Blätter und Wurzeln. Die Zusammenarbeit mit der NAZ und auch mit internationalen Projekten sind Bestandteile dieser Arbeit.

Die Teilnahme an einem europäischen Forschungsprojekt über "*Long-term dynamics of radionuclides in semi-natural environments: derivation of parameters and modelling*" und der erfolgreiche Abschluss brachten die Schweiz in den Besitz der entwickelten Prognosemodelle, welche zugunsten der Notfallorganisationen eingesetzt werden können.

Die Zusammenarbeit mit SCK/CEN in Belgien brachte wesentliche neue Erkenntnisse über die Verteilung von Cs-137 und Sr-90 in Nutzholz. Die Resultate sind insofern bedeutsam, als sie Prognosen über die zukünftige Nutzung von Holz kontaminierter Wälder erlauben werden.

Die Anpassung der Parameter der PC-Version des radioökologischen Modells CHECOSYS an die schweizerischen Verhältnisse sowie Modellrechnungen in einer Arbeitsgruppe der KOMAC erhöhten das Verständnis für das Modell deutlich.

Der PSI Schlussbericht zu dieser Arbeit ist in Vorbereitung.

#### **Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität [15]**

Um bessere Einsicht in die biologische Wirkungsweise der Strahlung zu erhalten, fördert die HSK molekulare biologische Arbeiten am PSI. Die genauen Mechanismen, wie Zellen auf Strahlung reagieren, sind weitgehend unbekannt. Diese Arbeiten liefern einen Beitrag zum Grundwissen des Strahlenschutzes.

Im Zusammenhang mit der Reaktion der Zellen auf Strahlungen 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 Promotor wurde gefunden und soll genauer charakterisiert werden.

#### **Die Rolle des *Vascular Endothelial Growth Factor* [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 ist zu erwarten, dass 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 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 Manipu-

lation 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 der Defekte oder Entartung der Zellen entscheiden.

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Es kann eine zunehmende nationale und internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der nuklearen Forschung festgestellt werden. Diese gute Entwicklung

führt zu einer besseren Qualitätssicherung der Daten und Ergebnisse der Forschung.

## Bewertung 1999 und Ausblick 2000

Die HSK berichtet jährlich über den Stand der Arbeiten und über die erreichten Forschungsziele. Diese Berichte enthalten auch die Bewertungen der Projekte und der Ergebnisse durch den jeweiligen HSK-Projektbetreuer. Diese Bewertungen vermitteln einen guten Überblick über die Arbeit. Im Jahr 1999 konnten die Forschungsziele erreicht werden.

Im Zusammenhang mit der von der HSK verlangten Neubestimmung der seismischen Gefährdung an den Standorten der schweizerischen Kernkraftwerke sollen paläoseismische Untersuchungen im nördlichen Teil der Schweiz durchgeführt werden. Damit kann die Unsicherheit in den Erdbebenstudien reduziert und das Vertrauen in die Resultate verbessert werden.

Für die Zukunft geplant sind in STARS die Verbesserung und die weitere Validierung der Anlagenmodelle, die Nachrechnung der Betriebszyklen der Anlagen bis zum aktuellen Stand, die Weiterentwicklung und generelle Einführung der Unsicherheitsanalyse, die Zertifizierung des Projekts hinsichtlich Qualitätsmanagement und die Entwicklung einer auf der Internet-Technologie beruhenden Anlagedatenbank.

Auch im Bereich der "Schweren Unfallforschung" wird die HSK weiterhin die Anstrengungen der US-NRC und des PHEBUS-Projekts verfolgen und unterstützen. Auf dem Gebiet der "Human Factors" sind die Vorhaben in

Halden und das HRA-Projekt am PSI zu erwähnen, die beide für die Aufsichtstätigkeit der HSK wichtige Informationen liefern und deshalb weiterhin unterstützt werden.

Trotz hohem Stand der Messtechnik im Strahlenschutz ergeben sich immer neue Anforderungen aus der Praxis, denen mit Neuentwicklungen von Messmethoden und mit neuen Lösungsansätzen begegnet werden muss. Ein Beispiel ist die Messung von Umweltproben im Rahmen der Immissionsüberwachung. Da die HSK in ihrem Kontrollbereich periodisch mit solchen Problemen konfrontiert wird, soll ein Forschungs- oder Entwicklungsprogramm ermöglichen, Entwicklungsarbeiten für Analyse- und Messmethoden durchführen zu lassen.

Ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur Personendosimetrie durch äussere und innerer Bestrahlung soll es der HSK ermöglichen, geeignete Studien, Entwicklungsarbeiten und Messkampagnen durchführen zu lassen, um auftretende Dosimetrie Probleme auf höchstem fachlichem Niveau beurteilen zu können.

Für die HSK wichtige Themen sind die Kontaminationsmessungen und die Freigabeverfahren von Materialien aus kontrollierten Zonen. Bei der Festlegung dieser Verfahren sind teilweise noch praktische Probleme im Rahmen eines Forschungs- oder Entwicklungsprogrammes zu lösen.

## Liste der Projekte

- [1] W. Graber, PSI-Villigen: *WINDBANK mittleres Aaretal* (JB)
- [2] N. Semmer, Uni-Bern: *A-PROG*
- [3] L. Rybach, ETH-Zürich: *Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie* (JB) / ENET 9720656  
<http://www.geophys.ethz.ch>
- [4] U. Kasemeyer: *Mitarbeit im OECD-Halden-Reactor-Projekt auf dem Gebiet: Brennstoffsicherheit* (SB)  
<http://www.external.hrp.no>
- [5] M. Zimmermann, PSI-Villigen: *Simulationsmodelle zur Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz (STARS III)* (JB) / ENET 9400911

- [6] S. Hirschberg, PSI-Villigen: *Human Reliability Analysis Applications and Methods Development (HRA)* (JB) / ENET 9720255
  - [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. Hiltbold, PSI-Villigen: *Wasserchemie LWR Kontaminationskontrolle* (JB)
  - [10] H-P. Seifert, PSI-Villigen: *Spannungsrissskorrosion von Stählen für Reaktorkomponenten in Heisswasser* (JB)
  - [11] D. Kalkhof, PSI-Villigen: *Früherkennung von Ermüdungsschädigungen bei Kernkraftwerkskomponenten (FEVER)* (JB)
  - [12] Ch. Schuler, PSI-Villigen: *Zusammenarbeit in der Dosimetrie* (JB) / ENET 9401101
  - [13] J. Eikenberg, PSI-Villigen: *Zusammenarbeit in der Radioanalytik* (JB) / ENET 9300071
  - [14] T. Riesen, PSI-Villigen: *Radioökologische Studien: ECOSYS* (SB) / ENET9100004
  - [15] R. Jaussi, PSI-Villigen: *Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität* (JB) / ENET 9723973
  - [16] K. Ballmer-Hofer, PSI-Villigen: *Die Rolle von Vascular Endothelial Growth Factor bei der Reparatur von strahleninduzierten Zellschäden* (JB) / <http://www.psi.ch>
- (JB) Jahresbericht 1999 vorhanden  
(SB) Schlussbericht vorhanden

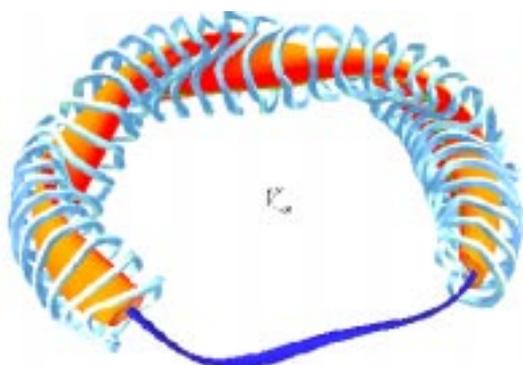
## FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTROLÉE

Rapport de synthèse  
sur les activités 1999 du programme de recherche

**Stéphane Berthet**

[stephane.berthet@bbw.admin.ch](mailto:stephane.berthet@bbw.admin.ch)

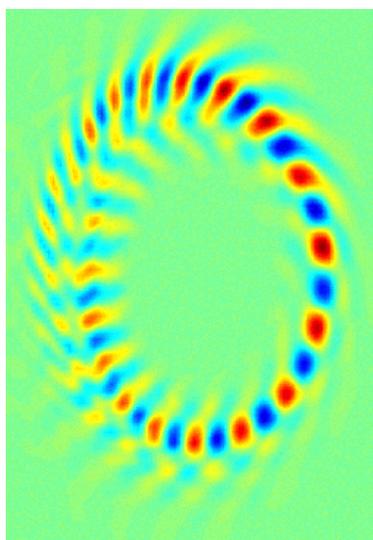
---



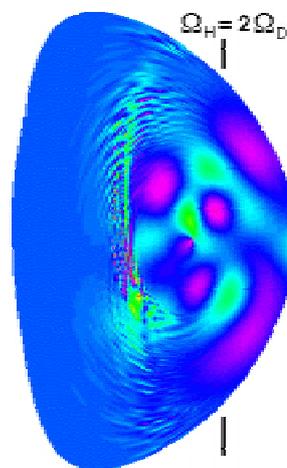
a)



b)



c)



d)

### "Plasmas": simulations numériques (CRPP/EPFL)

a) configuration de plasma pour *stellarateur*, b) vue éclatée d'un *gyrotron* (radiations électromagnétiques de haute fréquence et haute puissance pour le chauffage du plasma), c) instabilités électrostatiques dans un plasma, d) mode propre d'une onde électromagnétique dans un plasma.

## Centre de gravité du programme Fusion

L'effort mondial dans le domaine de la fusion atteint environ 1,25 milliards de dollars par année. L'Europe, *leader* mondial dans ce domaine, contribue à cet effort à une hauteur de 40%. Le budget de l'Union européenne (UE) pour la recherche en fusion correspond à 5% du budget total de l'UE pour la recherche scientifique. Ce programme Fusion de l'UE couvre toutes les activités de la fusion magnétique dans les États-membres (Suisse incluse). Il se présente comme une seule entité vis-à-vis des autres programmes Fusion dans le monde, et est, depuis plusieurs années, une recherche qui a pour ob-

jectif de doter l'Europe de la capacité de construire un réacteur de fusion expérimental (*ITER*) puis de faire la démonstration de la production d'électricité pour finalement construire des installations commerciales.

En Suisse, les activités dans le domaine de la fusion sont coordonnées par le Centre de recherche en physique des plasmas (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

En **Russie**, les scientifiques se sont embarqués sur des expériences qui tendent à générer et à maintenir un plasma à haute température dans un *tokamak* sphérique "*Globus M*", un globe géant de 5 tonnes, à St-Petersbourg. Ces expériences sont financées par le Japon et l'UE.

Le **Japon** a rassemblé 10 instituts de recherche sur la fusion au sein d'un seul réseau afin d'accroître la collaboration entre instituts universitaires et instituts gouvernementaux. Cette restructuration doit permettre au programme fusion japonais un développement plus cohérent et plus efficace, afin qu'il puisse jouer un rôle important dans *ITER*. Cette action se place dans la stratégie mise en place par le Japon pour obtenir le site d'*ITER*. Cependant, avant 2005, le Japon ne semble pas être prêt pour la construction d'*ITER*.

En **Europe de l'Est**, la Bulgarie, la République tchèque, la Hongrie, la Lettonie, la Roumanie, la République slovaque et la Slovaquie ont conclu chacun un accord pour être associé au 5<sup>e</sup> PCRD (Programme cadre de recherche et démonstration), Programme de l'EURATOM ; ce qui leur permet d'être impliqués dans l'action-clé Fusion. D'autre part, 3 contrats d'Association ont été conclus avec des organisations en République tchèque (Académie des sciences), en Hongrie (Académie des sciences) et en Roumanie (Agence nationale pour la science, la technologie et l'innovation). Ces organisations se sont aussi adressées à la Commission européenne pour adhérer au *European Fusion Development Agreement*.

Aux **USA**, après des années de coupes budgétaires et de divisions internes entre les groupes fusion par confinement inertiel et fusion par confinement magnétique, les choses semblent s'améliorer dans ce domaine de recherche. Les deux communautés essayent de présenter un front unifié vis-à-vis des instances de financement. Aux USA, le DOE espère que les tensions passées pourront être réduites en définissant des activités technologiques intéressant les deux tendances. Cela dit, certains estiment qu'il sera difficile de trouver des points communs.

Le programme *Fusion Energy Sciences* a été fortement réduit par le Congrès, il y a trois ans. Il s'en est suivi un retrait des USA du projet *ITER* (juillet 1999). D'un autre côté, le Congrès supportait pleinement la fusion par confinement inertiel: le *NIF* (1,2 milliard de dollars) au *Lawrence Livermore Laboratory*, en Californie. Cette dernière installation de 192 lasers doit d'ailleurs faire face aujourd'hui à des problèmes de gestion très sérieux (surcoût de 300 MUSD [millions de dollars], *planning* sous-estimé, gestion de la construction déficiente, etc.). Aux USA, la fusion par confinement inertiel est principalement financée par la branche militaire du DOE. Le Congrès soutient ces recherches, car elles permettent aux scientifiques d'améliorer leur compréhension des armes nucléaires et de tester et maintenir leur arsenal nucléaire fiable et opérationnel sans avoir recours à des tests grandeur nature. L'intérêt du point de vue de l'énergie de ce type de fusion a toujours été derrière l'intérêt militaire. En 1995, les USA dépensaient 360 MUSD pour le programme de fusion par confinement magnétique et un petit peu plus que la moitié pour la fusion par confinement inertiel. En 1999, les USA devraient dépenser 500 MUSD pour des activités inertielles et un peu moins de la moitié sur le confinement magnétique.

