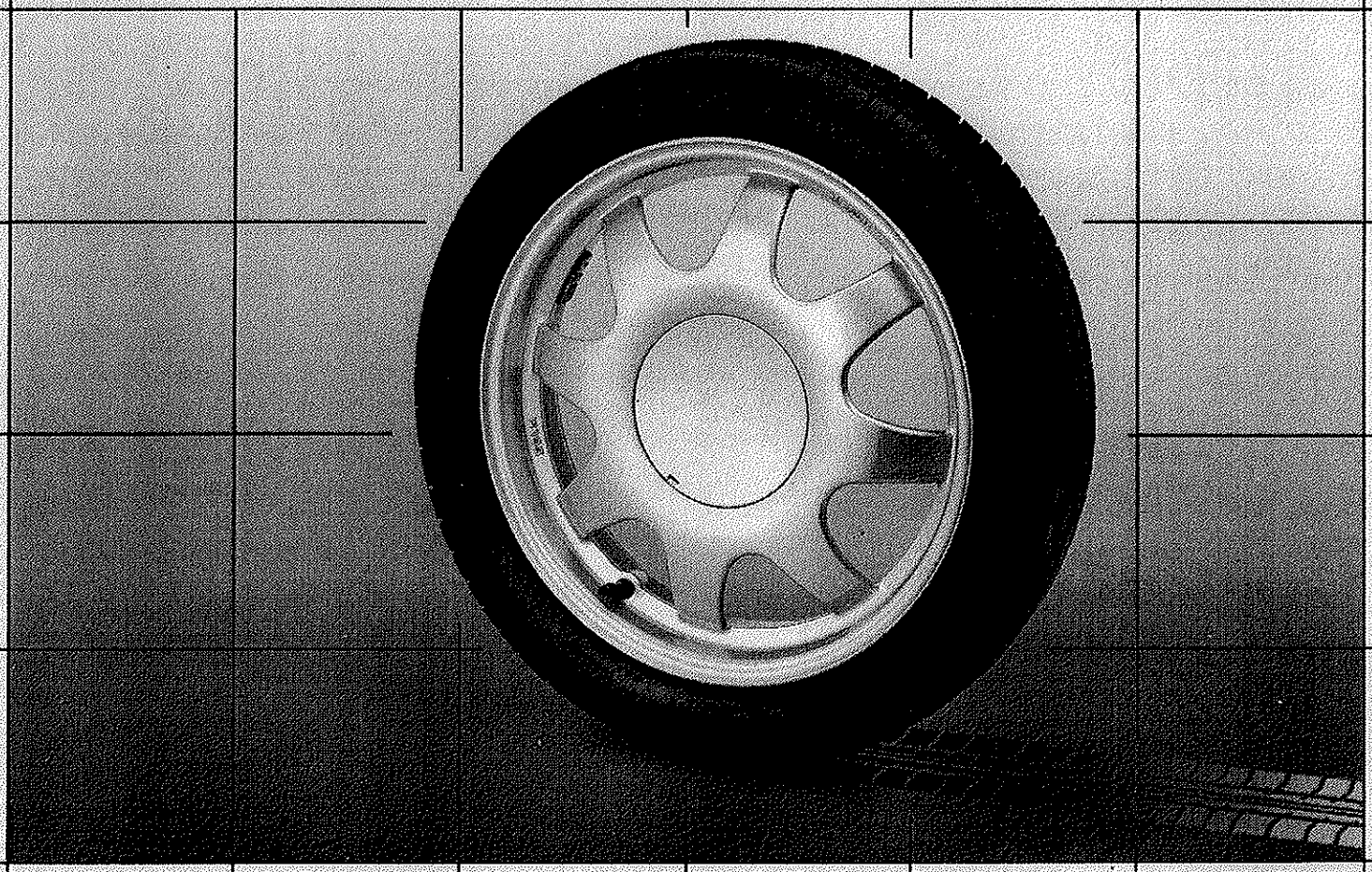
Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia

Recherche énergétique

Energie-Forschung 1993

Rapports de synthèse des chefs de programme
Überblicksberichte der Programmleiter



La roue ré-inventée . . .

RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE

1 9 9 3

ENERGIE-FORSCHUNG

Rapports de synthèse des chefs de programme

Überblicksberichte der Programmleiter

T a b l e / I n h a l t

	Page / Seite
Vorwort	3
Avant-propos	4
Fortschritte der Energieforschung 1993	5
Rationelle Energienutzung in Gebäuden	7
Rationelle Energienutzung im Verkehr	15
Umgebungs- & Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung	23
Feuerung & Verbrennung	31

Kerntechnik & nukleare Sicherheit 39

Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK 47

Solaire thermique et stockage de chaleur 55

Solararchitektur 63

Photovoltaik 71

Thermochemie 81

Photochimie 89

Biomasse 95

Geothermie 103

Kontrollierte Kernfusion 109

Elektrizität 113

Wasserstoff 121

Elektrochemie 129

Piles à combustible 137

Sozioökonomie 145

Annexe / Anhang

Adresses des chefs de programme / Adressen der Programmleiter 153

VORWORT

Die jährlichen Aufwendungen für die Energieforschung betragen in der Schweiz rund 1150 Mio Franken. Davon bringt die **Privatwirtschaft** etwa 900 Mio Franken auf (Der Hauptanteil von 80-85% fällt dabei auf Produktentwicklung, Pilotprojekte und Promotion). Der Forschungsaufwand seitens der **öffentlichen Hand** beläuft sich auf rund 200 Mio Franken pro Jahr (Hiervon betreffen jedoch nur 10-15% Pilot- und Demonstrationsprojekte oder Produktentwicklung). Detailangaben darüber sind in der soeben erschienen *Liste der Energieforschungsprojekte 1992-1993* zusammengestellt.

Die Energieforschung der öffentlichen Hand richtet sich nach den Leitlinien des Bundesrates, wie sie im *Konzept der Energieforschung des Bundes* dargelegt sind. Zur Zielerreichung stehen dem Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) Geldmittel zur Verfügung (1993 waren es 44 Mio Franken, wovon 14 Mio Franken für Beiträge an Pilot- und Demonstrationsanlagen), welche es subsidiär zu den Aufwendungen anderer öffentlicher Instanzen einsetzt. Das BEW hat die Energieforschung in 19 Programme unterteilt. Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte 1993 der jeweiligen Programmleiter. Sie sind für eine breite Öffentlichkeit bestimmt und enthalten alle auf den entsprechenden Gebieten in der Schweiz durchgeführten Arbeiten, soweit sie dem Programmleiter bekannt sind. Im Vordergrund stehen jedoch die ganz oder teilweise durch das BEW finanzierten Forschungsprojekte. Dabei sind auch die jeweiligen Aktivitäten im Bereich Pilot- und Demonstrationsanlagen beschrieben.

Die Übersichtberichte der Programmleiter können - unter Angabe der Quelle - reproduziert werden. Die einzelnen Jahresberichte (JB) oder Schlussberichte (SB) der in den Übersichten erwähnten Energieforschungsprojekte sind bei ENET oder beim betreffenden Programmleiter erhältlich (siehe Adressverzeichnis im Anhang). Es sei darauf hingewiesen, dass auch verschiedene im Energiesektor arbeitende Institute aus dem ETH-Bereich in ausführlichen Jahresberichten über ihre Arbeiten informieren.

Zur Illustration auf dem Umschlag :

La roue ré-inventée... Energiesparende Räder und Reifen für *Leichtfahrzeuge* erforderten grundlegend neue Entwicklungen (Siehe Programm **Rationelle Energienutzung im Verkehr**).

AVANT-PROPOS

Les montants consacrés à la recherche énergétique en Suisse représentent un total de quelque 1150 millions de francs par année. Le **secteur privé** en fournit 900 millions (dont 80-85 % pour le développement de produits, des projets-pilotes et la promotion). De son côté, le **secteur public** dispose de 200 millions (dont 10-15 % seulement pour des projets pilotes et de démonstration ou pour le développement de produits). On trouvera des informations plus détaillées à ce sujet dans la *Liste des projets de recherche énergétique 1992-1993*, qui vient de paraître.

La recherche énergétique du secteur public est régie par les directives du Conseil fédéral, sur lesquelles repose le *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération*. Pour remplir sa tâche, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) dispose de moyens financiers (44 millions de francs en 1993, dont 14 millions pour soutenir des installations pilotes et de démonstration), qu'il emploie pour compléter les investissements d'autres services publics. L'OFEN a réparti la recherche énergétique en 19 programmes. Le présent ouvrage renferme les rapports annuels de synthèse des chefs de programmes pour 1993. Ces rapports, destinés à une large diffusion, rendent compte de tous les travaux accomplis en Suisse dans les domaines en question, pour autant que le chef de programme en ait connaissance. Toutefois, l'accent est mis sur les projets financés entièrement ou partiellement par l'OFEN. On a également décrit les activités déployées pour des projets pilotes et de démonstration.

On peut reproduire les rapports de synthèse des chefs de programmes à condition d'en indiquer la source. Quant aux rapports annuels (RA) et finaux (RF) des projets mentionnés, ils s'obtiennent chez ENET ou chez le chef de programme (liste d'adresses dans l'appendice). Précisons que différents instituts des EPF travaillant dans le domaine de l'énergie publient également des rapports annuels détaillés sur leurs activités.

Illustration de la couverture:

La roue ré-inventée . . . Des développements fondamentalement nouveaux ont permis de créer des roues et des pneus pour *véhicules légers* accroissant encore l'économie d'énergie (voir programme **Utilisation rationnelle de l'énergie dans les transports**).

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 1993

Gerhard Schriber, Leiter der Sektion Energieforschung ; BEW

Die Forschung macht nur selten grosse Sprünge. Bedeutende neue Errungenschaften müssen in vielen Teilschritten erarbeitet werden. In diesem Sinn hat auch der beachtliche Einsatz der "Energieforscher" auf allen Gebieten zu grösseren und kleineren Erfolgen geführt. Und es ist erfreulich, dass die gesetzten Jahresziele fast durchwegs erreicht worden sind. Als kleine Auswahl wird im folgenden je ein neues Resultat von BEW unterstützten Projekten aus den einzelnen Forschungsbereichen angeführt, deren Ergebnisse unmittelbar für die Anwendung bereit stehen:

- Im Bereich **rationelle Energienutzung in Gebäuden** hat 1993 das Gebiet *Luftströmungen und Lüftung* einen markanten Schub vorwärts erhalten. Für Planer, Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Ingenieure sowie Schulen liegt jetzt - als Schlussdokument mehrjähriger Forschungsarbeit - eine sieben-bändige Publikationsreihe (inkl. Rechenprogramme) vor.

- Aus vielen Untersuchungen im Bereich **Solararchitektur** ist ein einfach handbares *Expertensystem* (DIAS) hervorgegangen : Es ermöglicht die visuelle Darstellung von Beispielen und die Berechnung des Einflusses von Aenderungen, welche der Benutzer an diesen anbringen kann.

- Die **Feuerungs- und Verbrennungsforschung** findet immer mehr Interessenten für ihre - mit modernsten Methoden erarbeiteten - Erkenntnisse zur Verbesserung industrieller Produkte. Als hilfreich für praktische Prüfstandmessungen erweist sich auch das im Berichtsjahr fertig entwickelte *Messverfahren zur Erfassung der Schadstoffabgaben von Holzfeuerungen* (maximal 70 kW Leistung).