Depuis le retrait des USA du projet *ITER*, une partie de la communauté scientifique américaine se sent isolée, notamment, des groupes d'experts d'*ITER* qui contribuent largement au développement de la recherche au niveau national. Cela dit, depuis juillet 1999, les USA ont continué à travailler de manière inofficielle sur ce projet.

Le Secrétaire à l'énergie du *Department of Energy (DOE)*, a déclaré, le 1<sup>er</sup> décembre dernier, qu'il souhaitait augmenter le support financier sur la fusion, un programme qui, selon lui, a reçu trop peu d'attention. Il lui restera encore à convaincre le Congrès !

Le projet *ITER* (*International Thermonuclear Experiment Reactor*), lancé en 1988, par l'Union Soviétique, le Japon, les USA et l'Europe (plus la Suisse), constitue une étape primordiale dans les activités, à long terme,

engagées pour parvenir au but ultime de la production commerciale d'énergie propre par fusion thermonucléaire. Considérant l'orientation de leur programme Fusion respectif vers le concept d'un réacteur expérimental, l'Europe (Suisse et Canada inclus), le Japon et la Russie ont, en juillet 1998, poursuivi l'*ITER-EDA (Engineering Design Activities)* pour 3 années supplémentaires. Quant aux USA, par manque de budget et de volonté politique, ils n'ont participé à cette extension de l'*ITER-EDA* que jusqu'en juillet 1999. Néanmoins, le projet a été depuis revu à la baisse avec, inévitablement, des objectifs moins ambitieux.

Aujourd'hui, cette réorientation du projet *ITER* a pris pour nom *ITER Fusion Energy Advanced Tokamak (ITER-FEAT)*. La réduction en taille et en coût d'*ITER* a été obtenue essentiellement en abandonnant, parmi les principaux objectifs scientifiques de la machine, l'allumage du plasma. Dans un réacteur de fusion, tel que *ITER*, qui utilise le confinement magnétique, le plasma (deutérium-tritium) est chauffé à une température d'environ  $10^8$  °C (100 millions de degrés Celsius). Les réactions de fusion produisent des neutrons, qui évacuent une partie de l'énergie produite (14 MeV), et des particules alpha (noyau d'hélium), qui, elles, contribuent à réchauffer le plasma. Lorsque ce dernier effet devient suffisamment important, il est capable de maintenir la réaction de fusion indéfiniment sans que l'on ait besoin d'ajouter de l'énergie, c'est ce que l'on nomme l'allumage. Plutôt que d'atteindre l'allumage, le nouveau concept d'*ITER* produira un plasma dans lequel les particules alpha fourniront au moins le 50% du chauffage du plasma. Ce nouveau concept produira au minimum 10 fois plus d'énergie qu'il en consommera, et pourra générer une puissance de fusion de 400 MW sur une période de 400 secondes au lieu des 1,5 GW sur 1'000 secondes. *ITER-FEAT* devra démontrer la disponibilité et l'intégration de technologies essentielles pour un réacteur de fusion (aimants supraconducteurs, entretien des installations à distance par télécommande). Cela sera aussi un test pour les différents composants des futurs réacteurs (systèmes pour extraire la puissance et les particules issues du plasma) de même que pour le concept de régénération du tritium au sein du réacteur qui rendra celui-ci autosuffisant à l'égard du tritium.

Ce nouveau concept satisfera la majeure partie des objectifs scientifiques et technologiques qui ont été définis dans le programme Fusion européen pour l'étape d'après le *JET (Next Step)*. Sa construction devrait coûter 3,3 milliards d'euros sur une période de 10 ans et être conduite dans le cadre d'une collaboration internationale. Une décision de construction du réacteur expérimental *ITER-FEAT* ne sera par conséquent pas prise avant 2001-2002, à la fin du 5<sup>e</sup> PCRD. Si tout va bien, la construction commencera au milieu du 6<sup>e</sup> PCRD (2002-2006) et devrait se terminer vers la fin du 8<sup>e</sup> PCRD (2010-2014). Cependant, avec le Japon qui ne semble pas pouvoir commencer la construction d'*ITER-FEAT* avant 2005, le directeur du programme Fusion européen craint que le 6<sup>e</sup> PCRD ne contienne qu'un programme Fusion réduit. La construction devrait prendre environ 10 ans et, ensuite, il faut compter avec 10 à 20 ans pour la phase expérimentale.

Du succès de celle-ci dépendra la réalisation d'une centrale de démonstration (*DEMO*) pour laquelle il faut aussi prévoir environ 20 ans. Cela nous amène ainsi vers le milieu du 21<sup>e</sup> siècle pour une exploitation commerciale de l'énergie de fusion.

Pour le site d'*ITER*, les discussions sont toujours ouvertes. Dernièrement, les autorités canadiennes se sont rendues à Bruxelles afin de soumettre des propositions de sites canadiens. Un tel choix pourrait relancer l'intérêt des USA à l'égard d'*ITER*. Leur proximité géographique favoriserait la participation de leur industrie à la phase de construction, ce qui du point de vue économique n'est pas négligeable. D'autre part, le Canada possède déjà une réglementation sur le tritium ce qui constitue un certain avantage. Néanmoins, l'Europe en tant que leader mondial de la recherche sur la fusion a aussi sa carte à jouer avec des sites potentiels en France ou en Italie. Accueillir *ITER* en Europe, permettrait de maintenir le *leadership* de la fusion sur le Vieux Continent tout en y attirant les meilleurs scientifiques mondiaux en la matière. L'enjeu économique n'est pas négligeable non plus puisque l'industrie européenne aura ainsi l'opportunité d'acquérir la maîtrise des technologies de la fusion (matériaux, supraconducteur, etc.).

En **Europe**, la nouvelle Commission européenne a pris ses fonctions mi-1999. Le nouveau Commissaire pour la recherche est physicien de formation. Cela laisse entrevoir une approche plus scientifique de certaines questions. En juillet 1999, la Commission a mis sur pied un comité pour réaliser une nouvelle évaluation du programme Fusion couvrant les années 1995 à 1999 (*5-Years Assessment of Nuclear Energy Programme Fusion Board*). Cet exercice fait partie du processus régulier de suivi des activités de ce programme. Une telle analyse est nécessaire pour la préparation du 6<sup>e</sup> PCRD. Le rapport est attendu pour juin 2000. Il évaluera les activités de fusion européennes (rendement, efficacité, résultats majeurs, leçons apprises, pertinence) à la lumière des critères et des objectifs scientifique et technologique définis dans le 5<sup>e</sup> PCRD, mais il couvrira aussi les activités pertinentes de ce sujet qui avaient été incluses dans le programme spécifique Fusion sous les 4<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> PCRD.

Le programme Fusion de l'Union européenne a évolué (technologie, installation) et des efforts considérables dans le développement des technologies nécessaires à la réalisation d'un premier réacteur thermonucléaire ont été réalisés. Avec l'arrivée du 5<sup>e</sup> PCRD, la Commission a, pour la période 1999-2002, donné un cadre juridique simple et stable au programme Fusion européen avec l'accord *European Fusion Development Agreement (EFDA)*. Celui-ci, entré en vigueur à la mi-1999, couvre les activités technologiques dans les Associations et dans l'industrie européenne. Il permet une utilisation de l'installation *JET*, après 1999 et finalement supporte les contributions européennes aux collaborations internationales comme *ITER*, par exemple.

Le *JET*, le succès le plus visible du programme Fusion européen, a atteint plus que les objectifs pour lesquels il avait été conçu il y a environ 25 ans, en jouant un rôle

de premier plan dans la recherche sur la fusion au niveau mondial. Parmi les plus importants résultats on peut citer notamment: le record mondial pour la production de puissance de fusion (16 MW), l'observation on ne peut plus claire de l'auto-chauffage du plasma par les réactions de fusion, et l'utilisation avec succès des technologies de manipulation à distance lors d'opérations complexes dans la chambre de confinement activée par les neutrons. Ces résultats, complétés par les résultats scientifiques et techniques obtenus dans les Associations, font que la fusion par confinement magnétique a sa place dans le domaine de la recherche énergétique. Du point de vue de la science, le *JET* a été extrêmement productif. Pas moins de 3400 personnes y sont passées et plus de 100 thèses de doctorats y ont été réalisées.

Au 31 décembre 1999, le *JET Joint Undertaking* s'est terminé pour continuer sa carrière sous une nouvelle forme juridique. Il devient propriété du *United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA, Association hôte/GB)* mais pourra encore être utilisé par les autres Associations, qui l'ont financé jusqu'à présent. Il y a 2 types d'accords pour la suite du *JET*. L'un entre la Commission européenne et l'*UKAEA* pour l'opération du *JET* et l'autre entre la Commission européenne et les Associations (*JET Implementing Agreement*) pour l'exploitation scientifique et technologique de l'installation.

Aujourd'hui, le futur du *JET* est donc entre les mains du *UKAEA* et des Associations européennes. Sa mission, conduite par le *JET Leader* est essentiellement orientée vers la consolidation des bases scientifiques nécessaires

pour *ITER*. Dans sa nouvelle structure juridique (*EFDA/JET Implementing Agreement*) le *JET* est pleinement intégré dans le programme Fusion de l'UE et étroitement lié aux programmes des Associations. Quatre *Close Support Units* (dont l'une, *Support Science/Technologie*, est conduite par le CRPP) et six *Task Forces* animées par des leaders provenant de diverses Associations (dont le CRPP pour la *Task Force* Magnétohydrodynamique) jouent un rôle crucial dans la préparation du plan de travail du *JET*, dans la préparation et l'exécution des campagnes, dans l'analyse des données et dans la publication des résultats. Le nouveau *JET*, qui pourrait même voir ses performances augmentées, représente un terrain de recherche stimulant pour toute une nouvelle génération de scientifiques.

Les études conduites dans le cadre *Safety and Environmental Assessment of Fusion Power* continuent de confirmer les caractéristiques attractives de la fusion du point de vue de la sécurité et de l'environnement. Sur leur temps de vie, les centrales à fusion généreront des déchets de structure similaires en volume à ceux des réacteurs de fission, mais qualitativement différents par leur radioactivité qui sera beaucoup plus faible. L'utilisation de matériaux à faible activation et recyclables éliminera le besoin de stockage de tout matériel. Après 50 ans, ces matériaux, rendus radioactifs par les réactions de fusion (activation par les neutrons) ont une radiotoxicité plus faible que le charbon. Ainsi, ces déchets de structure ne constitueront pas une charge pour les générations futures.

## Activités suisses

En Suisse, l'année 1999 a été marquée par le départ en retraite de Francis Troyon, Directeur du CRPP et chef de l'Association EURATOM – Confédération Suisse. Ce fut sous sa direction que le CRPP s'est engagé dans les orientations qui ont fait de lui un centre de compétence national de réputation internationale. Des participants, représentants des milieux industriels et des scientifiques venant du monde entier, se sont rassemblés à la fin mars 1999 pour rendre hommage à cet enseignant et à ce chercheur hors pair.

Début juillet 1999, la Suisse a adhéré à l'*EFDA*, qui est venu ainsi compléter le cadre juridique de sa participation à EURATOM.

Tant du point de vue des développements technologiques que des résultats scientifiques, 1999 fut aussi une année riche pour le programme. L'opération du *TCV* a continué sans aucun incident. De nouveaux diagnostics comme un faisceau de particules neutres pour la mesure de température ionique, ont été installés. L'exploitation scientifique du système de chauffage additionnel du *TCV* par onde *cyclotron* électronique (1,5 MW à 82,7 GHz) n'a été ni ralentie ni affectée par la mise hors service d'un des trois *gyrotron*, grâce à l'existence de tubes de rechange, contribuant ainsi au succès de la campagne scientifique. À la fin de 1999, le système de chauffage auxiliaire du *TCV* comporte six *gyrotrons* à 82,7 GHz délivrant une puissance totale de 3 MW au plasma.

Il est prévu de terminer, en 2000, l'installation du chauffage additionnel avec la dernière tranche de 1,5 MW à 118 GHz, dont l'un des trois *gyrotrons* a été formellement accepté en 1999.

Le programme scientifique du *TCV* s'est déroulé selon les lignes prévues dans la stratégie de recherche générale de la Communauté Européenne, à savoir l'étude de la création et le contrôle des plasmas fortement façonnés et de leurs propriétés de confinement. Les études ont porté sur les divers régimes de confinement (mode "L" à faible temps de confinement d'énergie, mode "H" à temps de confinement élevé), la transition du mode L au mode H en régime ohmique et assistée par l'injection d'onde *cyclotron* électronique. Une part importante du programme scientifique a été dédiée à l'étude du chauffage par onde *cyclotron* électronique et à celle de la loi de confinement d'énergie en fonction de la puissance du chauffage et des paramètres de forme. En présence de 1,5 MW de puissance de chauffage, la température électronique s'est élevée au-dessus de 100 millions de degrés. Un autre volet important est l'étude de l'entraînement de courant du *tokamak* par les ondes *cyclotron-électroniques*. Nous avons réussi dans des décharges de *TCV* à maintenir de manière non inductive tout le courant du plasma (dans ces expériences, de l'ordre de 120 kA) pendant 2 s, une durée beaucoup plus longue que toutes les échelles de temps caractéristiques du plasma.

Le développement de **sources RF à haute fréquence** ( $f > 100$  GHz) et à haute puissance pour le chauffage *cyclotron-électronique* des plasmas de fusion a abouti à des résultats importants. Un *gyrotron* à 118 GHz développé en commun par le CRPP, les Associations CEA (F) et FZK (D) et la firme française Thomson Tubes Électroniques a délivré 0,4 MW en impulsion jusqu'à 15,5 s. **L'énergie produite (> 6 MJ) est présentement un record mondial à ce niveau de puissance.** L'extension de la durée d'impulsion est en préparation. Un deuxième *gyrotron* plus performant en puissance (1 MW) et en fréquence (140 GHz) a été développé au sein de la même équipe européenne pour être utilisé sur l'installation allemande *W7-X* de l'Association allemande du *Max Planck Institut für Plasmaphysik*. Ce tube est maintenant prêt pour les premiers tests.

La **théorie** et la **simulation numérique** au CRPP (voir en-tête) ont trois objectifs généraux: premièrement, prédire les limites opérationnelles imposées par les instabilités macroscopiques qui croissent le plus rapidement; deuxièmement, rechercher des configurations de confinement magnétique améliorées; et troisièmement, comprendre ce qui détermine la qualité du confinement et les propriétés de transport dans les *tokamaks* et les *stellarateurs*, propriétés qui sont, selon les théories actuelles, liées à la turbulence créée par les microinstabilités.

- En ce qui concerne le premier de ces trois objectifs, il a été développé, ces dernières années, un ensemble de codes numériques performants qui calculent l'équilibre et la stabilité macroscopique de plasmas ayant une séparatrice magnétique formant soit une configuration *diverteur*, soit un "doublet". Cette année, les études se sont portées principalement sur les *tokamaks* sphériques qui ont démontré des valeurs record de  $\beta$  (rapport de la pression thermique du plasma à la pression magnétique du champ de confinement) dans la machine *START* de l'Association anglaise. Il a été montré que la limite de courant plasma est encore deux fois plus élevée que les valeurs obtenues jusqu'ici dans l'expérience, et que cette limite augmente avec la proximité de la surface du plasma de la séparatrice magnétique. Avoir un fort courant est avantageux, à cause de la loi d'échelle de Troyon qui montre une limite de  $\beta$  proportionnelle au courant. Après optimisation de la forme et des profils, une configuration du type *tokamak* sphérique ayant un  $\beta$  de 63%, stable à la fois pour les modes globaux (*kink*) et les modes locaux ("ballonnement") a été obtenue. Une propriété intéressante de cet équilibre est que pratiquement tout le courant plasma est auto-généré par l'effet dit de *bootstrap*, et de ce fait n'a pas besoin d'être créé par un mécanisme d'induction, comme c'est habituellement le cas dans un *tokamak*.
- Dans le deuxième objectif, il faut mentionner, mis à part plusieurs études d'optimisation de configurations *stellarateurs* tridimensionnelles, une étude portant sur la structure parfois chaotique du champ magnétique et sur ses relations avec le confinement des particules.

En ajoutant une perturbation hélicoïdale à un *tokamak* axisymétrique, les surfaces magnétiques peuvent se partager pour former des chaînes d'îlots séparées par des régions stochastiques, où les particules vont s'échapper rapidement de la configuration. C'est l'idée derrière le concept de *divergeur ergodique*, servant à extraire les particules d'une machine de fusion. Les simulations ont montré qu'une barrière de transport pour les lignes de champ magnétique se forme dans une configuration à cisaillement renversé, et que cette barrière agit pour confiner les particules circulant à l'intérieur. Les simulations montrent aussi que les particules piégées sont très peu affectées par le *divergeur ergodique*: elles quittent le plasma surtout à cause de la modulation du champ créé par les bobines du champ torique. Ce travail a des implications directes pour l'expérience *TEXTOR* de l'Association allemande *Forschung Zentrum Jülich FZJ*.

- Pour le troisième objectif, alors qu'il y a un gros effort au niveau mondial pour modéliser les micro-instabilités dans les *tokamaks*, très peu d'études ont été faites dans ce domaine pour les *stellarateurs*. Cela a motivé le CRPP à entreprendre le développement d'un code de simulation numérique global tridimensionnel applicable à de telles configurations. En première mondiale, le CRPP a produit des simulations de modes *ITG* (*Ion-Temperature-Gradient*) dans des configurations complètement tridimensionnelles. Le code, hautement parallélisé, utilise des équilibres *MHD* obtenus numériquement. Deux séquences de configurations ont été considérées. L'une allant de l'axisymétrie pure à la quasi-axisymétrie, l'autre allant de la symétrie hélicoïdale à une configuration quasi-hélicoïdale à quatre périodes qui est celle d'un *stellarateur* existant, la machine *HSX* du Wisconsin, aux USA. Pour la première fois, il existe un outil qui permettra au CRPP d'examiner les propriétés des modes *ITG* dans des configurations *stellarateurs* réalistes.

L'Association a continué à jouer un rôle extrêmement important dans le développement des **supraconducteurs** pour le projet *ITER*. En utilisant l'installation *SULTAN*, qui est la seule installation au monde pour la mesure des propriétés des supraconducteurs à hauts courants (jusqu'à 100 kA) dans des hauts champs magnétiques (120'000 gauss), une série de tests des *Cable in conduit conductors* (*CICC*) développés par les quatre partenaires d'*ITER* (EU, Japon, Russie et USA) a été terminée dans la première moitié de 1999. Le développement des *CICC* est également un sujet dans lequel le CRPP s'est engagé à travers des études portant sur leur propriété de stabilité en fonction de leur configuration de refroidissement et sur la conception du conducteur lui-même. Ce dernier projet porte sur un nouveau *design* des brins des stabilisateurs de cuivre et peut amener à une réduction du coût du *CICC* jusqu'à 30%. En parallèle aux travaux sur les supraconducteurs à basse température, un développement d'aménages de courant à haute intensité (10 kA) utilisant des supraconducteurs à haute température a été également conclu avec succès.

Les recherches en **matériaux à basse activation** sont l'une des activités importantes de l'Association. Elles ont pour but de développer des matériaux qui, sous le bombardement des neutrons produits par la réaction de fusion, ne s'activent que faiblement et ainsi ne nécessitent qu'un stockage limité à environ une ou deux générations avant leur recyclage. Un deuxième volet est la détermination des propriétés thermomécaniques de ces matériaux sous irradiation. Dans ce type de recherches, l'installation *PIREX* est unique car elle permet de produire dans les matériaux étudiés des bulles d'hélium en grande quantité. Les travaux en 1999, ont porté sur les propriétés, sous irradiation, d'acier à activation réduite, du type ferritique -martensitique, et d'alliage de titane. Nous continuons à participer aux travaux préparatoires concernant une source intense de neutron à 14 MeV (*IFMIF*), source qui permettra de tester les matériaux sélectionnés dans des conditions identiques à celles d'un réacteur. Le CRPP a ainsi accueilli une réunion d'ex-

perts internationaux (EU, Japon, Russie et USA) du Comité exécutif de l'IEA pour discuter des aspects techniques et financiers d'*IFMIF*. Du point de vue recherche, à cause de la limitation du volume à haute fluence dans une installation comme *IFMIF*, nous poursuivons depuis plusieurs années un programme de développement de méthodes de tests mécaniques sur des échantillons de dimension beaucoup plus réduites que ceux utilisés dans des tests de type *ISO*.

Dans le cadre de ses activités, le CRPP collabore avec de nombreux instituts étrangers, tels que: KFA (Jülich), FZK (Karlsruhe) et IPP (Garching), en Allemagne, CEA (Cadarache), en France, IST (Lisbonne), au Portugal, *University of Cork*, en Irlande, *Royal Institute of Technology* (Stockholm), en Suède, JAERI (Naka), au Japon, MIT (Boston) et UCLA (Los Angeles), aux USA, Kurtchatov et Keldysch (Moscou), en Russie, Académie des Sciences (Prague), en République Tchèque, etc.

## Buts et résultats du projet financé par l'OFEN

Le soutien financier de l'OFEN a été apporté, en 1999, aux recherches du groupe de l'Université de Bâle sur le conditionnement des parois de réacteur de fusion.

### SURFACE STUDIES RELATED TO FUSION REACTOR MATERIAL

Avec ce projet, qui a démarré en 1997, l'Université de Bâle poursuit ses activités sur le conditionnement des parois de réacteur de fusion. Cette étude des propriétés de différents types de couches minces montrera tout leur intérêt comme revêtement de la paroi interne 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. De plus, ce groupe poursuit le développement de techniques pour la déposition de ces films sur différents substrats.

En 1999, les expériences ont porté sur les propriétés et la réactivité de films de carbone contenant des métaux alcalins (Li, Na) avec différentes microstructures. Pour les réaliser, le groupe de Bâle utilise la spectroscopie photoélectronique en régime UV et X. La déposition de films de carbone, puis leur traitement, avec de l'oxygène moléculaire ou ionique et avec de l'hydrogène atomique (généré *in situ*, ce qui implique un dispositif spécial), sont réalisés dans des conditions de vide extrême. Quant aux matrices de carbone, elles sont déposées par

évaporation de graphite, à l'aide d'un faisceau d'électrons, et la microstructure du film est déterminée par la température du substrat. Différents environnements sont distinguables et directement reliés à la microstructure de la matrice de carbone. La réaction des films avec l'oxygène conduit à une accumulation d'oxydes alcalins à la surface de ces films, ainsi qu'à une diminution des fonction de travail de l'échantillon. Il a été aussi observé que l'exposition à l'air de films composés de métaux alcalins et de carbone produit la formation de carbonate.

Parmi d'autres travaux réalisés au cours de cette année, on peut mentionner encore l'amélioration considérable des installations expérimentales au niveau de la manipulation des échantillons et de leur transfert dans des conditions de vide extrême ( $10^{-10}$  hPa).

Pour 2000, le projet mentionné arrive à son terme, néanmoins une partie de ce travail va se poursuivre dans le cadre d'une thèse. Cependant, une nouvelle phase est proposée dans le cadre des projets OFEN. Celle-ci concerne l'analyse de nouveaux matériaux (ayant un nombre atomique  $Z$  élevé) contenant des métaux alcalins. Ces matériaux à  $Z$  élevé retiennent une attention plus particulière du fait de leur faible taux d'érosion qui les rend attractif pour certaines parties des futures installations de recherche en fusion.

**Collaboration:** CRPP/EPFL, *Philips Research Laboratories* (Aachen/D, Eindhoven/NL), *Max Planck Institut für Plasmaphysik* (Garching/D).

## Liste des projets

- [1] M. Töwe, P. Reinke et P. Oelhafen,, INST.F.Physik/Uni-Basel: *Surface Studies related to Fusion Reactor Material* (rapport 1999 disponible).

## Quelques sites Internet sur la fusion

- [2] Site du CRPP: <http://crppwww.epfl.ch/crppfusion> et <http://crppwww.epfl.ch/crppabout>  
[3] Site de l'Université de Bâle: <http://monet.unibas.ch/oelhafen/>  
[4] Site du *JET*: <http://www.jet.org>  
[5] Site du projet *ITER*: <http://www.iter.org>  
[6] Site de la Commission européenne DG recherche: [http://europa.eu.int/comm/dgs/research/index\\_fr.html](http://europa.eu.int/comm/dgs/research/index_fr.html)

## PILES À COMBUSTIBLE & ACCUMULATEURS

Rapport de synthèse  
sur les activités 1999 du programme de recherche

**Léo Dubal**

[leo.dubal@bfe.admin.ch](mailto:leo.dubal@bfe.admin.ch)

---



**Place à la pile portable .....**

.....mais après usage, la prudence exige de l'emporter avec soi! À Yverdon - même sans EXPO.01 - des embarcations lacustres à propulsion électrique sont alimentées par piles à combustible. Ici, un bateau de MW-Line, équipé de la pile de 1.5 kW développée au PSI, est arrivé à bon port. (Photo: Dubal / 30.9.1999)

## Avertissement au lecteur

Ce rapport ne peut être consulté intégralement que sur Internet: seuls ses **hyper liens** "bleus soulignés" déclenchent (par "*click souris*") le téléchargement des rapports annuels [1999](#) des projets du programme, des références électroniques, et des rapports de synthèse [1997](#) et [1998](#).

## Introduction

Le Programme **Piles à combustible & Accumulateurs** a coordonné pendant douze ans l'ensemble des activités suisses de ce domaine autour d'une stratégie cohérente et intégrée dans la collaboration avec les Communautés européennes. Par ailleurs, en anticipant les restructurations en cours à l'OFEN, les résultats des mandats de recherche présentés ici sont groupés en trois domaines:

- a) **les piles au gaz naturel & aux bio-combustibles reformés**, pour les installations stationnaires & portables,
- b) **les piles à hydrogène pur** pour les applications "exotiques" et de démonstration,
- c) **les accumulateurs, chargeurs intelligents & supercondensateurs** pour les applications mobiles.