- Hervorstechendes Ergebnis im Gebiet **Umgebungs- und Abwärmennutzung** ist der Beweis der Funktionstüchtigkeit einer neuentwickelten, kleinen (3.5 kW Heizleistung) *Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe* für Erdgasbetrieb. Die geräuschlosen, FCKW-freien und verschleisslosen Aggregate erlauben es, gegenüber üblichen Gaskesseln in Einfamilienhäusern jährlich bis 500 m^3 Erdgas einzusparen.

- Die interessantesten Resultate im Bereich **rationelle Energienutzung im Verkehr** brachte die Entwicklung von *verbrauchsgünstigen Rad-Reifen-Einheiten*. Für Leichtfahrzeuge sind diesbezüglich optimale Lösungen gefunden worden, welche auch zu angemessenen Preisen hergestellt werden können.

- Im Bereich **Kerntechnik und nukleare Sicherheit** konnten 1993 beim PSI gleich mehrere - zum Teil weltweit einzigartige - *Versuchsanlagen* fertiggestellt werden. Sie ermöglichen Schmelzexperimente, das Studium von speziellen Vermischungsphänomenen, das Verhalten von Aerosolen in verschiedener Umgebung, die Untersuchung der Langzeit-Nachwärmeabfuhr und anderer sicherheitsrelevanter Aspekte fortgeschrittener Reaktorkonzepte. Die aus den Experimenten gewonnen Erkenntnisse dienen insbesondere der Aufsichtsbehörde und den Kraftwerksbetreibern für die kontinuierliche Erhöhung der Betriebssicherheit der Anlagen.

- In der international eingebetteten Erforschung der **kontrollierten Kernfusion** liefert die ETH-Lausanne (CRPP) immer wieder bedeutende Beiträge. Ein beachtenswertes Ergebnis im vergangenen Jahr ist die gelungene *Auskopplung der elektromagnetischen Strahlung aus dem Gyrotron* (Einrichtung zur Heizung des Plasmas). Als nächster Schritt wird die Verbesserung des Wirkungsgrades (z.Zt. 15 %) angegangen.

- Untersuchungen an **aktiven Solaranlagen** zeigen, dass hier - trotz weitgehend ausgereifter Technik - noch *weitere Wirkungsgraderhöhungen* möglich sind : Bis zu 15 % Verbesserung erbringt ein Regler, der die solaren Einstrahlungsverhältnisse vorausberechnen kann.

- Von den für die solare Stromerzeugung mittels **Photovoltaik** benötigten *Wechselrichtern* (Umwandlung in Wechselstrom für die Einspeisung ins Netz) sind jetzt mehrere schweizerische Spitzenprodukte auf dem Markt. Die öffentliche Hand kann sich deshalb aus der weiteren Unterstützung dieser Entwicklungen zurückziehen. Einzig die Bereitstellung von Testmöglichkeiten wird noch weiter gefördert.

- Die **Solarchemie** befasst sich mit den Möglichkeiten, Sonnenenergie (Licht und Wärme) chemisch zu speichern. Sie verfolgt damit längerfristige Zielsetzungen. Auf "Zufahrtsgeleisen" fallen aber schon heute anwendbare Ergebnisse an. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass durch *Pyrolyse von Holz und Papier* - optimale Wasserzufuhr und Katalysatorwahl vorausgesetzt - bis zu 950 l Wasserstoff pro kg Holz erzeugt werden können. Mit der Industrie zusammen wird nun ein technisches Realisierungskonzept ausgearbeitet.

- Im Programm **Wasserstoff** konnte beim originellen Schweizer *MTH-Speicher* - durch den Einsatz von speziellen Membranen - die Wasserstoffansbeute auf über 90 % gesteigert werden.

- Ein wichtiger Teilbereich der **Biomasse-Nutzung** ist die effiziente und saubere *Holz-Verbrennung*. Die vielfältigen diesbezüglichen Forschungsarbeiten konnten 1993 weitgehend abgeschlossen werden. Die Ergebnisse sind gut dokumentiert, die Umsetzung ist angelaufen. Ein Testzentrum für Holzheizungen ist in Diskussion. Weitere Forschungsanstrengungen sind hingegen erforderlich für den Teilbereich Holzvergasung.

- Abschätzungen, welche im Rahmen des Forschungsprogramms **Geothermie** durchgeführt wurden, zeigen, dass für die Beheizung von Siedlungen bei den geplanten *NEAT-Tunnelportalen* sowohl am Gotthard wie am Lötschberg *Wärmepotentiale* von mindesten 45 MW_{th} vorhanden sind.

- Im Programm **Elektrizität** führten die Umsetzungsarbeiten des Forschungsprojekts "Energieverluste bei Büro- und Unterhaltungselektronik-Geräten" zu einem internationalen Treffen von Kennern der Szene. Daraus entstand der vielbeachtete *Miniwatt-Report* sowie die Errichtung eines elektronischen Netzes zur Sicherstellung des diesbezüglichen internationalen Informationsflusses (Schweizer Anlaufstelle : ETH-Zürich, Energieanalysen).

- Ein 1993 fertiggestelltes und validiertes *Rechenprogramm* (BemCalc) erlaubt es, eine grosse Zahl verschiedener Probleme der angewandten **Elektrochemie** zu simulieren. Dadurch kann der Zeitaufwand für Experimente wesentlich verkürzt werden.

- Neben unserer Hauptlinie zur Entwicklung von **Brennstoffzellen** auf der Basis von Festoxyden (SULZER HEXIS-Konzept) wird auch an der Entwicklung *kostengünstiger Membranen* für Polymer-Brennstoffzellen gearbeitet. Die Fortschritte beim PSI haben zu Patenten (Vorbestrahlung mit anschliessendem Pfropfen und Mehrfach-Vernetzung) geführt, für die sich bereits mehrere Firmen interessieren.

- Im Bereich **sozioökonomische Energieforschung** konnte 1993 nach mehrjährigen Arbeiten das auf schweizerische Verhältnisse zugeschnittene *Ökoinventar für Energiesysteme* abgeschlossen werden. Es enthält - nach einheitlichen Kriterien aufgestellte - Angaben über die Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung der verschiedenen Energietechniken.

Im April fand in Stein am Rhein die **4. Schweizerische Energieforschungskonferenz** statt. Diese Zusammenkünfte haben einen wichtigen Stellenwert für die Kommunikation zwischen Forschung, Wirtschaft, Verwaltung und Politik. Thema der Stein am Rhein-Konferenz war die *internationale Forschungs-Zusammenarbeit*. Ergebnis : Es sind Bedingungen, Grenzen und Evaluationskriterien festgelegt worden für eine effiziente internationale Kooperation; sie bedürfen allerdings bezüglich der Ostländer und der Entwicklungsländer weiterer Ausarbeitung. Die Konferenz hat zudem gezeigt, dass die schweizerische Energieforschung international gut eingebettet ist, nicht zuletzt dank der aktiven Teilnahme an den Forschungsprojekten der Internationalen Energie-Agentur (IEA), welche auch die Verbindung zur Forschung der Europäischen Union sicherstellt.

Die Förderung von **Pilot- und Demonstrationsanlagen** durch die öffentliche Hand verharrte nach dem Rekordjahr 1992 auch 1993 auf hohem Niveau (eingereichte Gesuche 1993: 105 Stück). Die finanziell am stärksten unterstützten Gebiete waren Verkehr (inkl. Elektrofahrzeuge), Photovoltaik, Biomasse und Geothermie. Sowohl bezüglich Sprachregionen wie kantonale Verteilung konnte eine ausgewogene Mittelzuteilung erreicht werden. Pilot- und Demonstrationsanlagen bilden eine wichtige Brückenfunktion zwischen der angewandten Forschung und dem Markt. Mit ihrer Bedeutung in der Schweiz wird sich die nächste Energieforschungskonferenz (7./8. November 1995) befassen.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Markus Zimmermann

Niedrigenergiehaus

Dieses Einfamilienhaus von Architekt F. Sponagel wird fast ausschliesslich über einen Cheminée-Ofen, der seine Wärme an Hypokaustenwände abgibt, beheizt. Es erhielt 1993 den 1. Preis im Niedrigenergiehaus-Wettbewerb der Firma ISOFLOC.

1. Anvisierte Ziele 1993

Die rationelle Energienutzung in Gebäuden hat in den vergangenen 20 Jahren laufend Fortschritte gemacht. Viele der am Bau Beteiligten haben wesentlich zu einer effizienten und umweltschonenden Energienutzung beigetragen. 1973 betrug der Energieverbrauch eines durchschnittlichen Wohnhauses rund 990 MJ pro m^2 und Jahr. Heute, 20 Jahre später, dürfen in der ganzen Schweiz nur noch Bauten erstellt werden, die höchstens 530 MJ/m^2a verbrauchen. Der tatsächliche Energieverbrauch vieler Neubauten liegt mit ca. 400 MJ/m^2a wesentlich tiefer und einzelne Pilot- und Demonstrationsbauten zeigen, dass selbst hier noch ein grosses Sparpotential besteht.

Das Forschungsprogramm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** will die Ausschöpfung dieses Sparpotentials fördern, indem es gezielt Wissenslücken untersucht, Entwicklungen fördert und Lösungen erarbeitet, die zu einer weiteren Reduktion des Energieverbrauchs, aber auch zu einer Reduktion der emittierten Schadstoffe bei Neu- und Altbauten führen.

Die Arbeitsschwerpunkte für 1993 waren:

- Abschluss des Teilprogramms **Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden.**
- Vorbereitung eines Forschungsvorhabens zum **energiegerechten Betrieb von Kirchen**, unter Berücksichtigung der denkmalpflegerischen Aspekte.
- Bereinigung der Zusammenarbeit mit drei **neuen Projekten der Internationalen Energie-Agentur.**
- Koordination und Förderung des **Pilot- und Demonstrationsprogramms im Gebäudebereich.**

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Das Forschungsprogramm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** umfasste Ende 1993 insgesamt 27 vom BEW mitfinanzierte Projekte, von denen 10 Projekte demnächst abgeschlossen werden. Hinzu kommen verschiedene Projekte, welche von anderen Stellen finanziert werden (NEFF, ETH-Rat, andere Bundesstellen). Diese werden indirekt begleitet und mit dem Forschungsprogramm koordiniert.

Das parallel laufende Pilot- und Demonstrationsprogramm **Gebäude, Heizung & Klima** ist erst im Laufe des Jahres 1993 richtig in Gang gekommen. Zu den drei vorhandenen Projekten sind 22 neu eingereicht worden, von denen 14 unterstützt werden und drei abgelehnt wurden. Ein Gesuch wurde zur Forschung, ein weiteres in das P+D-Programm **Solararchitektur** umgeteilt. Vier Gesuche sind beim Programmleiter oder beim BEW noch in Bearbeitung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Arbeiten können wie folgt zusammengefasst werden.