*Le soutien subsidiaire de l'OFEN* à la recherche en matière de générateurs électrochimiques est modeste et se limite aux types les plus prometteurs pour la politique énergétique suisse.

Il s'ensuit que le soutien financier de la Commission pour la Technologie & l'Innovation (CTI), des trois fondations pour la recherche énergétique PSEL (Fonds pour projets et études de l'économie électrique), FOGA (Fonds de recherche de l'industrie gazière suisse), et FRUP (Fonds de recherche de l'Union Pétrolière), ainsi que du Programme Prioritaire Matériaux (PPM) du Conseil des Écoles Polytechniques, et de l'OFES pour la participation suisse aux programmes européens constitue un ensemble de contributions essentielles à l'émergence de ces technologies sur le marché.

## État de la technique & collaboration internationale

♥ *Ce survol du domaine reste volontairement hors du cadre strict des mandats pour l'année 1999.*

Un **générateur électrochimique** est un appareil convertissant directement l'énergie chimique en électricité. On distingue d'ordinaire *accumulateurs* et *piles à combustible*.

Dans les *accumulateurs*, l'anode est rechargée, en inversant le sens du courant.

Dans les *piles à combustible*, l'anode "P" doit être constamment alimentée: elle est placée dans l'enceinte du combustible. L'électrode négative "N", elle, est côté air, alors que l'électrolyte "E" sépare, de manière étanche, les deux enceintes combustible & air.

Pour former le module répétitif d'une pile, les cellules électrochimiques élémentaires "PEN" sont mises en série: soit sur un même support mécanique, soit par empilement des supports (et des deux enceintes) distincts.

Les deux modes de mise en série ont été explorés, aussi bien dans la géométrie tubulaire ("*bell & spigot*" et "*éprouvette*") que dans la géométrie plane ("*mosaïque*" et "*Cédérom*").

À la Conférence de Pavie, commémorant le 200<sup>ème</sup> anniversaire de la découverte de la pile par VOLTA, nous avons réexaminé ces divers [compromis](#) entre efficacité et coût de production.

### PILES À COMBUSTIBLE

Qu'il suffise qu'un Bill GATES déclare posséder 5% des actions d'[AVISTA](#) et ce titre monte le même jour de 30%. Ceci laisse présager des surprises à venir ! La Conférence de Lucerne, fin juin, sur les "*Portable Fuel Cells*" a permis de dévoiler l'intense [activité](#) de développement des applications dans la gamme de puissance du W au kW. Les *laptops* et téléphones cellulaires apparaissent comme le premier marché de masse visé.

*Le choix et la qualité du combustible* dépendent de la température d'opération de la pile à combustible, c'est-à-dire de son type d'électrolyte:

1) **Les piles à électrolyte céramique**, dites [SOFC](#) (*Solid Oxide Fuel Cells*), en sont au stade de l'installation pilote. Dans la gamme du kW<sub>el</sub>, [SULZER HEXIS](#) lancera - en pionnier - sur le marché dès 2001 une série d'unités prototypes intégrées à une chaudière à gaz de 10 kW<sub>th</sub>. La commercialisation est prévue pour 2004.

Ces piles fonctionnent à partir de **700 °C**, sans nécessiter de catalyseur "noble", susceptible d'empoisonnement. Un reformage partiel et intégré du combustible, même riche en CO (gaz naturel, biogaz, mazout), est suffisant.

Alors que SULZER HEXIS vise, avec ses éléments modulaires type "Cédérom", le marché "chaleur-force domestique", ROLLS ROYCE développe un module type "mosaïque" pour les grosses installations.

L'EPFL participe, elle, à une collaboration [européenne](#) sur les matériaux pour piles céramiques à coût modéré, et SULZER HEXIS participe à deux projets européens, un sur les piles à [température intermédiaire](#), et un sur les piles avec [reformeur POX](#) pour le gaz naturel.

**2) Les piles à électrolyte d'acide phosphorique**, dites *PAFC* (*Phosphoric Acid Fuel Cells*), sont déjà commercialisées dans la gamme des 200 kW<sub>el</sub>. Elles sont les seules piles au gaz naturel pour lesquelles une durée de vie de 40'000 heures a été démontrée, entre autres [à Genève](#).

Ces piles fonctionnent aux environs de 200 °C. Elles nécessitent donc un catalyseur de Pt, qui, lui, requiert un reformage poussé. Avec plusieurs centaines d'unités en opération, leur prix - le triple de celui d'une installation classique - reste l'obstacle principal à leur entrée sur la scène énergétique. L'utilisation du *biogaz* dans une PAFC exige une installation de purification supplémentaire, entraînant un surcoût dissuasif.

**3) Les piles à électrolyte polymère**, dites *PEFC* (*Polymer Electrolyte Fuel Cells*), sont en voie de commercialisation. VAILLANT projette de lancer en 2001 - tout comme HEXIS avec ses piles SOFC - une série d'unités prototypes de piles PEFC de 1 kW<sub>el</sub>, combinées avec une chaudière au *gaz naturel*.

Ces piles, fonctionnant au dessous de 85°C, nécessitent un catalyseur Pu/Ru et un combustible hautement reformé (hydrogène "pur", avec une contamination maximum de 10 ppm de CO). Si un tel reformage peut être effectué économiquement à l'échelle du kW, il reste, bien sûr, à démontrer !

Dans la gamme de puissance des 250 kW<sub>el</sub>, BALLARD, à Vancouver, a livré à un client américain une installation dotée d'un délicat reformeur pour le *gaz naturel*. [EBM](#), à Münchenstein, est sur la liste d'attente de GEC-ALSTOM, le partenaire européen de BALLARD. Avec une durée de vie encore inconnue et un prix de lancement "peu abordable", cette pile ne constitue pas, actuellement, un concurrent à la PAFC PC25C d'ONSI.

La fabrication de *stacks* PEFC à coût modéré pour les applications mobiles a fait l'objet d'une collaboration [européenne](#), à laquelle a participé le PSI. Grâce, entre autres, aux membranes aromatiques d'AVENTIS, un coût unitaire inférieur à 100 CHF / kW<sub>el</sub> apparaît comme réaliste. Il faut cependant relever que la gestion du combustible à bord du véhicule (stockage d'Hydrogène ou reformage d'hydrocarbures) à un coût acceptable menace d'être le "*killing factor*" de ces efforts de recherche.

Dans la gamme de puissance des 75 kW<sub>el</sub>, BALLARD est parvenu à intégrer sa pile H<sub>2</sub>/air jusqu'à une puissance volumique de 1,3 kW/litre. Démarrant par - 25°C, cette pile satisfait une condition-clé de l'industrie automobile, mais occulte la question du combustible.

Dans sa version au *méthanol reformé*, la puissance tombe au dessous de la barre de 1 kW/litre.

OPEL alimente, elle, la pile de 55 kW de sa ZAFIRA avec un réservoir d'H<sub>2</sub> liquide, à -253 °C. Cette

stratégie élude, bien sûr, le problème de la contamination en CO.

Pour les applications portables, le *breakthrough* que pourrait représenter le stockage d'*hydrogène* dans des nanostructures de carbone dûment dopé fut au centre des débats, lors du [Workshop](#) du 21 juin, à Horw. D'autre part, dans la gamme de puissance de 1 à 1000 W, les *bio-combustibles*, en particulier le mélange 1:10 méthanol/eau, offrent une alternative plus "ergonomique" que l'*hydrogène*. On parle dans ce cas, de *DMFC* (*Direct Méthanol Fuel Cells*).

## ACCUMULATEURS

**1) Les accumulateurs "nickel-hydrures métalliques"** font l'objet d'une collaboration [européenne](#) visant à améliorer leur cinétique. Y participent l'UNI-Fribourg et LECLANCHÉ, à Yverdon [35].

**2) Les accumulateurs "sodium-chlorure de nickel"** ZEBRA dont les excellentes performances avaient été démontrées dans les *Wiler Stadtbuss*, sont désormais en production chez MES, à Stabio.

**3) Les accumulateurs "zinc-air"** font l'objet d'une collaboration [européenne](#); le PSI y participe activement.

**4) Les accumulateurs "ions-lithium"**: en attendant un "*scaling-up*" pour le transport, ils s'imposent sur le marché du portable. RENATA, à Itingen développe un module pour les Natels, alors que XOLIOX, à Ecublens développe un module pour les aides auditives.

**5) Les supercondensateurs** constituent le partenaire "haute-puissance" des accumulateurs classiques au Pb ou autres. [MONTENA](#), à Rossens, s'est engagé résolument, début 1998, dans le développement et la production des "*Boostcaps*". Le 10 juin 1999, elle organisait une conférence internationale et y conviait tous ses concurrents.

L'électronique de puissance pour la gestion des supercondensateurs, développée il y a 6 ans à la [HTA-Luzern](#) pour son véhicule hybride *Blue-Angel*, devient - dans le cadre d'une collaboration avec SCHINDLER-Aufzüge - l'objet d'un transfert de technologie très prometteur à un champs d'application aux transports.

À l'EPFL, une solution a été trouvée à l'égalisation de la charge des *Boostcaps*, alors que leur couplage à un accumulateur pour le démarrage d'un véhicule a fait l'objet d'un travail de diplôme à la HES-Bienne.

## COLLABORATIONS INTERNATIONALES

Au vu des six projets européens hyper-liés, la participation suisse aux programmes communautaires doit être taxée de fructueuse. En ce qui concerne la collaboration, sous l'égide de l'AIE, on note un essoufflement; les contacts directs prennent la relève. L'échange d'information de première main reste cependant incontournable.

## Buts visés pour 1999

### a) Piles au gaz naturel & aux bio-combustibles

- 1) établir le rapport coût/performance des procédés de fabrication d'un électrolyte céramique mince.
- 2) développer une anode performante, compatible avec HEXIS, et capable d'opérer à moins de 800 °C.
- 3) promouvoir l'installation des piles commerciales de 200 kW au gaz naturel.

### b) Piles à l'hydrogène pur

- 1) tester les membranes aromatiques d'AVENTIS.
- 2) améliorer l'ergonomie des *Powerpack* de 100 W et tester un trimaran équipé d'un *Powerpack* de 300 W;
- 3) équiper & tester une embarcation lacustre électrique pour 4 passagers de [MW-Line](#) avec une pile de 2 kW.

4) adapter des petites piles (20 W) pour l'enseignement dans les écoles techniques & secondaires des trois régions linguistiques et récolter les premières expériences avec les élèves.

### c) Accumulateurs & chargeurs intelligents

- 1) quantifier l'influence d'un *chargeur intelligent* sur la durée de vie des accumulateurs de voitures électriques.
- 2) démontrer, sur un minibus électrique, les performances du concept de charge par biberonnage de *supercondensateurs* (charge continue du module stationnaire/ recharge rapide du module mobile).
- 3) développer pour les *accumulateurs ions-lithium* des électrodes d'insertion mésoporeuses & des électrolytes sûrs
- 4) démontrer, sur un modèle fonctionnel de 10 Ah, le concept 3S (*Safe, Swiss, Scale-up*).

## Travaux effectués & résultats obtenus

### a) PILES AU GAZ NATUREL

#### 1) Consortium "LowCost SOFC"

Ce Consortium [1] a été coordonné par [SULZER Innotec](#); y ont participé l'[EPF-Lausanne](#), l'[ETH-Zürich](#), et l'[EMPA-Thun](#). Il a comparé les coûts de fabrication à grande échelle de couches minces sur substrat poreux (pour une production de ¼ de million de pièces par an) par divers procédés, à savoir: [VPS](#) (*Vacuum Plasma Spray*), LPPS (*Low Pressure Plasma Spray*), PVD (*Physical Vapour Deposition*), AED (*Aerosol Electrostatic Deposition*).

De cette étude, il ressort qu'il suffit de *moins de dix jours d'opération pour rembourser l'énergie grise*. En termes financiers, la différence entre procédés est mince, car la part des coûts incompressibles, en personnel et en poudre, approche déjà 60% du total. Il est donc essentiel de choisir le procédé permettant d'obtenir les performances les plus élevées.

À partir de 250 mW/cm<sup>2</sup>, un coût de fabrication de **1'000 CHF/kWh** est réalisable, soit 30% de moins que l'état actuel de la technique. Preuve à l'appui: sur un *mini-stack* alimenté en méthane reformé, des électrolytes PVD d'une épaisseur de 5 µm ont permis de réduire la température à 710 °C, tout en conservant une puissance surfacique de 250 mW/cm<sup>2</sup>. L'efficacité de conversion en électricité était de 45%.

Le procédé AED n'a pas pu être amené à produire des éléments de la taille HEXIS (100 cm<sup>2</sup>). Son potentiel reste donc à démontrer. *Last but not least*, le diagnostic électrochimique des PEN suggère la possibilité de se passer de reformeur.

#### 2) Consortium "Anode for SOFC"

Ce Consortium [2] a été coordonné par l'EMPA-Dübendorf; y ont participé l'EPF-Lausanne & l'ETH-Zürich. L'EMPA a évalué diverses techniques de fabrication de substrats céramiques poreux, pour l'anode. L'EPFL a étudié le comportement non-linéaire de la résistance électrique des électrolytes minces, de la taille de la microstructure de l'anode, et comparé les effets catalytiques de la composition de l'anode sur la chimie du *fuel*. L'ETHZ a modélisé et validé la dépendance de l'étendue de la zone de réaction anodique et étudié l'influence, sur l'impédance, des pressions partielles H<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O.

#### 3) Collectif "Chaleur-force au gaz naturel"

Le projet d'AEB, à Birsfelden [3], intégrant une pile ONSI PC25C à un chauffage de quartier, approche de la réalisation (voir p. 22-8). Cette installation bénéficie d'un subside du Département américain de la Défense, correspondant à 0,04 CHF/kWh.

### b) PILES À HYDROGÈNE PUR

#### 1) Membranes aromatiques

La [HES-Granges](#) a testé diverses PEN, mises à disposition par AVENTIS [4]. Ces PEN comportaient une membrane aromatique de 110 cm<sup>2</sup> de surface, de 20 à 40 µm d'épaisseur, une charge symétrique de catalyseur et deux diffuseurs. Dans l'ensemble, la durée de vie et les performances obtenues à Granges sont nettement inférieures à celles obtenues à l'étranger par d'autres chercheurs. Le contrôle de qualité de ces nouvelles membranes n'est donc pas encore satisfaisant.

## 2) Consortium "Hydroxy"

Ce Consortium [5] a regroupé l'EIVD-Yverdon et le SILSE-Lausanne. L'EIVD a équipé d'un *Powerpack* de 300 W @ 12 V<sub>DC</sub> H<sub>2</sub>/air l'*Hydroxy300*, un trimaran de MW-Line. Grâce à son profil, la vitesse de croisière est de 12 km/h avec deux passagers à bord. Le *Powerpack* avait été développé au PSI et construit à la HES-Granges, dans la période 97-98.



Démonstration au solstice d'été, à Hergiswil

Les [SIL](#) ont, eux, amélioré l'ergonomie du contrôle des pédalos, équipés d'une pile PEFC H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> de 100 W.

## 3) Consortium "Alpha"

Ce Consortium [6] a regroupé le PSI, à Villigen, et MW-Line, à Yverdon. Le [PSI](#) a rendu opérationnel sa pile H<sub>2</sub>/air, qui délivre une puissance de 1,5 kW. Il l'a installée dans une embarcation lacustre électrique 4-places, type "α" de [MW-Line](#).

Projet originellement conçu pour l'EXPO.01, c'est le jour du retrait de celle-ci que le Consortium a organisé pour la presse une démonstration couronnée de succès (*voir en-tête*).

## 4) Enseignement

Les petites piles de 20 W d'[U. BOSSEL](#), à Oberrohrdorf, ont été adaptées aux besoins de l'enseignement [7], en particulier l'aspect ergonomique (voltmètre, lampe halogène 12 V, hydrogène en minicylindres d'hydrures métalliques). Malgré les retards dans la livraison des PEN par GORE, les six écoles techniques et secondaires sélectionnées (à Baden, Lausanne et Lugano) ont cependant reçu l'équipement; mais la récolte des premières expériences avec les élèves est reportée de quelques mois.

### c) ACCUMULATEURS

#### 1) Consortium "VEBILA" (*Verbesserung der Lebensdauer v. Batterien mit einem intelligenten Ladegeräte*)

Le Consortium VEBILA [8] s'est maintenant associé avec la commune de Wohlen. Coordonné par la [HES-Bienne](#), il a adopté, après le retrait de GLUR, à Münsingen, le chargeur intelligent 15 A @ 12 V de PRIMEPOWER, en Suède.

Une durée de vie de 7'500 km a été mesurée pour un accumulateur HAWKER-GENESIS sur une Mini-El.

#### 2) Consortium "TOHYCO" (*TOtal HYbrid-Electric Concept*)

Ce Consortium [9] est coordonné par la [HTA-Luzern](#), et regroupe MONTENA, à Rossens, l'AfU-Luzern, BUSINESS, à Schaffhouse, BPS, à Luzern, WAMPFLER, à Weil, RHEINTALBus, PASOL, à Titterten et EARTH, à Thalwil.

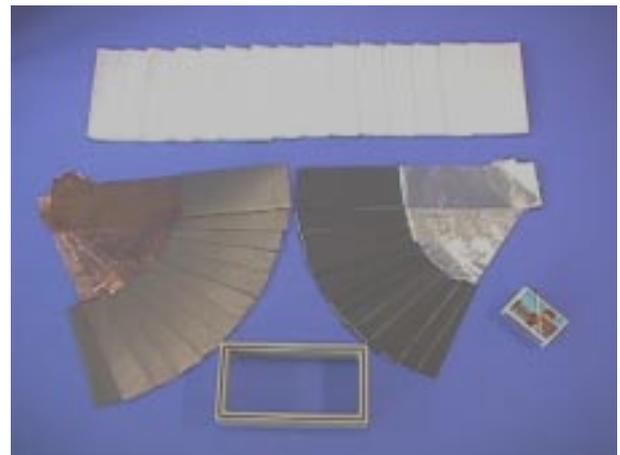
Le projet pilote est la mise en service d'un mini-bus à supercondensateurs sur la base du concept de charge par *biberonnage*, concept conçu et démontré par l'HTA-Luzern. Le bus attend d'être équipé. MONTENA va lancer la production des supercondensateurs.

#### 3) Consortium "3S"

Le Consortium 3S (*Swiss, Safety, Scale-up*) [10] a été coordonné par le PSI, à Villigen; y ont participé : l'IIC/ETHZ, l'ITP & le LPI/[EPF-Lausanne](#), l'[UNI-Genève](#), l'[UNI-Fribourg](#), RUETSCHI à Grandson, TIMCAL, à Sins, RENATA, à Itingen, XOLIOX, à Eublens.

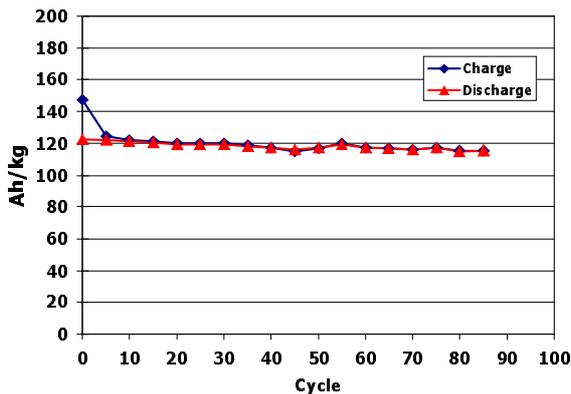
Son but stratégique a été la démonstration d'un accumulateur ion-lithium sûr et économique, basé sur du savoir-faire suisse et adapté aux véhicules électriques. Constatons que ce but est encore loin d'être atteint.

Paul [Rüetschi](#), qui a assumé l'accompagnement du projet, constate que, bien que le [PSI](#) ait réussi un *scaling-up* à 1500 cm<sup>2</sup> d'une **capacité de 12 Ah**, il l'a fait avec des composants commerciaux uniquement (graphite & LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), sans utiliser aucun des nouveaux matériaux développés par ses partenaires: la masse des échantillons mise à la disposition du PSI, ne dépassait guère le gramme, alors que 100 fois plus aurait été nécessaire.



Les 1500 cm<sup>2</sup> d'électrodes du PSI

L'énergie massique de la batterie n'est que de 50 Wh/kg, mais le double serait possible avec un boîtier moins massif et des séparateurs plus minces. La perte de capacité est de 16% lors du 1<sup>er</sup> cycle, mais se stabilise à 0.2% après 15 cycles.



À propos de "stabilité", il faut mentionner ici le *breakthrough* de l'[ETHZ](#) : la synthèse d'un alliage contenant de l'aluminium :



Il apparaît comme la matériau miracle pour la cathode des accumulateurs ions-lithium à haute-énergie!

Détrônera-t-il l'oxyde de cobalt, choisi par SONY malgré son prix, sa toxicité et son énergie massique trop basse ?

## Transfert à la pratique

L'exécution des projets dans un cadre consortial assure le transfert à la pratique du savoir-faire acquis. L'impact industriel est particulièrement visible dans les secteurs des piles au gaz naturel (SULZER HEXIS), des

supercondensateurs (MONTENA COMPONENTS & SCHINDLER AUFZÜGE) et des accumulateurs ions-lithium chez RENATA et XOLIOX.

## Évaluation 1999

Grâce à une organisation consortiale efficace, il est maintenant démontré que même un petit pays, avec des moyens limités, mais unissant ses ressources multiculturelles, et ciblant soigneusement ses objectifs de recherche, peut devenir très compétitif.

1) Dans le secteur des **piles au gaz naturel & aux bio-combustibles**, l'originalité de la démarche suisse a permis d'établir le bilan d'énergie grise et la transparence des coûts de production. Cette maîtrise technologique stimule, entre autre, l'exploration de l'utilisation du **biogaz**.

Pour les piles basse-température, dont sont, par ex., équipées des embarcations lacustres électriques, l'alimentation en hydrogène s'avère onéreuse et peu

ergonomique, aussi le mélange **méthanol / eau** apparaît comme le combustible de substitution.

2) Dans le secteur des **piles à hydrogène**, le trimaran Hydroxy300 – avec son *mini-Powerpack* de 300 watts - a démontré les limites de l'*utilisation rationnelle de l'hydrogène*: cette application est tributaire du développement d'un stockage plus ergonomique

3) Dans le secteur des **super-condensateurs**, la multiplication des collaborations, visant à tirer profit de cette nouvelle technologie, est réjouissante.

4) Dans le secteur des **accumulateurs ions-lithium**, l'impact d'une activité de recherche, somme toute modeste, sur l'activité industrielle, est éloquent.

## Perspectives 2000

### a) Piles au gaz naturel & aux bio-combustibles

1) Etudier le comportement d'un *stack* "PVD" de 1 kW HEXIS et alimenté en biogaz (d'une STEP).

2) Analyser la composition des gaz dans l'enceinte anodique d'une PEN-CD "PVD" (*benchmarking*), et développer un distributeur de gaz performant.

3) Poursuivre le développement du procédé "AED" (*Aerosol Electrostatic Deposition*) pour la fabrication économique d'une PEN-CD, avec un électrolyte de 5µm et une anode poreuse.

4) Promouvoir l'installation des piles "PAFC" de 200 kW au gaz naturel.

5) Etudier, à titre exploratoire, le comportement d'une PEN "DMFC" pour un mélange 0.1 CH<sub>3</sub>OH / 0.9 H<sub>2</sub>O, en vue d'application à une navette lacustre.

### b) Piles à hydrogène

- 1) Poursuite des tests sur les membranes "aromatiques" et essai d'intégration dans un *Powerpack* de 100 W comme objet de démonstration pour les étudiants.
- 2) Transfert du savoir-faire en maintenance des *Powerpacks* vers les HES le désirant.
- 3) Utilisation "exotique" des *Powerpacks*: dégivrage des miroirs aux carrefours des routes secondaires.
- 4) Exploration de l'intégration à l'anode d'un réservoir-tampon d'hydrogène constitué de nanostructures de carbone dopé.
- 5) Evaluation du Programme éducatif pilote, dans les écoles professionnelles (TP des apprentis électriciens).

### c) Accumulateurs et chargeurs intelligents

- 1) Poursuite de l'évaluation de l'influence des chargeurs intelligents sur la durée de vie des accumulateurs.
- 2) Mise en opération d'un minibus équipé de supercondensateurs alimentés par biberonnage.
- 3) Création d'un réseau de promoteurs d'applications des supercondensateurs.
- 4) Démonstration des performances de l'alliage "3S" de l'ETHZ dans un modèle fonctionnel d'accumulateur ions-lithium d'au-moins 20 Ah.

## Liste des projets

### PILES AU GAZ NATUREL & AUX BIO-COMBUSTIBLES

- [1] **Consortium "Low Cost SOFC"**  
K. Honegger, [SULZER Innotec-Ob.Winterthur](#), A. McEvoy, [EPF-Lausanne](#), L. Gauckler, [ETH-Zürich](#), K. Barthel, [EMPA-Thun](#)
- [2] **Consortium "Anode for SOFC"**  
B. Gut & al.: [EMPA-Dübendorf](#), A. McEvoy et al: [EPF-Lausanne](#), L. Gauckler & al.:[ETH-Zürich](#)
- [3] **"Nahwärmeversorgung mit Brennstoffzelle Typ ONSI PC 25C in Birsfelden"**  
S. Renz : [THOMA+RENZ-Basel](#)

### PILES À HYDROGÈNE

- [4] **"Small PEFC PowerPacks Family"**  
I. Popelis, [HTA-Grenchen](#)
- [5] **Consortium "HYDROXY"**  
F. Affolter & al.: [EIVD-Yverdon](#) & P. Favre & al.: [SILSE-Lausanne](#)
- [6] **Consortium "ALPHA"**  
F.N. Büchi et al.: [PSI-Villigen](#) & M. Wüst et al: [MW-Line-Yverdon](#)
- [7] **"Demonstration des Brennstoffzelle in Gymnasien und Berufsschulen"**  
U. [BOSSEL](#) - *Oberrohrdorf*:

### ACCUMULATEURS & SUPERCONDENSATEURS

- [8] **Konsortium "VEBILA"** (Verbesserung der Lebensdauer von Batterien mit einem intelligenten Ladegerät)  
K. Meier-Engel, et al.: [HTA-Biel](#)
- [9] **Konsortium "TOHYCO"**  
V. Härrli, et al.: [HTA-Horw](#)
- [10] **Consortium "3S"** (Swiss, Safety, Scale-up)  
P. Novák & al.: [PSI – Villigen](#), R. Nesper & al.: [ETH-Zürich](#), H. Hofmann & al.: [EPF-Lausanne](#), J. Augustynski & al.: [UNI-Genève](#), C. Daul & al.: [UNI-Fribourg](#), P. [Ruetschi](#)- Grandson.