PLANUNGSHILFSMITTEL

Das Projekt **Effiziente Energienutzung in Schulen** [1] konnte mit der Übersetzung der drei wichtigsten Publikationen (Handbuch für Planer [37], Leitfaden für Schulbehörden [38], Beleuchtungstechnik für Schulen [36]) in eine zweite Landessprache (Deutsch resp. Französisch) abgeschlossen werden. Verschiedene Kurse resp. Orientierungen für Planer und Schulbehörden wurden bereits durchgeführt. Die eigentliche Umsetzung, welche im Rahmen des Programms ENERGIE 2000 stattfinden soll, kann jedoch erst 1994 beginnen.

Ebenfalls abgeschlossen sind die Entwicklungsarbeiten zum **Integralen Ingenieursystem "IIS"**, welches mit dem Projekt **Energierelevante Anwendungen integraler Ingenieurwerkzeuge** [2] während 4 Jahren unterstützt wurde. Das IIS wurde in Zusammenarbeit mit dem Paul Scherrer Institut entwickelt. Es ermöglicht die Integration der verschiedenen Planungsarbeiten am Gebäude in ein zusammenhängendes, interaktives Computersystem. Dadurch erlaubt es, wesentlich besser als andere Programme, die integrale Optimierung von Lösungen, besonders aber den Einbezug energetischer Aspekte in den Planungsprozess. Das Softwarepaket, welches auf dem Markt einzigartig ist, wird anfangs 1994 als *Public Domain Software* den interessierten Softwarefirmen für die praktische Anwendung zur Verfügung gestellt.

Beinahe abgeschlossen werden konnte das Programm **Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden** [14, 15, 16, 19], indem die sieben-bändige Publikationsreihe, welche die Ergebnisse des Programms zusammenfasst, praktisch druckbereit vorliegt. 1994 wird die Publikationsreihe noch auf französisch übersetzt. Damit stehen dem Planer im Bereich *Luftströmung und Lüftung* umfangreiche Planungshilfsmittel zur Verfügung.

In Zukunft wird sich deshalb die Forschungstätigkeit in diesem Gebiet auf einige ausgewählte Themenkreise konzentrieren. Ein Beispiel dafür ist die **Effiziente Lüftung grosser Räume** [20] (Hallen, Säle, Atrien etc.), welche unter Schweizer Leitung im Rahmen eines Projektes der Internationalen Energie-Agentur (IEA) untersucht wird. An einem weiteren Projekt, welches die IEA zum Thema *Wohnungslüftung* durchführt, beteiligt sich dagegen die Schweiz nicht. Es besteht jedoch die Absicht, zusammen mit der Lüftungsindustrie vermehrt Pilot- und Demonstrationsprojekte zu realisieren.

Noch laufend ist das Programm **Vermeidung von Kühllast - Passive Kühlung**, welches Wege aufzeigen will, wie im Sommer ohne Kältemaschinen und mit niedrigem Energieverbrauch Gebäude "kühl" bleiben können [4, 5, 6]. Neu gestartet wurde 1993 eine Beteiligung am IEA-Projekt ***Low Energy Cooling*** [28]. In diesem Projekt sollen geeignete Kühlstrategien untersucht, Erfahrungen ausgetauscht und in einem *Handbuch der passiven Kühlung* für den Planer dargestellt werden.

GEBÄUDEHÜLLE

Das Projekt **Hochwärmedämmende Wand- und Dachkonstruktionen** [7] konnte nicht wie geplant anfangs 1993 abgeschlossen werden. Die Ausarbeitung der Dokumentation, welche die bauphysikalischen Aspekte der ausgewählten und inzwischen z.T. optimierten Konstruktionen zeigt, dauert noch an. Die Veröffentlichung ist demnächst vorgesehen. Immerhin konnte die Anwendung und Optimierung in der Praxis fortgesetzt werden. Verschiedene Pilot- und Demonstrationsbauten sind inzwischen auf der Basis der in diesem Projekt entstandenen Konstruktionen gebaut worden (vgl. Titelseite).

Nebst der thermischen Optimierung der Gebäudehülle befasst sich das Programm auch mit der gesamtheitlichen, ökologischen Optimierung von Baukonstruktionen. Im Vordergrund steht dabei das Projekt **Stoff- und Energieflüsse bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen** [11]. Das Projekt ist ein wichtiger Mosaikstein, welcher im Zusammenhang mit anderen Projekten schlussendlich die gesamtheitliche Beurteilung von Baukonstruktionen und -systemen ermöglichen soll. Die Ökobilanzierung der Wärmedämmstoffe aus Mineralfasern, Cellulosefasern, Holzfasern und Schaumglas konnte ohne grössere Schwierigkeiten durchgeführt werden, wogegen es bei den organischen Schaumstoffen (Polystyrol-, Polyurethan- und Formaldehydschaum) sehr schwierig ist, mit den Herstellern zusammenzuarbeiten.

Die Ökobilanzierung von Baustoffen wird noch ergänzt durch zwei Projekte, welche die **Ausgasung von Baustoffen** untersuchen [9, 10]. Mit diesen Projekten werden die Grundlagen für eine bessere Raumluftqualität und einen geringeren Lüftungsbedarf in beheizten Räumen geschaffen.

HAUSTECHNIK

Abgeschlossen werden konnte das Projekt **Optimaler Betrieb von Fussbodenheizungen**, welches primär Regelstrategien für Fussbodenheizungen untersuchte. Das Projekt hat aufgezeigt, dass die witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung, welche weitaus am meisten verbreitet ist, die Fussbodenheizung nicht so gut regelt wie vielfach geglaubt wird. Mit Raumthermostaten sind Einsparungen bis etwa 10 % möglich, mit Sonnenfühlern, welche die Wärmezufuhr bei Sonnenschein drosseln, sogar bis zu 20 %. Der Ende 1993 erschienene Schlussbericht [39] gibt detaillierte Hinweise und Empfehlungen zur optimalen Regelung von Fussbodenheizungen.

Noch laufend sind zwei Projekte, die sich mit dem Heizkessel befassen:

Das Projekt **Energierelevante Typenprüfung von Heizkesseln** [12] hat eine Methode entwickelt, wie ohne Zusatzmessungen der Wirkungsgrad der Heizkessel im Teillastbetrieb, resp. der Jahresnutzungsgrad, bestimmt werden kann. Die Methode wurde an zwei unterschiedlichen Heizkesseln bereits erfolgreich getestet. 1994 sollen ergänzende Tests an sechs weiteren Kesseln durchgeführt werden. Nach anfänglichem Misstrauen sind heute die Heizkesselhersteller an dieser Methode sehr interessiert. Sie erhoffen sich dadurch vor allem Prüfberichte, die ihnen den Zugang zum europäischen Markt erleichtern.

Das zweite Heizkesselprojekt befasst sich mit **organischen Beschichtungen als Korrosionsschutz in Niedertemperaturheizkesseln** [13]. Aufgrund der an der EMPA durchgeführten Laborversuche konnte eine vielversprechende Kunstharzbeschichtung gefunden werden. Diese Beschichtung wurde kürzlich an einem Heizkessel appliziert. Mit den Praxistests wird anfangs 1994 begonnen.

PILOT- UND DEMONSTRATIONSPROJEKTE

Im Rahmen einer Arbeitsgruppe konnte das P+D-Infohandbuch für Programmleiter und kantonale Energiefachstellen überarbeitet werden. Damit kann die Gesuchsbearbeitung speditiver und nach festgelegten Kriterien erfolgen.

Die bearbeiteten Gesuche lassen sich den Gebäudekatergorien nach SIA zuordnen: sieben Einfamilienhäuser, sieben Mehrfamilienhäuser, acht Verwaltungsbauten, Betriebsgebäude, Schulen, jedoch keine Industriebauten.

Das Programm deckt die gesamtheitlichen Aspekte von Gebäudehülle und Haustechnik ab. Es schreibt nicht vor, wie ein angestrebter tiefer Energieverbrauch für ein Gebäude erreicht werden soll. Der Weg dazu führt jedoch meistens über hochwärmedämmende Gebäudehüllen (Transmissionsverluste), mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (Luftwechselwärmeverluste) und Nutzung erneuerbarer Energien (Sonne, Holz).

Gefördert werden aber auch folgende Techniken:

- Haustechnik-Konzepte mit kleinster Leistung;
- neuartige Fenster- und Fassadenelemente,
- passive Raumkühlung,
- ökologisch und ökonomisch optimierte Bausysteme.

Die 1993 bewilligten Demonstrationsbauten sind zum Teil bereits erstellt. Die Erfolgskontrollen (Messungen und Auswertungen) sind im Gange. Die Umsetzungsaktivitäten im Gebäudebereich (Publikationen, Vorträge) werden ab Sommer 1994 erfolgen, wenn die Auswertungen der Heizperiode 93/94 vorliegen.

Nach wie vor sind hervorragende Projekte im Gebäudebereich selten. Vor allem bei den Pilotanlagen ist - aufgrund der höheren Investitionskosten und der gegenwärtigen Finanzlage - eine fehlende Risikobereitschaft zu spüren. Zudem sind die Preise für fossile Brennstoffe auf einem sehr tiefen Niveau, sodass der Anreiz, innovative Projekte zu wagen, zusätzlich gebremst wird. Für 1994 sind die Prognosen allerdings besser.

3. Zusammenarbeit, internationale Kontakte

1993 wurde die Forschungszusammenarbeit mit der schweizerischen Privatwirtschaft näher untersucht [29]. Aufgrund einer bei rund 150 Firmen der Bauwirtschaft durchgeführten Erhebung kann der jährliche **Forschungs- und Entwicklungsaufwand der Privatwirtschaft** im Bereich Energie im Gebäude auf etwa 150 Mio Franken geschätzt werden. Interessant ist, dass davon rund 2/3 auf die international tätige Regelindustrie und rund 10 % auf die ebenfalls international tätige Heizkesselindustrie fallen. Dagegen betreiben die primär in der Schweiz tätigen Unternehmungen (Gebäudehülle, Lüftungstechnik, übrige Haustechnik) nur wenig Forschung und Entwicklung (ca. 25 %).

Gerade wegen dieses Ungleichgewichtes kann ein öffentliches Forschungsprogramm, auch wenn es nur relativ bescheidene Mittel zur Verfügung hat, gezielte Impulse für die Privatwirtschaft geben.

Die **internationale Zusammenarbeit** ist mit der stärker werdenden Ausrichtung auf Europa intensiviert worden. Die Beteiligung an Projekten der EU ist wegen der schweizerischen Ablehnung des EWR-Beittrites jedoch etwas erschwert. Im Moment findet in diesem Programm eine Zusammenarbeit in zwei EU-Projekten statt:

- ***European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption of Office Buildings (IAQ Audit)*** [22]
- ***Projet Européen Joule II PASCOOL*** [6]

Weitere Projektbeteiligungen sind geplant. Viele Gesuchsteller fürchten allerdings den administrativen Aufwand, wenn Gesuche für bestimmte Forschungsbeiträge nicht mehr in der Schweiz, sondern in Brüssel eingereicht werden müssen.