## Postface

Avec la pose sur sol helvétique de la première pile à caractère commercial, en présence des représentants d'*Alternative-Energie-Birsfelden*, le chef de programme tire sa révérence...



### Retour dans le futur

Coordonnées: N 47°33'19"/ E 7°37'22"/ 2000/ 03 / 16 / 10:59 (Photo: M. Rügsegger)

## VERKEHR

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1999

**Martin Pulfer**

[martin.pulfer@bfe.admin.ch](mailto:martin.pulfer@bfe.admin.ch)

---



### **Psst ! Pedelec rollt**

Trendig und wendig, sparsam und leise – das komfortable Elektrobike New Flyer der Firma [BKTECH](#), Kirchberg. Besonders geeignet als ein zeitsparendes Nahverkehrsmittel für Pendler.

## Programmübersicht und Programmziele

Der BFE-Bereich Verkehr mit seinen Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogrammen untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem Individualverkehr. Zusatzziele und Themen, die bei der Ausrichtung der Programme berücksichtigt werden, sind Reduktion der Umweltbelastung, Industriestandort Schweiz, Chancen für Bildung und Wissenschaft. Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr kann dabei vor allem mit folgenden Ansätzen erschlossen werden:

- Leichtere Fahrzeuge,
- Kleinere Fahrzeuge und Karosserien,
- Effizientere Antriebsketten,
- Wahl des Verkehrsmittels, kombinierter Verkehr
- Fahrverhalten (Eco Drive),

- Strukturänderungen, die das Mobilitätsbedürfnis verringern.

Die Automobilindustrie setzte im Berichtsjahr die ersten drei Ansätze erfolgreich in Fahrzeugmodelle um, die gegenüber früheren Fahrzeuggenerationen wesentlich sparsamer sind. Beispiele, die bereits, bzw. unmittelbar bevorstehend, auf dem Schweizer Fahrzeugmarkt angeboten werden, sind:

Marke	Name	Masse (kg)	Plätze	Antriebskonzept	Treibstoff	Verbrauch pro 100km
VW	Lupo 3.0	830	4	Diesel	Diesel	3,01
Audi	A2	825	4	Diesel	Diesel	3,01
Toyota	Prius	1240	4	Parallelhybrid	Benzin	ca. 5.1
Honda	Insight	830	2	Parallelhybrid	Benzin	ca. 3.1
MCC	Smart	720	2	Diesel	Diesel	ca. 3.1
Renault	Kangoo	ca. 1300	5	Serienhybrid	Elektro / Benzin	ca. 3.1

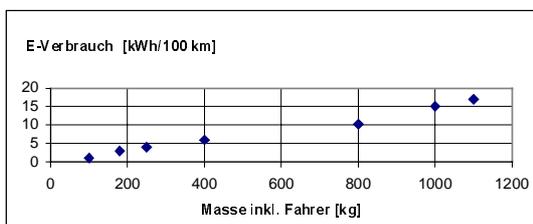
## Forschung

### LEICHTBAU

Das 1995 gestartete Projekt **Modultec – Modultechnologien für Leichtmobile** [1] der beiden Partnerfirmen [Horlacher](#) und [Esoro](#) wurde in Zusammenarbeit mit den entsprechenden Zulieferfirmen der Autoindustrie fortgesetzt. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer selbsttragenden Kunststoffkarosserie, die bezogen auf einen Kleinwagen ca. 200 kg leichter ist als die entsprechende herkömmliche Konstruktion. Dabei übernehmen die einzelnen Module, wie z.B. die Bodenplatte, Aufgaben zur Energieverteilung im Fahrzeug, Belüftung, Komfortfunktionen und natürlich für die strukturelle Sicherheit. Zusätzliche Kanäle für Belüftung und Elektrik müssen nicht mehr verlegt werden. Verfahrenstechnisch ist die Wahl des optimalen Kunststoffes von grösster Bedeutung, insbesondere hinsichtlich der Sicherheit (inkl. des Brennverhaltens) und des künftigen Recyclings bzw. der Entsorgung.

Für das Jahr 2000 ist die Herstellung weiterer charakteristischer Bauteile, teilweise bereits in Kleinstserie, geplant. Das Resultat werden einbaubereite, aussen lackierte und innen mit Stoff laminierte Module sein. Im gleichen Jahr ist die weitere Industrialisierung des Verfahrens in Kleinserien vorgesehen.

Die nachfolgende Grafik zeigt, am Beispiel des Elektroantriebs, die hohe Bedeutung einer leichten Fahrzeugkonstruktion (Messresultate der HTA Bern Biel).



Trotz grossen Unterschieden bezüglich Stirnfläche, Form und erreichbarer Maximalgeschwindigkeit korrelieren die Werte sehr gut. Das Diagramm zeigt auch die mögliche Bedeutung eines komfortablen Leichtfahrzeugs auf, wenn man bedenkt, dass die Autos in der Schweiz vielfach nur als Nahverkehrsmittel mit Fahrdistanzen unter 10 km genutzt werden.

### EFFIZIENTE ANTRIEBE

Im Zentrum der Anstrengungen stand im Berichtsjahr das Projekt **PALOS** [2] der ETH-Zürich, das am Beispiel eines kleinen aufgeladenen Benzinmotors folgende Hauptziele verfolgte:

- Realisieren theoretischer Arbeiten bezüglich Motor, Antriebsstrang, Emissionen und gezielter 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 Nebenggregate,
- Modellierung und erste Ansätze einer optimalen Regelung eines Antriebsstrangs 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:

- Ein neuartiger Ansatz zur Steuerung / Regelung des Kühlsystems eines DSC-Motors wurde entwickelt
- Die Validierung des Druckwellenladermodells er-

brachte eine sehr gute Übereinstimmung. Da das Modell einfacher als alle bisher bekannten Ansätze ist, ist es damit in der Regelungstechnik sehr gut anwendbar

- Lösung der Optimierungsaufgabe für das CVT-Steuerungsproblem

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind mit diversen Publikationen veröffentlicht worden.

## MOBILITÄTSVERHALTEN

Im Rahmen des NFP 41, Verkehr und Umwelt, wurden 2 Projekte vom BFE mit unterstützt:

Metron Brugg untersuchte **autofreie Haushalte** [3]. Die Studie besteht aus einer Auswertung des Mikrozensus Verkehrsverhalten 1994, einer Befragung von 300 Haushalten in Basel, Bern und Zürich sowie der Entwicklung von Massnahmen zur Beeinflussung der Lebens- und Ausbreitungsbedingungen für autofreie Haushalte. Jeder vierte Haushalt in der Schweiz verfügt über kein Auto. Der Anteil autofreier Haushalte ist in hohem Mass vom Urbanitätsgrad und von der Haushaltgrösse abhängig. In grossen Städten mit einem hohen Anteil von Single-Haushalten beträgt er bis über 50%. Zwei Drittel haben das Leben ohne Auto freiwillig gewählt, lediglich 20% sind aus finanziellen, gesundheitlichen oder anderen Gründen zur Autofreiheit gezwungen.

In einem weiteren Projekt des NFP 41, **Strategien und Massnahmen für den Freizeitverkehr** [4], wird der Schluss gezogen, dass der Freizeitverkehr bisher deutlich unterschätzt wurde. Mit einem Anteil von 60% an der Verkehrsleistung ist er der weitaus gewichtigste Verkehrszweck in der Schweiz. Bei Grossveranstaltungen besteht ein beträchtliches Potenzial an Einflussmöglichkeiten auf die Verkehrsmittelwahl: Erstens ist der Zugang zu den publikumsintensiven Zielorten oft nur mit dem öffentlichen Verkehr möglich, zweitens lassen sich spezielle ÖV-Angebote (Öffentlicher Verkehr) leicht vermarkten und deren Benutzung mit flankierenden Massnahmen unterstützen. Im Gegensatz dazu ist der Ski- und Snowboard-Ausflugverkehr stark durch den Individualverkehr (IV) geprägt. Nur wenige Autobesitzer lassen ihr Fahrzeug in der Garage stehen und benutzen den ÖV. Alternativen werden kaum in Erwägung gezogen. Das Umsteigepotenzial wird mittelfristig auf ca. 10% geschätzt. Es kann jedoch nur realisiert werden, wenn ein effizienter Massnahmenmix eingesetzt wird, der nicht gegen die fundamentalen Interessen der Bergbahnen und Bergregionen verstösst und dem Verhalten und den Bedürfnissen der IV-Nutzer Rechnung trägt. Detaillierte Abklärungen von Aufwand, Wirkung, Effizienz und Akzeptanz sind nötig.

## BEGLEITFORSCHUNG LEICHT-ELEKTRO-MOBILE

Im Hinblick auf eine breite Markteinführung sollen mit dem **Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen (LEM) in Mendrisio** und **Partnergemeinden** [5] durch die Begleituntersuchungen Fragen zu drei Themenkreisen beantwortet werden: Beurteilung der Fördermassnahmen (einzelne und im Verbund); Auswirkungen auf Energieverbrauch und Umwelt; Veränderungen im Mobili-

tätsverhalten der LEM-Benutzer. Durchgeführt werden die Untersuchungen von der Arbeitsgemeinschaft Abay & Meier, Zürich / Polyquest, Bern (Mendrisio) und der Interfakultären Koordinationsstelle für Allgemeine Ökologie (IKAÖ) der Universität Bern (Partnergemeinden).

Die Beurteilung der **Wirkung der Fördermassnahmen** in den ersten vier Jahren des Grossversuchs zeigt, dass der Beitrag an den Anschaffungspreis die dominante Massnahme ist. Vor allem für die 3- und 4-Rad-Fahrzeuge erweist sie sich als Voraussetzung für eine erfolgreiche LEM-Förderung. Ohne Subventionen ist ihnen zur Zeit lediglich eine Rolle als Nischenprodukt zuzuordnen, wie die Repräsentativumfrage von Polyquest im Sommer 1999 untermauert.

Telefonisch befragt wurden total 776 Personen (179 Mendrisio, 189 im übrigen Tessin, 206 Deutschschweiz, 202 franz. Schweiz). 429 Personen beantworteten zusätzlich Fragen zu einer per Post zugeschickten Liste, die vier LEM, einen konventionellen Kleinwagen und ein Hybridfahrzeug mit einer Auswahl von Merkmalen beschreibt. Für diese Fahrzeuge war anzugeben, ob ein Kauf grundsätzlich denkbar wäre und zu welchem Preis.

Bei den Autos fand das **Hybridfahrzeug** die höchste Akzeptanz. Sollte es gelingen, dieses zu einem von den Befragten erwarteten Preis von rund Fr. 25'000 anzubieten, beläuft sich das Marktpotenzial in der Schweiz total auf schätzungsweise 300'000 Fahrzeuge. Für die Elektrokleinwagen liegt der vom Kunden erwartete Verkaufspreis mit gut Fr. 18'000 im Durchschnitt bei weniger als der Hälfte des aktuellen Verkaufspreises. Entsprechend sind vor allem diese Fahrzeuge zur Zeit als reine Nischenprodukte einzustufen. Analoges trifft auf das 3-rädrige Twike zu, das sich aber in einer gehobenen, umweltbewussten Käuferschicht bereits einen Markt geschaffen hat. Unabhängig vom Preis ist nur ein geringes Kaufinteresse an 4- und 3-rädrigen LEM zu beobachten. Ohne Berücksichtigung des Preises interessieren sich nur 13% der Bevölkerung für ein 4-rädriges LEM und 6% für ein Twike. Zweirädrige LEM sprechen mit 21% bei den Scootern und 16% bei den E-Bikes mehr Leute an. Ihr Listenpreis ist zudem näher bei den Vorstellungen der Bevölkerung. Die Studie sieht deshalb bezogen auf einen kurzen Zeithorizont bei den Zweirädern den zukunftsträchtigsten Markt für LEM in der Schweiz.

Die **Preise für Elektroautos** dürften in absehbarer Zeit nicht spürbar sinken. Dies zeigt eine Umfrage bei vier europäischen Automobilfirmen, die LEM anbieten. Bei der für die Autoindustrie noch sehr geringen jährlichen Stückzahl von 1'000 Fahrzeugen ergeben sich alleine für den Elektroantrieb ohne Batterien Kosten von rund 7'000 Franken. Unter Einbezug der Batteriekosten ergibt sich für die Elektrofahrzeuge sogar bei 100'000 Einheiten pro Jahr ein Preis, der über jenem für ein herkömmliches Auto liegt. Für den Kunden ist in diesem Fall natürlich zu relativieren, dass diese höhere Fixkosten durch die tieferen variablen Kosten kompensiert werden. Ähnlich schätzt der Bericht die Situation für die Batterien ein. Mit 100 bis 210 Fr./ kWh sind die Bleisäurebatterien zur Zeit die kostengünstigsten Akkumulatoren. Da diese bereits in grosser Stückzahl her-

gestellt werden, ist bei erhöhtem Produktionsvolumen keine Preissenkung zu erwarten. Nickel-Cadmium-Batterien kosten derzeit rund 700 Fr./kWh und dürften auch bei Stückzahlen von 5'000 pro Jahr auf diesem Niveau bleiben. Für die neuen Speichersysteme ist eher noch mit höheren Kosten zu rechnen.

Ebenfalls keine klaren Signale für einen selbsttragenden LEM-Markt erkennt man in der Studie der INFRAS zur

**LEM-Förderung nach dem Grossversuch** [6]. Darin wird deshalb ab 2001 eine Förderstrategie mit zwei Komponenten vorgeschlagen: Durch Massnahmen zur Förderung von sparsamen, energieeffizienten Fahrzeugen ohne technologische Vorgaben einerseits und durch die Weiterführung von P+D-Projekten zur Förderung bestimmter innovativer Technologien andererseits.

## Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Rahmen des **Grossversuchs mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio** [7], für den die ASSOVEL die Projektverantwortung hat, sind 1999 insgesamt 136 subventionierte Fahrzeuge in Verkehr gesetzt worden. Damit waren am Jahresende 277 LEM im Verkehr und das Tessin erlebte einen kleinen LEM-Verkaufsboom. Dieser geht vor allem auf drei Faktoren zurück:

1. Die Lancierung von drei neuen Zweirädern, die dank dem attraktiven Preis-Leistungsverhältnis guten Absatz fanden.
2. Die von Peugeot angebotene Batteriemiete wirkt sich insbesondere dadurch positiv aus, dass sie die momentan noch zu hohen fixen Kosten (Kauf) teilweise in variable Kosten (Batteriemiete) umwandelt und damit die Kundenakzeptanz erhöht. Gleichzeitig werden (evtl.) dem Kunden auch die vorhandenen Bedenken bezüglich der Batterielebensdauer entkräftet.
3. Die Fahrzeuge funktionieren zum Teil seit Versuchsbeginn vor fünf Jahren. Dieser Umstand gibt dem potenziellen Kunden Vertrauen. Zusätzlich haben die lokalen Vertretungen die potenzielle Kundschaft wirkungsvoll auf die neuen Angebote aufmerksam gemacht. So hat Ende September die Hochschule für Architektur, vertreten durch den Architekten Mario Botta, das 200. LEM in Empfang genommen.

Neben den Fahrzeugsübventionen bestätigen sich die Probefahrten als wichtigste Fördermassnahme gefolgt von Informationsveranstaltungen wie die ExpoVEL. Vor allem von der breiten Bevölkerung als besonders wichtig eingestuft werden Ladestationen. Im Tessin sind 1999 elf Stationen installiert worden. Damit belief sich die Gesamtzahl im Kanton Tessin Ende 1999 auf 49. Diese Säulen erlauben das Laden mit einer Stromstärke von 32 A, was einer Leistung von 7 kW entspricht. So lässt sich ein Elektroauto in drei Stunden voll laden und damit den Nachteil der begrenzten Reichweite spürbar verringern. Die Ladesäulen entsprechen den internationalen Normen und werden unter massgeblicher Beteiligung der Schweiz erstellt. Ende 1999 konnte ASSOVEL mit der Firma Maser in Bologna einen Exportvertrag unterzeichnen.

Die LEM-Miete wird in Mendrisio gut nachgefragt. Sie ist das wirkungsvollste Mittel, um LEM der Bevölkerung näher zu bringen und die Vorurteile abzubauen. Im November 1999 hat das Projekt Easy Move die LEM-Miete in der bisherigen Form abgelöst und gleichzeitig auf den ganzen Kanton ausgedehnt. In Zusammenarbeit mit den SBB und Autonoleggio Sud SA stehen an fünf

wichtigen Bahnhöfen im Tessin, inklusive Mendrisio, LEM zur Miete zur Verfügung. Die Vermietung erfolgt über den Bahnschalter. Das Projekt dient unter anderem auch zur Vorbereitung des Folgeprojekts. Für die Zeit nach dem Grossversuch, ab dem Jahr 2001, bereitet die Tessiner Regierung ein Projekt zur Förderung aller effizienten Fahrzeuge vor. Das Projekt VELdue will die Verbreitung dieser sparsamen Fahrzeuge zuerst mit einem Bonus- und später mit einem Bonus / Malus System fördern.

Der Grossversuch wurde 1999 wiederum an zahlreichen Veranstaltungen präsentiert und löste entsprechendes internationales Echo aus. Die wichtigsten Anlässe waren der Umweltkongress im japanischen Kobe, der Automobilsalon Genf und die EVS-16 in Peking. Aus Anlass des 200. Jahrestages der Erfindung der Batterie durch Alessandro Volta und in Zusammenarbeit mit Como fand die LEVcon1 mit 180 Teilnehmenden aus Europa, Nordamerika und Asien statt. Die sechs Referate behandelten vor allem politische und soziale Aspekte der Elektrofahrzeuge. Direktor Eduard Kiener erläuterte die Sicht des BFE. Prof. Sandro Furlan der Hochschule Enrico Matteri in San Donato Milanese zeigte ein beachtliches Potenzial der LEM zur Senkung der externen Kosten im städtischen Strassenverkehr auf. Ergänzt wurde die Konferenz durch einen Gemeinschaftsstand der Schweizer Industrie im nahen Einkaufszentrum und eine LEM-Ausstellung mit Probefahrgelegenheit im Zentrum von Como.

Dazu kamen weitere Anlässe im Kanton Tessin wie die monatlichen Sabati VEL und die ExpoVEL mit der 2. Gara di Regolarità. Ausländische Gruppen aus Holland, Japan, USA, Tunesien (Journalisten) und eine internationale Gruppe des ALA Battery Consortium besichtigten das Projekt. Ferner liessen sich mehrere Gruppen aus der Schweiz das Projekt vor Ort erklären, unter ihnen auch die Ständeratskommission für Umwelt, Raumplanung und Energie (UREK). Der Grossversuch in Mendrisio ist 1999 ins Projekt UTOPIA der EU integriert worden, mit dem aufgrund der Analyse und Evaluation laufender Projekte Instrumente, Methoden und Richtlinien für die Markteinführung von neuen Antriebssystemen entwickelt werden. In der Schweiz wird mit UTOPIA neben Mendrisio das CityCar-Projekt in Martigny untersucht.

Im Frühjahr 1999 hat die Firma MES-DEA in Stabio zu 100% die Rechte der ZEBRA-Batterie mit Natrium-Nickelchlorid von AEG Anglo Batteries übernommen. Der Erwerb der Patente garantiert der Tessiner Firma bis 2016 Weltexklusivität für diese Technologie. Die

Fabrikation von jährlich 5'000 Batterien und deren Weiterentwicklung bedingen den Bau einer neuen Werkhalle von 20'000 m<sup>2</sup> und schaffen bis 2001 rund 50 neue Arbeitsplätze. Innerhalb von 10 Jahren soll die Produktion auf 100'000 Batterien pro Jahr erweitert, das Gebäude auf 50'000 m<sup>2</sup> vergrössert und die Beschäftigtenzahl in diesem Bereich auf 400 Personen erhöht werden. Insgesamt sind Investitionen von 200 Millionen Franken zu erwarten.

In den Partnergemeinden **Muttenz, Riehen, Wohlen (BE), Wil (SG)** und **Sion** [8-12 ] entwickelten sich die Projekte unterschiedlich. In Muttenz hat sich die Zahl der LEM auf 34 erhöht. Eines der ersten LEM hat insgesamt rund 30'000 km zurückgelegt. In Riehen konnten sechs Zweiräder neu in Verkehr gesetzt werden, womit das Total auf 36 stieg. Die höchste Anzahl von Neuzulassungen erreichte Wohlen mit 12 Fahrzeugen, das mit 61 LEM auch den höchsten Total-Bestand unter den Partnergemeinden hat. Positiv wirkt sich hier vor allem aus, dass ein lokaler Scooter-Verkäufer gefunden werden konnte. In Sion ist das Fahrzeugtotal auf 35, davon 25 Scoot'elec, gestiegen. Sie zeigen in einer eindrücklichen 6-Stunden Rundfahrt den hohen Gebrauchswert dieser Fahrzeuge im Einsatz als.

Nur ein E-Bike konnte in Wil in Verkehr gesetzt werden, womit im dortigen Projekt insgesamt 31 LEM verkehren. Hier wirkt sich das mit einer Ausnahme vollständige Fehlen von lokalen Anbietern aus. Zudem dürfte der Abschluss des Projekts "**Elektrobusse im Stadtbetrieb Wil**" nach drei Jahren im Juni 1999 dämpfend gewirkt haben. Das Projekt hatte zum Zweck, zwei Niederflur-Elektrobusse erstmals in einem regulären Liniendienst mit bis zu 15% Steigung einzusetzen und zu testen, wie gut sie sich hierfür eignen. Zusammen haben die beiden Busse eine durchschnittliche Tagesleistung von 159 km erbracht. Mit insgesamt 146'801 km während dreier Jahre sind die aus betriebswirtschaftlichen Gründen vorgegebenen 25'000 km pro Jahr und Bus beinahe erreicht worden. Als unerwartet gut erwies sich der Rekuperationswirkungsgrad von bis zu 38,6%, was einen entsprechend tiefen Energieverbrauch von durchschnittlich 80 kWh/100 km ermöglichte. Dem Entscheid des Wiler Stadtrats, den Versuch nicht mehr fortzuführen, lagen einerseits betriebswirtschaftliche Überlegungen zu Grunde. Andererseits wurden Lieferschwierigkeiten der Nickel-Natriumchlorid-Batterien als Folge der Fusion von Daimler Benz mit Chrysler geltend gemacht. Betriebsausfälle hätten für einen der Busse einen Batterieersatz erfordert.

Bereits Anfang 1999 ist das Projekt **LEM-Elektrotaxi als Messobjekt "Erfolgsfaktoren für den Taxibetrieb"** [15] beendet worden. In Wil hat das eigens hierzu gegründete Einzelunternehmen **Elektrotaxi Schwendimann** im Dezember 1997 einen Taxidienst mit einem 4-türigen Elektromobil angeboten. Nach einjährigem Betrieb war der Umsatz unbefriedigend. Seit Januar 1999 bietet das Unternehmen den Taxidienst mit einem bivalenten (Gas und Benzin) Auto an. Die Ertragslage hat sich seither markant verbessert. Das unbefriedigende Resultat ist vor allem auf den geringen Status eines Kleinwagens gegenüber einem Mittelklas-

sewagen (der Taxikunde will Auto) und, trotz Schnelllademöglichkeit, langen Standzeiten zurückzuführen. Dennoch sind entsprechend diesen Erfahrungen Elektroautos dann im Taxibetrieb einsetzbar, wenn am Standplatz eine Schnellladestation vorhanden ist.

In den Partnergemeinden und in Horw hat die IKAÖ [16] eine zweite **Bevölkerungsbefragung** durchgeführt. Diese hat einen weiterhin hohen Bekanntheitsgrad der Partnerschaftsprojekte von über 70% ergeben. Der Versuch wird von über 80% als grundsätzlich positiv bewertet, was etwas weniger ist als bei der ersten Befragung 1997/98. Insbesondere in Ittigen und Wohlen wird das Projekt mit mehr Zurückhaltung beurteilt. Dies dürfte auf die Nichtweiterführung des Projekts in Ittigen zurückzuführen sein, für das an einer Gemeindeversammlung die nötigen finanziellen Mittel nicht bewilligt wurden. Die in Ittigen Befragten waren aber mit einer deutlichen Mehrheit der Ansicht, bei einer Abstimmung an der Urne wäre das Projekt fortgeführt und nicht abgelehnt worden.

Für 190 LEM aus Mendrisio und den Partnergemeinden liegen **Angaben zum Energieverbrauch** vor. Für die E-Bikes stammen alle aus den Partnergemeinden. Im Durchschnitt ergibt sich ein Verbrauch von 20,7 kWh/100 km (entspr. ca. 2 l Benzinäquivalent an Endenergie). Der Verbrauch ist für die Nutzfahrzeuge mit 36,0 kWh/100 km erwartungsgemäss am höchsten, mit 1,8 kWh/100 km für die E-Bikes am kleinsten. Die PW mit 1 – 2 Sitzplätzen haben einen mittleren Verbrauch von 21,7 kWh/100 km, diejenigen mit 3 – 4 Plätzen 24,9 kWh/100 km. Die Werte schwanken jedoch innerhalb der einzelnen Fahrzeugtypen erheblich. Für die etwa zwanzig Peugeot 106 electric ergeben sich Werte zwischen 19,0 und 30,1 kWh/100 km. Die Verbrauchswerte zeigen einen direkten Zusammenhang mit der monatlichen Fahrleistung: Je kleiner die Fahrleistung ist, desto höher ist der durchschnittliche Energieverbrauch. Hier wirken sich vor allem die Standverluste durch die Selbstentladung der Batterien aus.