Trotz der Öffnung in Richtung EU findet die internationale Zusammenarbeit nach wie vor hauptsächlich im Rahmen der **Internationalen Energie-Agentur (IEA)** statt. Diese Zusammenarbeit ermöglicht Kontakte nicht nur mit europäischen Ländern, sondern auch mit USA, Kanada und Japan, um drei wichtige Partner zu nennen. Im IEA-Programm ***Energy Conservation in Buildings and Community Systems*** ist die Schweiz momentan an sieben Projekten beteiligt:

- ***Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)*** [17], laufend
- ***Calculation of Energy & Environmental Performance in Buildings (Thermal Modelling)*** [3], Abschluss Mitte 1994
- ***Multizone Air Flow Modelling*** [18], laufend
- ***Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE)*** [8], laufend
- ***Real Time Simulation in HVAC Systems*** [23], laufend
- ***Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures*** [20], 1993 gestartet
- ***Low Energy Cooling*** [28], Ende 1993 gestartet.

4. Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Das Forschungsprogramm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** muss sehr praxisnah sein. Die Umsetzung der Ergebnisse spielt deshalb eine zentrale Rolle. Die wahrgenommenen Möglichkeiten zur Umsetzung sind entsprechend vielfältig:

- Projekte, die bereits sehr praxisnah angelegt sind, in dem sie sich stark auf die Aufarbeitung von vorhandenem Wissen konzentrieren [1].
- Publikationen, die auf ein bestimmtes Zielpublikum ausgerichtet sind [37, 38].
- Zusammenarbeit mit Institutionen und Stellen, die schwerpunktmässig Umsetzung betreiben (ENET, INFOENERGIE, Impulsprogramme).
- Durchführung von Tagungen, Informationsveranstaltungen, Kursen [34, 35].
- Publizieren von Fachartikeln in Zeitschriften [30].
- Konkrete Realisierungen mit Bauherren, z.T. im Rahmen des P+D-Programms.

5. Ausblick

Für 1994 sind folgende Schwerpunkte geplant:

- Konsolidieren der Arbeiten im Bereich der Bauökologie, Zusammenführen der Ergebnisse aus diversen Projekten, Beginn der Umsetzung.
- Start der Behandlung von Problembauten wie Kirchen, Kunsteisbahnen, evtl. Laborbauten und Gastgewerbe.
- Verstärkung der Zusammenarbeit mit ENERGIE 2000.

6. Projektliste

[1] B. Wick, Ing. Büro, *Widen*: ***Effiziente Energienutzung in Schulen (EFFENS).*** (SB)

[2] A. Duppenthaler / R. Mantel, PSI, *Villigen*, & BYRON, *Basel*: ***Energierelevante Anwendungen integraler Ingenieursysteme.*** (ZB + SB)

[3] G. Zweifel, EMPA, *Dübendorf*, & P. Jaboyedoff, SORANE, *Lausanne*: ***Thermische Simulation von Gebäuden.*** (JB)

[4] C. Roulet, EPF - *Lausanne*: ***Refoidissement passif de bâtiments par ventilation naturelle.*** (JB)

[5] H. P. Krüttli, AIR COMFORT, *Winterthur*: ***Einsparung von elektrischer Energie in lufttechnischen Anlagen durch adiabatische Kühlung.*** (JB)

[6] C. Roulet, EPF - *Lausanne*: ***Participation de la Suisse au projet Européen Joule II PASCOOL***

[7] Th. Frank, EMPA, *Dübendorf*: ***Hochwärmedämmende Wand- und Dachkonstruktionen.*** (SB)

[8] P. Steiner, EMPA, *Dübendorf*: ***IEA/ECB Annex 24: Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE).*** (JB)

[9] R. Gehrig / C. Zellweger, EMPA, *Dübendorf*: ***Schadstoffemissionsverhalten von Baustoffen.*** (JB)

[10] G. Meier / Ch. Schlatter, INSTITUT FÜR TOXIKOLOGIE, *Schwerzenbach*: ***Schadstoffimmissionen in renovierten, bewohnten Räumen.*** (ZB + JB)

[11] M. Fischer / K. Richter, EMPA, *Dübendorf*: ***Stoff- und Energiebilanzen von Wärmedämmstoffen.*** (JB)

[12] Th. Cerkez, EMPA, *Dübendorf*: ***Energierelevante Typenprüfungen für Oel- und Gasheizkessel mit Gebläsebrennern.*** (JB +ZB)

[13] M. Faller, EMPA, *Dübendorf*: ***Organische Beschichtungen als Korrosionsschutz in Niedertemperaturheizkesseln.*** (JB)

[14] F. Widder, PSI, *Villigen*: ***Energierelevante Luftströmungen in Gebäuden (ERL).*** (SB)

[15] U. STEINEMANN, *Wollerau*: ***ERL-Publikationsreihe.*** (JB)

[16] C. Filleux, BASLER & HOFMANN, *Zürich*: ***Handbuch neuer Lüftungssysteme.*** (JB)

[17] V. Dorer / P. Hartmann, EMPA, *Dübendorf*: ***IEA : Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC).*** (JB)

[18] C. Roulet, EPF - *Lausanne*: ***IEA : Multizone Air Flow Modelling.*** (JB)

[19] V. Dorer, EMPA, *Dübendorf*: ***Unterlagen Rechenprogramm Interzonenluftströmung COMERL.*** (JB)

[20] A. Moser, ETH - *Zürich*: IEA/ECB-Task 26: ***Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures.*** (JB)

[21] C. Roulet, EPF - *Lausanne*: ***Courant d'air dans les hangars.*** (JB)

[22] C. Roulet, EPF - *Lausanne*: ***European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption of Office Buildings (IAQ Audit).*** (JB)

[23] J. Tödtli, LANDIS & GYR, *Zug*: ***IEA: Fehlererkennung in HLK Anlagen.*** (JB)

[24] W. Hässig, BASLER & HOFMANN, *Zürich*: ***Erfolgskontrolle an Öko-Bürohaus TENUM.*** (JB + ZB)

[25] F. HUSMANN, *Frenkendorf*: ***Temperaturen im Hochregallager.*** (SB)

[26] B. WICK, *Widen*: ***Messprojekt Schulhaus Grünau, Sirnach.*** (JB)

[27] R. FRAEFEL, *Grüningen*: ***Dynamisches Wärmeverhalten innen gedämmter Klassenzimmer.*** (JB)

[28] M. Zimmermann, EMPA, *Dübendorf*: ***Low Energy Cooling.***

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(ZB) Zwischenbericht vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

7. Referenzen

[29] M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Energieforschung und -entwicklung der privaten Bauwirtschaft***, Erhebung 1993

[30] M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Umwelt und Haustechnik: Thesen für ökologisch und ökonomisch vertretbare Entwicklungen***, 12.93 (Heiz. & Lüftung 5/93, Schweiz. Arbeitgeberzeitung 49)

[31] M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Activities and plans of the IEA Future Buildings Forum***, *Innovative Housing Conference, Vancouver* (Canada), 21.-24. Juni 1993

[32] M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Aspects of Future Retrofitting***, *Future Buildings Forum Workshop on Building Envelopes as Energy Systems, Zoetermeer* (NL), 13.-15. Sept. 1993

[33] M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***State of the Art of Advanced Building Technologies in IEA Countries***, *IEA End Use Working Party Meeting, Berlin* (D), 7./8. Oct. 1993

[34] M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Schwerpunkte der zukünftigen Lüftungsforschung***, SIA / VSHL / SWKI-Tagung, *Zürich*, 31. Aug. 1993

[35] M. Zimmermann, H. Bertschinger, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Hochwärmedämmende Wand- und Dachkonstruktionen***, 15. Dreiländer-Holztagung, 21-24. Sept. 1993

[36] P.&D. CHUARD, *Lausanne*: ***Beleuchtungstechnik für Schulen***, EFFENS-Publikationsreihe, Dez.1993

[37] B. WICK, *Widen*: ***Constructions scolaires économes d'énergie - Manuel du concepteur***, SIA/BEW Dokumentation D 090 f, 1993

[38] B. WICK, *Widen*, & M. Zimmermann, KWH / EMPA - *Dübendorf*: ***Ecoles économes en énergie - Guide pour les autorités scolaires***, ENET, 1993

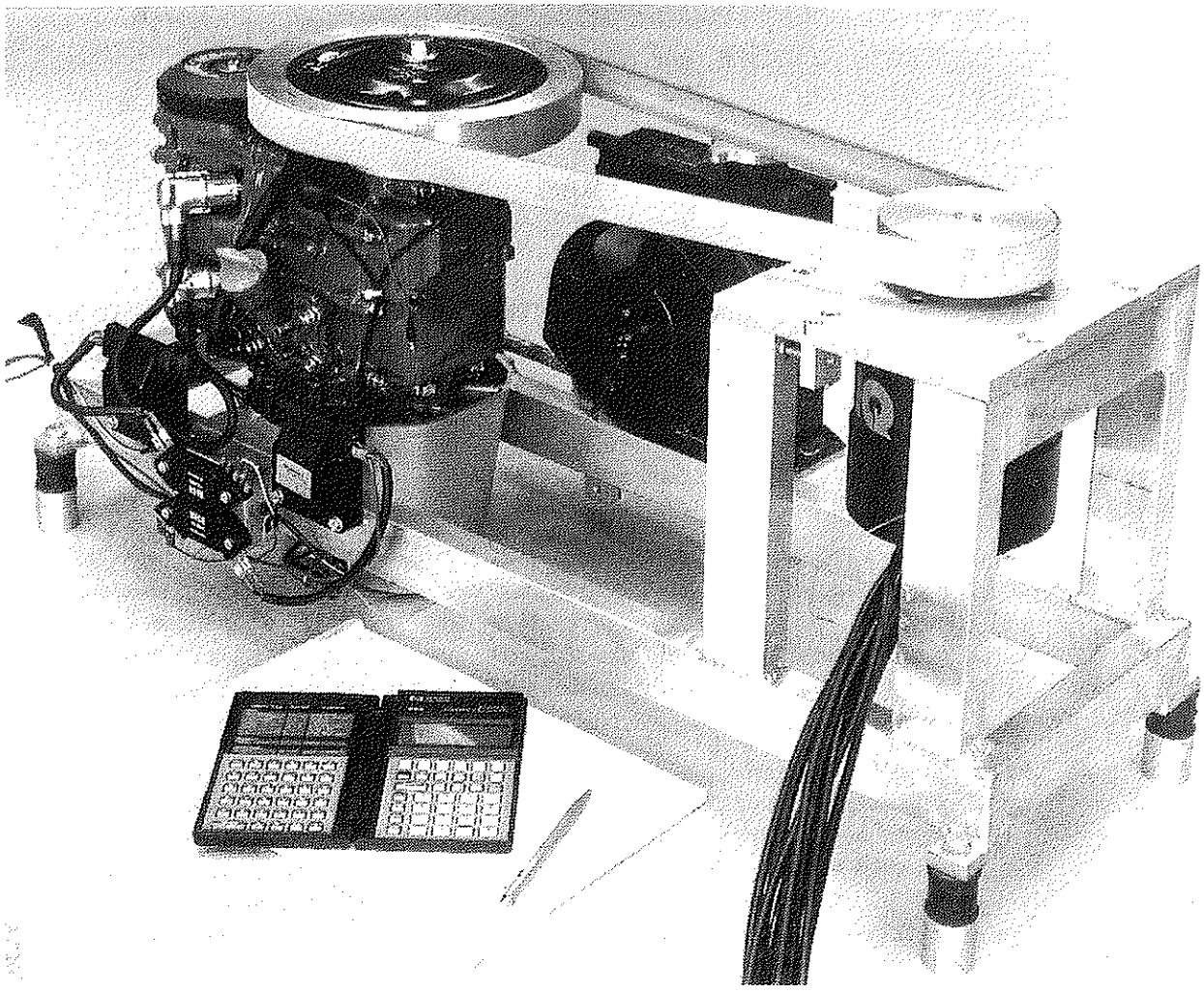
[39] K. FORT, *Volketswil*: ***Optimaler Betrieb von Fussbodenheizungen***, Okt. 1993

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

IM VERKEHR

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: B. Albrecht



Mikrokraftwerk für Leichthybridfahrzeug

Das beim Zentralschweizerischen Technikum Luzern entwickelte Mikrokraftwerk besteht aus dem Verbrennungsmotor, dem Übersetzungsgetriebe und dem Generator mit der dazugehörigen Leistungselektronik.

1. Anvisierte Zielpunkte für 1993

Im Berichtsjahr genehmigte die CORE das für die Periode 1993/95 überarbeitete Forschungsprogramm **Rationelle Energienutzung im Verkehr**, welches nun die folgenden neuen Zielsetzungen enthält:

- Analyse von Hindernissen für einen geringeren Energieverbrauch im Verkehr (Benzinpreis, Bedürfnisse nach Übermotorisierung usw.),
- Unterstützung der Entwicklung von einzelnen gezielten Komponenten anstelle grosser, umfassender Projekte.

Hauptziel für 1993 war neben dem Abschluss, der Umsetzung bzw. der Weiterführung der laufenden Projekte die Vorbereitung und Initialisierung von weiteren erfolgsversprechenden Arbeiten. Neue Projekte wurden dabei in erster Linie aufgrund ihrer Bedeutung bezüglich Energieeinsparung und Verminderung der Umweltbelastung eingeleitet.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

a) Radoptimierung für Leichtfahrzeuge

Das 1991 gestartete Projekt der Arbeitsgemeinschaft HORLACHER/ BUCHER/ ESORO umfasste die Optimierung von Felge und Reifen für Leichtfahrzeuge bis zu einem Maximalgewicht von 900 kg [1]. Das Projektziel war es, auf die speziellen Bedürfnisse von Leichtfahrzeugen optimierte Räder und Reifen zu angemessenen Preisen auf den Markt zu bringen.

Es wurden dabei vor allem die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Felgen: Am Anfang des Projektes wurden verschiedene Werkstoffe und Herstellungsverfahren für leichte, sichere Felgen untersucht, mehrere Radvarianten speziell entwickelt und an den Dimensionen 16- und 17" getestet. Nach der aufgrund dieser Tests definitiv auf 15" festgelegten Raddimension wurde unter Berücksichtigung von Gewicht, Anschlussteilen, Stückkosten, Aerodynamik und Design eine Aluminium-Druckgussfelge entwickelt und allen notwendigen Prüfungen unterzogen. Diese erste optimierte Leichtbaufelge ist inzwischen auf dem Markt erhältlich.
- Reifen: Im Gegensatz zur Felge gelang es nicht, die Reifenentwicklung soweit voranzubringen, dass heute ein Marktprodukt zu einem vernünftigen Preis angeboten werden kann. Der Reifen wurde zwar produziert und war für kurze Zeit im Handel erhältlich, konnte aber wegen der Umstrukturierung des Produzenten nicht die gewünschte Optimierung und Überarbeitung erfahren. Verschiedene andere Hersteller haben sich aber zwischenzeitlich bereit erklärt, Reifen in der gewünschten Dimension 135/65 R 14 nach dem vom Projektnehmer erarbeiteten Anforderungskatalog zu entwickeln.

b) Batteriebetriebenes Elektromotorfahrrad

Dieses Projekt von P. EBERLI in Colombier umfasste die Optimierung des batteriebetriebenen Elektromotorfahrrades *Scoot 92* für die tägliche Anwendung im Nahverkehr, z.B. für den täglichen Arbeitsweg, für Haushaltseinkäufe oder für die Innerorts-Postverteilung [2].

Die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse sind:

- Nach der Erstellung der Gesamtkonzeption und dem Einkauf der aus vorhandenen Benzinmotorfahrrädern übernehmbaren Bauteile konnte im Jahre 1992 die Montage des Elektrofahrrades vorgenommen werden.
- Aus den ersten Testfahrten resultierte ein mittlerer Energie-Verbrauch von 0.09 kWh/km.
- Zum Abschluss des Projektes konnte die Homologierung des Mofas beim Eidgenössischen Polizeidepartement vorgenommen werden.

Weitere Testfahrten werden zur Zeit im Raum Colombier durchgeführt. Dabei gelangt auch die im Rahmen des ebenfalls abgeschlossenen Projektes Nickel-Hydrid-Batterien für ein Elektromotorfahrrad [3] getestete Batterie zum Einsatz.

c) Versuchsbetrieb für ein Elektromotorfahrrad mit Nickel-Hydrid-Batterie

Dieses von S. KAISER in Zürich durchgeführte Projekt umfasste den Einsatz eines Nickel-Hydrid-Akkumulators als Energiespeicher in einem Elektromofa [3]. Der Ruf nach immer leistungsfähigeren Energiespeichern - vor allem seitens der Mikroelektronik mit ihren zahlreichen portablen Anwendungen - führte dazu, dass ein Nickel-Hydrid-Akkumulator bis zur Serienreife entwickelt wurde und nun bei diesem Pilotversuch erstmalig in einem Elektromotorfahrrad eingesetzt werden konnte.

Das Projekt demonstrierte die technische Möglichkeit eines Einsatzes von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren bei einem Elektromotorfahrrad. Ein kommerzieller Einsatz kann aber erst dann in Betracht gezogen werden, wenn die ganze Traktionsbatterie aus wenigen 12 V-Akkumulatorenblöcken zusammengesetzt werden kann. Auch bei der Lebensdauer der Akkumulatoren sind noch Verbesserungen nötig und auch zu erwarten.

d) Optimierung des Asynchronantriebs für Leichtfahrzeuge

Das Projekt der Firma BRUSA in Gams umfasste die Realisierung eines optimierten und kostengünstigen Drehstrom-Antriebssystems für Elektro-Leichtfahrzeuge [4].

Es wurden dabei die folgenden Ergebnisse erzielt:

- Mit Hilfe von verschiedenen Massnahmen konnte zuerst der Wirkungsgrad des Elektromotors von 85 auf 92 % gesteigert und damit die Reichweite des damit betriebenen Leichtelektromobils um 7 % erhöht werden.
- Im zweiten Teil des Projektes wurde die gesamte Fahrzeugelektronik optimiert: Kosteneinsparungen, Leistungserhöhung, Verbesserung des Anfahrverhaltens und die Beseitigung der Störstrahlung sind die wichtigsten Beiträge zur Verbesserung der Antriebselektronik. Im weiteren wurde ein leichtes Bordladegerät mit einer Maximalleistung von 3 kW und einem Wirkungsgrad von 93 % entwickelt.

e) Entwicklung eines Reluktanzmotors für den Einsatz in Elektrofahrzeugen

Das Ziel dieses Forschungsprojektes der Firma BRUSA in Gams war die Realisierung eines Direktantriebs für Elektrofahrzeuge, d. h. die Räder werden direkt von einem Motor, ohne Getriebe und Differential, angetrieben [5]. Dadurch wird die Gesamtkonstruktion des Elektroantriebs bei gutem Wirkungsgrad erheblich vereinfacht, woraus vor allem auch wesentliche Kosteneinsparungen erwartet werden. Bei den bis heute realisierten Direktantrieben mit Synchronmaschinen (z.B. LARAG) kommen sehr teure Magnete zur Anwendung, wodurch ein solcher Antrieb auch in grösseren Stückzahlen nicht entsprechend kostengünstig realisiert werden kann. Der Reluktanzmotor dagegen arbeitet ohne Magnet. Vom Prinzip her ist er etwa gleich aufwendig wie ein Asynchronmotor, was bei grösseren Stückzahlen entsprechend günstige Produktionskosten erwarten lässt.

Mehrere vorbereitende Schritte (Simulation verschiedener Motorgeometrien, Konstruktion von zwei kleinen Prototyp-Motoren, Optimierung der Betriebsparameter und Einbau zweier Antriebe in ein Fahrzeug sowie Feldtests) bildeten die Grundlage für die Realisierung des Direktantriebs. Parallel dazu wurde die mikroprozessorgesteuerte Leistungselektronik entwickelt. Diese enthielt die Evaluation des Mikroprozessors, den Schaltleitungsentwurf, den Leiterplattenlayout sowie die Herstellung und Entwicklung der Software, insbesondere zur Stromregelung.

Leider erlauben die erreichten Ergebnisse noch keine Umsetzung des Projektes in die Praxis. Unter anderem konnte das angestrebte Maximalgewicht des Motors bei weitem nicht erreicht werden. Es wurden jedoch wichtige Grundlagen erarbeitet und wertvolle Teilergebnisse für die Weiterentwicklung dieses vielversprechenden Motors erzielt.

f) Projekt OMEGAZ, Optimierung eines Benzin-Erdgas-Hybridfahrzeuges

Dieses Projekt des LENI an der ETH-Lausanne umfasste die Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines Hybridfahrzeuges mit den Brennstoffen Benzin und komprimiertem Erdgas [6]. Als Ausgangsfahrzeug diente ein RENAULT-EXPRESS Lieferwagen mit dem Serienmotor des RENAULT CLIO 1.4. Hauptziel war, den Benzinmotor auf Zweibrennstoffbetrieb umzubauen und mittels einer elektronischen Steuerung optimal zu betreiben, so dass minimale Energieverbräuche und Schadstoffwerte resultieren.

Aus diesen Arbeiten haben sich folgende Ergebnisse und Erkenntnisse ergeben:

- Mit Erdgas betriebene Fahrzeuge haben das Potential, die besonders während der Wintermonate durch Fahrzeuge verursachten Umweltbelastungen (Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid) zu verringern.
- Das Projekt zeigte aber auch die Grenzen des konventionellen Vergasersystems für die Verwendung von komprimiertem Erdgas bei der Erfüllung der heute in der Schweiz angewendeten Abgasnormen auf. Die Umrüstung bestehender Eindüssysteme auf Erdgasbetrieb benachteiligt diese gegenüber den Benzinsystemen bezüglich Technologie und Qualität.

Aufgrund der Erkenntnisse des abgeschlossenen Projektes beabsichtigen die Projektnehmer die Durchführung eines Nachfolgeprojektes OMEGAZ II. Dabei soll ein Eindüssystem entwickelt werden, das speziell auf die Anforderungen und Bedürfnisse des Erdgasantriebes zugeschnitten ist und insbesondere auch die Erfüllung der gegenwärtig bestehenden Abgasnormen erreicht.

WEITERLAUFENDE PROJEKTE

a) Ökomobil Hybrid III B (Benzin / Elektro)

Dieses bis Ende 1995 dauernde Grossprojekt von 8 ETHZ-Instituten umfasst die Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines umweltschonenden Antriebskonzeptes für ein Ökomobil mit geringem Energieverbrauch und minimalen Emissionen [7].

Folgende Arbeiten wurden bis anhin ausgeführt:

- Sämtliche Konstruktions- und Fertigungsunterlagen wurden im vergangenen Jahr erstellt. Bei verschiedenen Baugruppen ist die Fertigung weit fortgeschritten oder bereits abgeschlossen.
- An verschiedenen Prüfständen konnten wertvolle Daten für die Modellbildung einzelner Teilkomponenten gemessen werden. Für verschiedene Probleme wurden Reglerentwürfe erarbeitet.
- Beim Wärmekreislauf ist es gelungen, einen vollen Lade- und Entladezyklus des Latentwärmespeichers für den Katalysator erfolgreich durchzuführen.

b) ***Vorstudie "moderne Luftschiffe"***

Die Vorstudie der EWI in Zürich soll abklären, inwieweit moderne Luftschiffe eine taugliche, energiesparende Alternative zu herkömmlichen Verkehrs- und Transportsystemen darstellen können [8]. Dazu werden der Stand der heutigen Luftschifftechnik beschrieben und die Anforderungen an ein modernes Luftschiff formuliert.

Gemäss einer ersten Eignungsbewertung mit den Kriterien Einsatztechnik, Wirtschaftlichkeit und Energieverbrauch/Umweltverträglichkeit liegen mögliche Luftschiff-Einsatzaufgaben vor allem im Bereich der mobilen Trägerplattformen, im Bereich Tourismus/Zubringerdienste/Rettungstätigkeit und als "fliegender Kran" für ausgewählte Transportaufgaben.

c) ***Leichthybridfahrzeug (Benzin / Elektro)***

Das seit Beginn 1993 laufende und bis Ende 1994 abzuschliessende Projekt des ZTL Horw hat das Ziel, mit Hilfe eines in ein Leichtmobil eingebauten Hybridantriebs einen möglichst niedrigen Treibstoffverbrauch sowie tiefe Schadstoffemissionen zu erreichen [9].

Als erster Schritt erfolgte die Auslegung und Evaluation der verschiedenen Einzelkomponenten. Der Generator konnte in Zusammenarbeit mit der Ingenieurschule Biel optimiert werden. Als Verbrennungsmotor wurde ein Aussenbordmotor eingesetzt. Dieser 2-Zylinder-4-Takt-Motor wurde mit einer Benzineinspritzung und einer elektronischen Zündung ausgerüstet. Das Leichtfahrzeug wurde durch die Firma HORLACHER mit den nötigen Abänderungen für das "Mikrokraftwerk" (Verbrennungsmotor und Generator mit einer Leistung von 4 kW) gefertigt. Nach der Evaluation und Optimierung der Einzelkomponenten erfolgt nun die Systemoptimierung, wobei das Energiemanagement von entscheidender Bedeutung sein wird.

d) ***Gesamtökologische Beurteilung von Antriebssystemen für Leichtmobile***

Das Ziel des Ende 1993 von der Firma ECOSENS in Brüttisellen begonnenen und bis Mitte 1994 dauernden Projektes besteht darin, aus Sicht der Umweltverträglichkeit optimale Konzepte für Leichtmobile unter besonderer Berücksichtigung von Antriebssystemen (Energieträger, Energieverbrauch) sowie einer Materialanalyse (Konstruktionsmaterialien sowie Konstruktionsart) zu erarbeiten [10]. Zu diesem Zweck werden drei verschieden definierte Leichtmobil-Kategorien (Nahverkehrs- und Pendlerfahrzeug, Reiselimousine und Agglomerations-Kleintransporter) bewertet.

Eine Auflistung der heute kommerziell verfügbaren Leichtmobile, geordnet nach den drei Antriebsvarianten (thermisch, elektrisch und hybrid), zeigt, dass nur wenige der auf dem Markt erhältlichen Fahrzeuge den vorliegenden Definitionen von Leichtmobilen entsprechen. Die verschiedenen Antriebsvarianten werden in Module unterteilt und nach ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet. Durch sinnvolle Kombinationen dieser Module werden dann für alle drei Leichtmobil-Kategorien die gesamtökologisch optimalen Antriebssysteme ermittelt.

e) ***Vorstudie Zweirad-Entwicklung***

Das Ziel dieser vom Verein SOLARMOBILGRUPPE Burgdorf VSMB im Herbst 1993 begonnenen Studie ist die Suche nach Möglichkeiten, die Attraktivität durch Verbesserungen in bezug auf Allwettertauglichkeit, Aerodynamik, Leichtbau sowie Sicherheit und somit den Verkehrsanteil von Fahrrädern zu erhöhen [11]. Um dieses Ziel zu erreichen, wird der aktuelle Stand mittels Literaturrecherche, Interviews, Besichtigungen und Anschreiben von Interessenverbänden dokumentiert. Aus der Analyse des Materials werden Entwicklungspotentiale abgeleitet und deren Chancen und Auswirkungen beurteilt.

f) ***Mechanische Komponenten für Leichtmobile***

Das bis Mitte 1994 dauernde Projekt der Arbeitsgemeinschaft BUCHER/ HORLACHER/ ESORO umfasst die Optimierung von mechanischen Komponenten für die speziellen Bedürfnisse von Leichtfahrzeugen [12].

Das Projekt gliedert sich in zwei Teile: Weiterentwicklung der bewährten Teile und Neuentwicklung der kritischen Komponenten bis zur Umsetzung in eine kostengünstige, umweltgerechte und energieoptimierte Serienfertigung.

Folgende Arbeiten wurden in diesem Jahr ausgeführt:

- Der erste Projektteil wurde mit den letzten Fahrversuchen und den Schlussfolgerungen für die Folgearbeiten beendet.
- Im Rahmen des zweiten Teiles wurde begonnen, die gesamten Konstruktionen im Hinblick auf eine einfachere Fertigung, einfachere Montage und günstigere Herstellung zu optimieren.

g) Grenzüberschreitender Strassengüterverkehr 1993

Das von der Arbeitsgemeinschaft SYGMAPLAN / POLYQUEST in Bern zu bearbeitende Projekt umfasst die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der vom Bundesrat veranlassten Erhebung *Grenzüberschreitender Strassengüterverkehr 1993* [13]. Damit soll die Auslastung der ausländischen Fahrzeuge bezüglich Gewicht und Laderaum, der Abfahrts- und Bestimmungsorte sowie die Art der transportierten Ware erfasst werden.

Diese aktuellen Datengrundlagen sind Voraussetzung zur Ermittlung des Treibstoffverbrauchs, der Verkehrsleistungen, der Luftschadstoffemissionen und des Strassengüterverkehrs. Sie geben auch wichtige Hinweise zur Auslastung der Güterfahrzeuge im Zusammenhang mit der Einführung einer Leerfahrten-/Frachtenbörse.

h) Neuartiger Hybridantrieb für Leichtmobile (Benzin / Elektro)

Dieses Ende 1993 von der Firma ESORO in Zürich begonnene und bis im Frühjahr 1994 abzuschliessende Projekt umfasst die Konstruktion, den Zusammenbau, die Tests auf dem Prüfstand sowie den Einsatz im Leichtbaufahrzeug ESORO *H301 Family* der hybriden Antriebseinheit, die sich in einigen Punkten von allen bisher realisierten Hybridantrieben unterscheidet. Das vorgesehene Prinzip ist eine Variante eines Parallelhybridsystemes, das jedoch speziell auf die Anforderungen der energieeffizienten Leichtmobile ausgerichtet ist. Der Hauptunterschied zu den bekannten Projekten liegt im einfachen Aufbau mit einer minimalen Anzahl Komponenten, dem äusserst geringen Platzbedarf und einer hierfür sehr hohen Leistung. Die Komplexität des Projektes liegt in der Entwicklung des speziell optimierten Motors und im Managementsystem des Motors und der Gesamtanlage.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene wurde regelmässig die fachliche und technische Zusammenarbeit mit den BEW-Programmen **Treibstoffe**, **Leichtelektromobile** und DIANE gepflegt.

Die Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgt projektbezogen. Dies betrifft einerseits die Projekte der technischen Hochschulen und andererseits jene der schweizerischen Hersteller von Leichtfahrzeugen bzw. von zugehörigen Komponenten (HORLACHER, BUCHER, ESORO, BRUSA usw.).

Auf internationaler Ebene befasst sich mit dem Gebiet **Energie und Verkehr** vor allem die Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung (COST, DRIVE usw.). Die bisher im Rahmen von Kongressen und Seminarien hergestellten Kontakte zu den entsprechenden ausländischen Fachstellen (z. B. Internationale Energie-Agentur, Forum für Zukunftsenergien in Bonn usw.) werden laufend erweitert. Ausserdem erfolgt eine laufende Auswertung der neuesten Literatur (z.B. ESA-Datenbanken in Frascati, KOMETH usw.) und der ETDE-Datenbank.

Da Finnland gemäss dem Energie-Forschungsplan 1993 - 1998 des nationalen Energie-Departementes bei der Energieforschung im Bereich Verkehr ähnliche Ziele wie die Schweiz verfolgt, wird mit den zuständigen finnischen Stellen eine Zusammenarbeit gesucht.

4. Transfer in die Praxis

Momentan kann mit keiner vollwertigen Umsetzung in die Praxis gerechnet werden. Dazu fehlt heute der Markt. Die Projektnehmer lassen aber die Ergebnisse laufender oder bereits abgeschlossener Projekte mit Erfolg in ihre neuen Arbeiten einfliessen. Zudem werden die erreichten Ergebnisse regelmässig an Tagungen und Workshops (ETH Zürich: Internationale Konferenz über hybride Antriebe; EAWAG: Leichtmobil-Workshop; Fahrzeugausstellungen usw.) präsentiert und publiziert.

5. P + D - Projekte

Im Jahre 1993 wurden im Rahmen der P+D-Programmleitung keine Projekte unterstützt. Dies rührt daher, dass es sich beim P+D-Programm **Rationelle Energienutzung im Verkehr** um ein reaktives Programm handelt und so von der Programmleitung keine Projekte initiiert werden. Daneben fehlte es im vergangenen Jahr an innovativen und erfolgsversprechenden Projektideen.

6. Ausblick für 1994

Wegen des ungebrochenen Wachstums des Strassenverkehrs liegen die Forschungsschwerpunkte auch für das Jahr 1994 weiterhin beim energiesparenden und umweltverträglichen Personenverkehr sowie beim rationellen Gütertransport.

Als Bestandteil des Programms 1993/95 sind folgende Projekte ab 1994 vorgesehen:

- Optimierung des thermischen Antriebs für Leichtmobile
- Grundlagen für die Inverkehrssetzung von Leichtmobilen
- Weiterentwicklung des kombinierten Güterverkehrs

Das Forschungsprogramm **Rationelle Energienutzung im Verkehr** kann im Rahmen der zur Verfügung stehenden Mittel ergänzt werden. Als weitere Projektskizzen sind im Programm 1993/95 enthalten:

- Umweltverträglichkeitsanalyse für Konstruktionsmaterialien von Leichtmobilen
- Hauptstudie Luftschiffe: Eine energiesparende Alternative für ausgewählte Transportbedürfnisse in der Schweiz
- Hauptstudie Swissmetro

7. Liste der Projekte

[1] Entwicklungsgemeinschaft Leichtmobil EGLM, BUCHER, ESORO & HORLACHER, *Möhlin*: ***Räder und Reifen für Leichtfahrzeuge.*** (SB)

[2] P. Eberli, *Colombier*: ***Batteriebetriebenes Elektromotorfahrrad.*** (SB)

[3] S. Kaiser, *Zürich*: ***Nickel-Hydrid-Versuchsbetrieb mit Elektromofa.*** (SB)

[4] J. Brusa, BRUSA ELEKTRONIK, *Gams*: ***Der Asynchronantrieb im Elektro-Fahrzeug.*** (SB)

[5] J. Brusa, BRUSA ELEKTRONIK, *Gams*: ***Der Reluktanzmotor als Direktantrieb im ElektroFahrzeug.*** (SB)

[6] D. Favrat, LENI /EPFL - *Lausanne*: ***OMEGAZ: Optimisation d'un moteur à essence commutable au gaz naturel comprimé.*** (SB)

[7] K. Eberle, ETH - *Zürich*: ***Ökomobil Hybrid III - ein umweltschonendes Antriebskonzept.*** (JB)

[8] R. Kropf, EWI, *Zürich*: ***Moderne Luftschiffe: Eine energiesparende Alternative für ausgewählte Transportbedürfnisse in der Schweiz; Vorstudie.*** (JB)

[9] M. Chastonay, ZTL *Horw-Luzern*: ***Leichthybrid.*** (JB)

[10] Dr. J.-P. Porchet, ECOSENS *Brüttisellen*: ***Energietechnische und gesamtökologische Beurteilung verschiedener Antriebssysteme für Leichtmobile.*** (JB)

[11] A. Schmid, Verein SOLARMOBILGRUPPE Burgdorf VSMB *Bern*: ***Umweltfreundliches Nahverkehrsmittel - Vorstudie Zweirad-Entwicklung.*** (JB)

[12] Entwicklungsgemeinschaft Leichtmobil EGLM, BUCHER, ESORO & HORLACHER, *Fällanden*: ***Mechanische Komponenten für Leichtmobile.*** (JB)

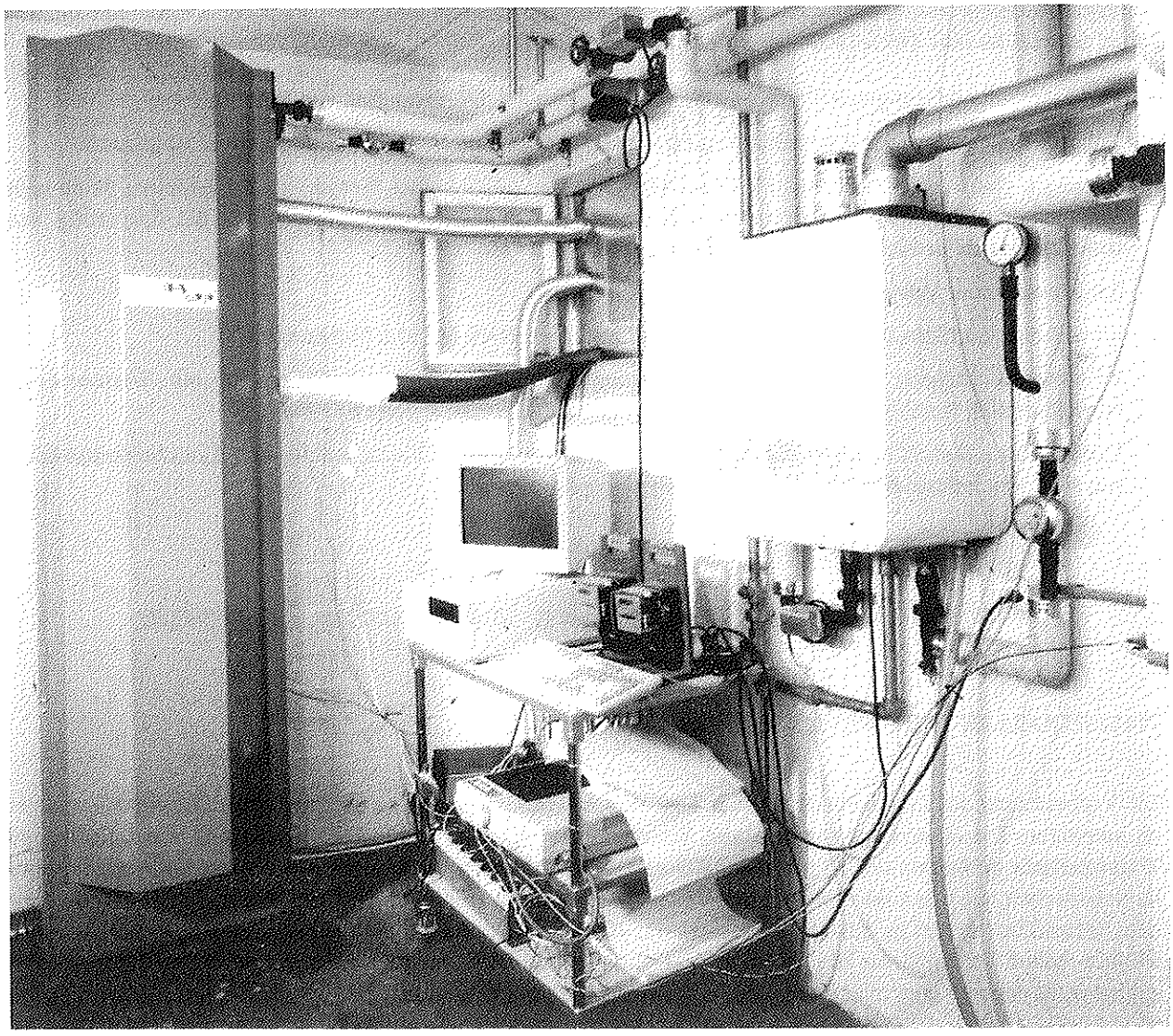
[13] SIGMAPLAN, *Bern*: ***Grenzüberschreitender Strassengüterverkehr 1993.*** (ZB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(ZB) Zwischenbericht vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

UMGEBUNGS- UND ABWÄRMENUTZUNG, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Martin Zogg



Diffusions-Absorptionswärmepumpe

Gegenüber einem gewöhnlichen Gaskessel konnten in der letzten Heizsaison mit dem links abgebildeten **geräuschlosen, FCKW-freien und verschleisslosen Aggregat** 30% an Erdgas für den Grundheizbedarf - oder ca. 15% für den totalen Heizbedarf eines Einfamilienhauses - eingespart werden.

1. Programmübersicht und Programmziele

Das Forschungsprogramm **Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung** befasst sich mit der Nutzung der Umgebungswärme (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) und von Abwärme (Gebäude, industrielle Prozesse usw.) zur Raumheizung und zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme. Dazu sind im allgemeinen Wärmepumpen zur Anhebung des Temperaturniveaus erforderlich.

Mit der Kombination Blockheizkraftwerk (BHKW)/Elektrowärmepumpe, einer Gasmotorwärmepumpe oder einer Absorptionswärmepumpe lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **bereits heute 30 bis 45% an Primärenergie einsparen und damit die CO_2-Emission entsprechend reduzieren.** Hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Betriebssicherheit und Kosten sind aber noch bedeutende Verbesserungen möglich. Zudem sind die FCKW-Kältemittel in weiteren Bereichen durch umweltverträgliche Kältemittel zu ersetzen, und es sollten zur Spitzenlastdeckung von Wärmepumpensystemen vermehrt erneuerbare Energien verwendet werden können. Wir haben deshalb im Jahr **1993 die folgenden Hauptziele** verfolgt:

- Verbessern der Nutzung von Umgebungsluft und Erdreich als **Wärmequellen** von Wärmepumpen,
- besseres Beherrschen der **Wärmeübertragung** - insbesondere beim Verdampfen alternativer Kältemittel,
- Aufzeigen praktikabler Lösungen für den Ersatz der FCKW-Kältemittel, Verbessern der Effizienz durch neue Kompressoren mit variabler Drehzahl und Entwickeln von Kleinwärmepumpen für die Sanierung von Altheizungen im Bereich **konventioneller Wärmepumpen,**
- Realisieren **neuer Wärmepumpenkonzepte,**
- Entwickeln von **Klein-Blockheizkraftwerken** im Leistungsbereich bis 15 kW-thermisch,
- Bereitstellen besserer Werkzeuge zur **Auslegung** und Optimierung von Heizungen mit Wärmepumpen (einschliesslich Kombination mit Holzheizungen) und Blockheizkraftwerken,
- Steigern der Effizienz und Betriebssicherheit von Heizsystemen mit Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken wie auch von industriellen Prozessen durch **Systemoptimierung.**

2. Durchgeführte Forschungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

WÄRMEQUELLEN UND WÄRMEÜBERTRAGUNG

Die Verbesserung der Jahresarbeitszahl von Luft-Wasser-Wärmepumpen mit durchströmten Schotterschüttungen ist umstritten. Die **Messkampagne an einem Schotterkoffer** zur Vorwärmung der Ansaugluft von Luft/Wasser-Wärmepumpen in Regensdorf [1] sollte zur Klärung dieser Frage beitragen. Infolge schlechter Strömungsführung im Schotterbett entsprach die "Temperaturpufferwirkung" nicht den Erwartungen. Der Wasserdampfaustausch mit dem Schotterbett führte zu hohen Luftfeuchten am Austritt aus dem Schotterbett und damit zu einem aussergewöhlich hohen Zeitanteil für das Abtauen des Verdampfers. Dies erklärt, warum die erreichten Jahresarbeitszahlen nicht deutlich über jenen "normaler" Luft/Wasser-Wärmepumpen lagen.

Zur ökologisch unbedenklichen, direkten Verdampfung der Kältemittel in Erdwärmesonden wurde eine Sonde entwickelt, welche den Austritt von Kältemitteln ins Erdreich verunmöglicht. Für eine solche **Sicherheits-Erdwärmesonde für Direktverdampfung** werden entsprechende Leck-Detektionsmethoden und der zusätzliche Wärmetransportwiderstand durch den mit Wasser-Glykolgemisch gefüllten Schutzraum untersucht [2]. Der gleichzeitig an einem Einfamilienhaus laufende **Feldversuch** wird noch bis zum Ende der Heizperiode 93/94 verlängert.

In [3] wurden sieben **umweltverträglich wässerige Wärmeträger** für den **Wärmetransport aus Erdwärmesonden** zum Verdampfer von Wärmepumpen verglichen. Es zeigte sich, dass mit wässerigen Salzlösungen anstelle von Wasser-Ethylenglykol die Sondenlänge um rund 10% verkürzt werden könnte. Dem können allerdings Korrosionsgefahren entgegenstehen. Ziel des Vorhabens [4] ist das Schliessen von Wissenslücken zur Dimensionierung der hochwirksamen **Plattenwärmeübertrager**. Nach Beheben von Problemen bei der Massendurchflussmessung konnte der Widerstandsbeiwert in allen Strömungsbereichen gemessen und durch Näherungsgleichungen korreliert werden. Messungen zur Wärmeübertragung wurden erst für den turbulenten Strömungsbereich durchgeführt.

Zum **Wärmeübergang bei der Verdampfung neuer Kältemittel** konnten für R134a, R123, R404A (HP62), R402A (HP80) und mit konventionellen Kältemitteln als Vergleichsbasis Versuche in **Rohren mit glatter Oberfläche** durchgeführt werden [6]. Die Messungen bestätigen die geringe Genauigkeit der bisher verfügbaren Berechnungsgleichungen. Als Basis für eine verlässlichere Korrelation wurde die Zweiphasenströmung des verdampfenden Kältemittels für die verschiedenen Verdampfungsbereiche durch eine Hochgeschwindigkeitskamera erfasst. Die Verdampfung in **Rohren mit verbesserter Oberfläche und bei der Anwesenheit von Schmieröl** ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

WÄRMEPUMPEN UND WÄRMEÜBERTRAGUNG

Im Projekt **Praxisversuche für den Ersatz des Kältemittels R502** wurde ein direkter Vergleich zwischen dem FCKW-Kältemittel R502 und drei alternativen Kältemitteln in einer kommerziellen Sole/Wasser-Wärmepumpe angestellt [3] . Die Versuche wurden mit den **nahezu azeotropen Kältemittelgemischen HP81, HP80 (R402) und HP62** gefahren. Am besten schnitt dabei auch thermodynamisch das chlorfreie HP62 ab. Durch Ersetzen des in Kürze für Neuanlagen verbotenen R502 durch das Gemisch HP62 sind **auch in bestehenden Wärmepumpen vergleichbare Heizleistungen und Leistungszahlen** zu erzielen. In dieser Arbeit wurde auch der optimale Weg zum Umrüsten alter Anlagen auf die alternativen Kältemittel HP81, HP80 und HP62 erprobt.

Die Messungen der elektrischen Leistungsaufnahme und des Liefergrads von **Rollkolbenkompressoren** muss auf 1994 verschoben werden [8]. Die Forschungsarbeit über **drehzahlgeregelte Scrollverdichter** [9] konnte dagegen abgeschlossen werden. Sie bestätigt die gute Eignung drehzahlgeregelter Scrollverdichter für Wärmepumpen. Die erarbeiteten **Berechnungsmodelle** erlauben die Übertragung der Verdichtercharakteristik auch auf neue Arbeitsfluide. Als Schwerpunkt wurde der **Leckagemechanismus** eines Scrollverdichters mit Öleinspritzung untersucht.

Die neu entwickelte **steckerfertige Luft-Wasser-Kleinwärmepumpe** "EcoCal" kann als Ergänzung zu bestehenden Öl- oder Gasheizkesseln deren Emissionen wirkungsvoll reduzieren [10]. Die **Prüfstandmessungen** ergaben beim kleineren der bisher gebauten Typen bei 7°C / 35°C eine Heizleistung von 3050 kW und eine Leistungszahl von 3.4. Die **Feldmessungen** mit diesem Typ in sechs Einfamilienhäusern lieferten mittlere Arbeitszahlen von 3.35 und einen mittleren Anteil der durch die Wärmepumpe gedeckten Heizwärme von 48%. Eine Weiterentwicklung bis zur Serienproduktion ist ausserhalb des Projekts vorgesehen. **Vergleichsmessungen** zwischen **Monofluid-** (Direktverdampfung im Erdkollektor, Direktkondensation im Heizsystem) **und Multifluidwärmepumpen** (übliches System) **mit Erdkollektoren** haben zu schwer interpretierbaren Ergebnissen geführt [11]. Das Projekt konnte deshalb noch nicht abgeschlossen werden.

In [31] wurde ein handelsüblicher Typ eines **Wärmepumpen-Warmwassererwärmers** in drei Einfamilienhäusern ausgemessen. Die Messungen ergaben **Jahresarbeitszahlen** von lediglich **1.7 bis 2.0** (hohe Bereitschaftsverluste!). Der Erdboden in Kellerräumen erwies sich als wenig ergiebige Wärmequelle. Für einen sinnvollen Betrieb ist man auf Verlustwärmequellen am Standort des Wärmepumpenboilers angewiesen. Andernfalls betreibt man mit Wärmepumpen-Warmwassererwärmern lediglich einen **Wärmediebstahl** vom Heizsystem.

Der bereits 1989 gestartete **Versuchsbetrieb mit einem Stirling-Motor-BHKW** aus einer Nullserie eines amerikanischen Herstellers erlitt mehrere Rückschläge. Im Winter 93 fiel der Stirling-Motor völlig aus [12]. Seit dem November 93 befindet sich die Anlage in überwachtem Dauerbetrieb. Auch das **neue Konzept einer Gaskältemaschine nach dem Stirling-Prinzip** mit Verdichtung und Expansion durch je ein Flügelrad mit rotierendem Flüssigkeitsring vermochte bisher leider nicht zu überzeugen. Immerhin konnte sein prinzipielles Funktionieren nachgewiesen werden [13].

Ziel der laufenden Forschungsarbeiten an einer **Wärmepumpe mit Stirling-Antrieb und Resonanzrohr** ist eine Wärmepumpe, welche gegenüber der Verbrennung in konventionellen Kesseln **Energieeinsparungen in der Grössenordnung von 35 - 40 %** ermöglicht [14]. Um auf hohe, unterhaltsfreie Betriebszeiten zu kommen, wird der übliche Motorkolben durch ein Resonanzrohr ersetzt. Damit entfallen die bei den bekannten Stirling-Wärmepumpenkonzepten hochbeanspruchten dynamischen Dichtungen. Nach einer eingehenden theoretischen Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Systems wird eine **neue Versuchsanlage** aufgebaut.

Die grosse **LiBr-Absorptionswärmepumpe** im lokalen Fernwärmenetz einer Grossüberbauung konnte infolge technischer und organisatorischer Probleme leider auch 1993 nicht voll in Betrieb genommen werden [15].

Die **Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe DAWP (Titelbild)** mit einer Heizleistung von rund 3.5 kW bewies ihre Praxistauglichkeit im Rahmen von **Feldversuchen** in zwei Einfamilienhäusern [16]. Aus den Messungen über eine ganze Heizsaison wurde ein auf das eingesetzte Erdgas bezogenes **Jahreswärmeverhältnis von 1.42** erzielt. Die mit einem DAWP-Modul erreichbare Jahreseinsparung an Erdgas beträgt 400 bis 500 m3. Für grössere Wärmeleistungen lassen sich mehrere Module parallel schalten. Ein **ventilatorloser Luftkühler** (ebenfalls geräuschlos!) wurde bereits entwickelt und erfolgreich getestet. Die in den Feldversuchen ermittelten Leistungsdaten wurden durch unabhängige Messungen an einem dritten Prototypen im wesentlichen bestätigt [16]. Dort wurden in **Laborversuchen** nach DIN 8900/33830 bei 0/35°C **Wärmeverhältnisse von 1.43** und bei 0/50°C von 1.35 ermittelt. Beim Aufstellen der DAWP im Wohnbereich erhöhen sich diese Werte durch Nutzen des Wärmeverlusts auf **1.50** beziehungsweise 1.42. Durch einfaches Vertauschen der Anschlüsse wurde die DAWP im Sommer 1993 **auch zur Raumkühlung** mit einer Kühlleistung von ca. 1 kW erfolgreich eingesetzt. Es wird angestrebt, diese interessante Schweizer Entwicklung zu einem Massenprodukt zu bringen.

Die Versuche mit einem Pilot-**Klein-Blockheizkraftwerk** zur Heizgrundlastdeckung mit einem Einzylinder-Erdgas-Magermotor eines deutschen Herstellers konnten infolge von Verzögerungen am Bau des Gebäudes noch nicht gestartet werden [17].

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen an einem Funktionsmuster eines **Freikolben-Stirling-Generators** mit einer elektrischen Leistung von 300 W wurden erfolgreich beendet [18]. Zahlreiche konstruktive Verbesserungen führten an der untersuchten Laboranlage zu einem **Dauerbetrieb mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 12 %**. Das im Rahmen dieses Projekts entwickelte **Simulationsprogramm** wurde anhand zahlreicher Experimente validiert. Für den Bau eines Prototypen mit 1,5 kW elektrischer Leistung bahnt sich mit der Unterstützung des NEFF eine erfreuliche **Zusammenarbeit mit der Industrie** an.

AUSLEGUNG UND SYSTEMOPTIMIERUNG

Die Entwicklung des **detaillierten Simulationsprogramms** *HPDesign* konnte für die Optimierung **einstufiger Luft-Wasser-Kompressionswärmepumpen** vorerst abgeschlossen werden [19]. Das Programm *HPDesign* kann durch die Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen bezogen werden. Es bewährte sich in einem Praxistest [20] zur Optimierung der Komponenten eines kommerziellen Wärmepumpensystems. Im Rahmen eines weiteren Ausbaus dieses Programms wird eine **detailliertere Berechnung des Verdampfers** angestrebt.

Für die Planung und Optimierung von WKK-Anlagen werden eigentliche Simulationsprogramme infolge der grossen Zahl von Eingabedaten von planenden Ingenieuren nur sehr eingeschränkt benützt. Als Kompromiss

zwischen der bisherigen unzulänglichen statischen Auslegung und einer echten Computersimulation wurde deshalb die **Tagesgangmethode** zur Berechnung von Heizsystemen mit Blockheizkraftwerken [21] und mit Wärmepumpen [22] verbessert. Sowohl das Programm **WKK-Calc** für Blockheizkraftwerke wie auch das Programm **WP-Calc** für Wärmepumpen wurden mit einer graphischen Benützeroberfläche (Excel 4.0 für *Windows*) versehen. Beide Programme wurden in enger Zusammenarbeit mit der Praxis (RAVEL-Kurse) entwickelt und enthalten auch detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Sie werden im Rahmen der P+D-Aktivitäten weiter gefördert. Obwohl neben der Näherung der Tagesgangmethode die Speicherbewirtschaftung mit nur zwei thermischen Schichten modelliert wird, zeigte die **Validierung des Programms WKK-Calc** an zwei Objekten [21], dass die monatliche Betriebszeit und die monatliche Wärmeleistung praktischer BHKW-Anlagen mit sehr guter Genauigkeit berechnet werden kann. Die auf die jeweiligen Monatsmittelwerte bezogenen Abweichungen der gemessenen von den berechneten Stundenwerten des Wärmebezugs sind jedoch erheblich.

Die **Kombination einer Elektrowärmepumpe mit einer Holzheizung** zur Spitzendeckung stellt eine bezüglich Reduktion der CO_2-Emission interessante Lösung zu herkömmlichen Konzepten dar. Sie erfüllt auch das ENERGIE 2000-Ziel einer erhöhten Nutzung erneuerbarer Energien und vermag den Komfort von Holzheizungen wesentlich zu verbessern. Die beiden Wärmequellen mit sehr unterschiedlicher Charakteristik bedürfen aber einer sorgfältigen Systemabstimmung. Diese erfolgte mit dem **Simulationsprogramm** YUM (*Yearly Utilization Model*), das entsprechend erweitert und validiert wurde [23].

Im Rahmen einer Studie zur **Prozessintegration** [24] wurde am Beispiel der Produktionsstrassen einer Schweizer Teigwarenfabrik eine energetische Analyse mit der **Pinch-Methode** durchgeführt. Dabei wurden