Durch Fokusgruppengespräche in der Region Basel und in Mendrisio wurden erste Hinweise auf allfällige **Veränderungen des Mobilitätsverhaltens** durch die LEM gewonnen. Demnach werden LEM mehrheitlich für bestimmte Zwecke wie Arbeitsweg, Kindertaxi und Shopping gekauft und decken somit bestehende Mobilitätsbedürfnisse ab. Das bewusste Planen der Fahrten und die Kontrolle der effizienteren Fahrweise beeinflussen das Mobilitätsbewusstsein.

In der Praxis verbrauchen die LEM etwa 27% mehr Energie als im Testzyklus im Labor der Hochschule für Architektur und Technik (HTA) in Biel. Je nach LEM-Typ sind die Differenzen jedoch sehr unterschiedlich. Das Twike verbraucht in der Praxis etwa 30% weniger Energie als im Labor, der Fiat Panda etwa doppelt so viel. Neben dem Energiemanagement beeinflusst die Topografie den Energieverbrauch der LEM im Alltag. Weitere Faktoren sind die unterschiedliche Zuladung mit Personen und Gütern, der individuelle Fahrstil und klimatische Einflüsse. Stichprobenmässig hat die HTA Biel für 5 LEM unterschiedlicher Typen die Labormessung wiederholt. Trotz deutlichen Unterschieden im Fahrzeugalter und bei der Fahrleistung haben sich für

keinen Fahrzeugtyp signifikante Abweichungen vom ersten Laborwert ergeben.

Betrieben von POSTAUTO SCHWEIZ, startete im Herbst 1998 in der Walliser Gemeinde Martigny das Projekt **City Car** [17]. Dieses vom Betreiber, dem Kanton Wallis, der Gemeinde und dem BFE finanzierte Projekt ermöglicht vorerst mit 30 öffentlich zugänglichen Elektrofahrzeugen einen bewussten Individualverkehr in der Agglomeration. Der Zutritt zum Fahrzeug erfolgt mit einer erweiterten Postomat-Karte. Ausserhalb des erlaubten Rayons verringert das mit GPS (Global Position System) ausgerüstete Fahrzeug stufenweise seine Geschwindigkeit. Fahrzeugtechnisch basiert das Projekt auf dem Ligier Ambra, der als Elektrofahrzeug von der Schweizer Firma SCHOLL SSP in Vernier (GE) hergestellt wird. Das Projekt wurde 1999 aufgebaut und die Testfahrer im Herbst mittels Fragebogen befragt. In den ersten sechs Monaten nach Abschluss der Aufbauphase ist jedes Fahrzeug durchschnittlich 3-mal pro Tag zum Einsatz gekommen. Pro Benützung sind die Testpersonen im Durchschnitt 4,74 km gefahren. Insgesamt legt die ganze Flotte etwa 270 km im Tag zurück. Etwa die Hälfte der Mieten, die derzeit noch gratis sind, dauert weniger als 10 Minuten, drei Viertel weniger als eine Stunde.

Ausserhalb dieser Projekte förderte die **Stadt Lausanne** den Kauf von Elektro-Scootern, wo bisher rund 80 dieser Fahrzeuge abgesetzt wurden. Die Scooter waren 1999 gesamtschweizerisch die meist verkauften E-Fahrzeuge. Das gute Preis-Leistungsverhältnis, auch im Vergleich zu herkömmlichen Scootern, dürfte ein Hauptgrund für ihre wachsende Popularität sein.

1999 startete am **Gymnasium Köniz** im Rahmen des Betriebswirtschaftsunterrichts das Projekt Legair [18] der **business@lass**. Die nicht gewinnorientierte Genossenschaft hat zum Ziel, den Jugendlichen unter anderem am Beispiel der LEM-Vermietung praktische Erfahrungen im Wirtschaftsleben zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden Flyer, Scoot'elec, City-el und Twike angeschafft. In enger Zusammenarbeit mit den Schweizer LEM-Herstellern BKTech in Kirchberg und dem Twike-Zenter in Bern hat die Gruppe an mehreren Probefahrerlässen teilgenommen. Im Herbst besuchten sie mehrere Gymnasien im Kanton Bern, wo die Lehrkräfte und die Jugendlichen mit einer Präsentation und anschliessender Probefahrt für die energieeffizienten Fahrzeuge sensibilisiert und zum Kauf eines solchen motiviert werden sollten. Finanzielle Unterstützung er-

hielt das Projekt ausser vom BFE auch vom BUWAL und dem KIGA Bern.

Unter der Führung des neu strukturierten Verbands **e'mobile** und dem VSE wurden im Rahmen des Projekts **LEM erfahren** [19] die Elektromobile einer breiten Öffentlichkeit näher gebracht. Dies erfolgte in Form von über zwei Dutzend Anlässen: Probefahren bei mehreren Kraftwerken und in Städten, Präsenz an Ausstellungen von nationaler Bedeutung und einer 24-Stundenfahrt. Als besonders wirkungsvoll haben sich jene Anlässe erwiesen, welche auf eine tatkräftige lokale Unterstützung zählen konnten. Die drei neuen Info-Zentren in den drei Hauptsprachregionen erweisen sich zunehmend als wichtige erste Anlaufstelle. Mit dem Aufbau und der regelmässigen Betreuung einer Homepage, vorerst in zwei Sprachen, lässt sich zudem ein erweitertes Publikum ansprechen. Die Expertenkommissionen haben im ersten Jahr nach der Neustrukturierung des Verbands Empfehlungen für Stecker und Steckdosen sowie Marketingstrategien erarbeitet. Ferner hat der Verband die Schweiz im Ausland an mehreren Anlässen vertreten.

Im **Versuch mit bivalenten Fahrzeugen (Biogas und Benzin) in Bachenbülach und Umgebung** [20] konnte die Zahl der eingesetzten Fahrzeuge auf 80 Stück erhöht werden. Die im Biogas-Mode CO<sub>2</sub>-neutralen Fahrzeuge bewähren sich im Alltag. Sie eignen sich wegen des weitgehend auf den Kanton Zürich beschränkten Tankstellennetzes vor allem für Fahrer mit einem überwiegend regionalen Fahrprofil.

Aufgrund des noch lückenhaften Tankstellennetzes hat die Firma EUROPE CAR ihre 15 Fahrzeuge wieder verkauft, die mehrheitlich bereits wieder als Occasionen abgesetzt werden konnten. Der Schweizerische Verband für Gasversorgungsbetriebe stellt nun Unterstützungsgelder für 12 weitere Tankstellen bereit. Weiterhin begrenzt ist das Fahrzeugangebot. Die Firma Gas- & Wasserarmaturen AG in Wattwil hilft diese Lücken mit Fahrzeugumrüstungen zu decken. Der höhere Anschaffungspreis wirkt ebenfalls noch immer dämpfend auf die Verkaufszahlen. Mit einer Einzelinitiative im Züricher Kantonsrat sollten diese Autos von der Motorfahrzeugsteuer befreit werden, was jedoch knapp abgelehnt wurde. Als äusserst erfolgreich erweist sich die Vermietung eines bivalenten Personenwagens durch die Gemeinde zu Fr. 20.-- pro Tag inkl. Biogas. Ferner hat die Post 17 bivalente Fahrzeuge im Raum Zürich, in Basel und Lausanne in Betrieb genommen.

## Nationale und internationale Zusammenarbeit

Auf nationaler und internationaler Ebene wurde die Zusammenarbeit und der Informationsaustausch fortgesetzt. Im Rahmen der IEA konnte das *Implementing Agreement for Hybrid and Electric Vehicle* mit dem *Implementing Agreement for Alternative Motor Fuel* zu einem gemeinsamen *Annex* gekoppelt werden. Dadurch sichern sich alle beteiligten Länder die Grundinformation aus den beiden Themenkreisen. Aus Schweizer Sicht waren im Berichtsjahr zwei weitere Punkte bemerk-

wenswert: Zum ersten wurde Urs Muntwyler zum *Chairman* des *IEA-Implementing Agreement for Hybrid and Electric Vehicle* gewählt. Zum zweiten errang das Schweizer *Team Spirit of Bike* um August Pfluger beim *World Solar Cycle Challenge* in Australien den ersten und dritten Rang in der Kategorie Zweiräder. In der Gesamtwertung, mit der Konkurrenz der vollverschalteten und deshalb windschlüpfrigeren Solarmobilen, ergab das den ausgezeichneten zweiten Rang.

## Ausblick

Nach der Markteinführung der ersten 3 l-Autos ist angezeigt, weitere Zeichen zu setzen. 3 l bei Kleinwagen bzw. 5 l/100km bei Mittelklassewagen sind keine Grenzwerte der Physik, Chemie oder Maschinentechnik. Um aber dem Thema weiterhin einen markanten Fortschritt zu sichern ist es angezeigt, weiterhin mit Forschungs- und Demonstrationsprojekten Anreize zu setzen. Deshalb soll die nächste Limite für Fahrzeuge, welche auf den Hauptmarkt familientaugliche Autos zielen, in Forschungsprojekten deutlich unter 2 l/100 km angesetzt werden. Es ist an der Zeit, der Öffentlichkeit bekannt zu geben, dass mit 1-2 l/100 km sehr kom-

fortabel 4 Personen und Gepäck emissionsarm, leise und rasch transportiert werden können. Technologien hierzu sind vielfach bereits vorhanden oder werden in den angrenzenden Programmen erforscht und entwickelt. Wichtige Themen hierbei sind: Leichtbau, Rekuperation, hochwirksame Motoren und Nebenaggregate, (Zwischen-)Speichersysteme, Leitsysteme.

Die Markteinführung verbesserter Technologie soll durch geeignete Pilot- und Demonstrationsprojekte und gelungene Marketingansätzen beschleunigt werden.

## Liste der Projekte & Internet-Adressen

- [1] M. [Horlacher](#), Möhlin: **Modultec – Modultechnologie für Leichtmobile** (JB) ENET 9454961 /
- [2] L. Guzzella, ETH-Zürich, [PALOS](#): **Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge** (JB) / ENET 9555285
- [3] Müller & Roman, METRON, Brugg: **Autofreie Haushalte** (SB)
- [4] R. Meier, Bern: **Freizeitverkehr** (JB)
- [5] U. SCHWEGLER, Fischingen, ARGE ABAY & MEIER / POLYQUEST, Zürich / Bern: **Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio und Partnergemeinden** (JB)
- [6] M. Keller, INFRAS, Bern: **LEM-Förderung nach dem Grossversuch** (SB)
- [7] M. Piffaretti, ASSOVEL, [Mendrisio](#): **Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio** (JB) /
- [8] P. Enzmann, Gemeinde MuttENZ: **LEM Partnergemeinde MuttENZ** (JB)
- [9] R. Grass, Gemeinde [Riehen](#): **LEM Partnergemeinde Riehen** (JB)
- [10] H. Leu, MOBILEM, Wohlen: **MobiLEM-Wohlen** (JB)
- [11] W. Rüttener, Gemeinde Wil: **LEM-Partnergemeinde Wil • Elektrobus Wil** (JB) / ENET 9555203
- [12] M. Maurer, Municipalité, [Sion](#): **Intégration de VEL en ville de Sion** (JB) / ENET 9758804
- [13] K. Meier-Engel, [HTA-Bern](#), Biel: **Energieverbrauchsmessungen von LEM auf dem Prüfstand** (JB)
- [14] U. Muntwyler, SOLARZENTRUM, Zollikofen: **Messkampagne LEM in Partnergemeinden** (SB)
- [15] P. SCHWENDIMANN, Wil: **Erfolgsfaktoren für den Elektrotaxibetrieb** (SB)
- [16] U. Haefeli, IKAÖ/UNI-Bern: **Begleituntersuchungen zum Grossversuch** (JB)
- [17] J. M. Germanier, LA POSTE, Martigny: **City Car** (JB)
- [18] P. Sägesser, BUSINESS@LASS, Köniz: **Legair, Elektromobile in der Schulung** (JB)
- [19] W. Blum, [e'mobile](#), Zürich: **LEM erfahren** (SB) / ENET 9866403
- [20] F. Stuker, GEMEINDE Bachenbülach: **Versuch mit bivalenten Fahrzeugen (Biogas, Benzin) in Bachenbülach** (JB) / ENET 9757429
- [21] A. Fuchs, FH-Bern: **Mechanische Muskelkraft-Elektro-Hybridisierung** (JB) / ENET 9658450
- [22] M. Ducret, ICT-BO INNOVATIONS CENTRUM, Hümibach: **Eco Boot 2001** (JB) / ENET 9865821
- [23] P. Briner, FH-Sion: **Recharge par induction** (JB) / ENET 9763044
- [24] A. Mathoy, BRUSA, Gams: **Kostenoptimierte Integration einer Ladearchitektur • Normierung im Bereich der Elektrofahrzeuge** (SB) / ENET 9759068
- [25] Ch. Häuselmann, BKTECH, Kirchberg: **Elektrobike New Flyer** (JB) / ENET 9758995
- [26] M. Kutter, VELOCITY, Basel: **Elektrobike Dolphin** (JB)
- [27] P. Zeller, [Twike](#), Gelterkinden: **LEMnet – Aufbau einer flächendeckenden Lade-Infrastruktur für LEM** (JB) / ENET 9759352
- [28] R. MINDER, Unterlunkhofen: **SolarCat – solar elektrisch angetriebenes Passagierschiff** (SB)
- [29] J. ROHRER, Steckborn: **Solarfähre Untersee** (JB)

(JB) Jahresbericht 1999 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden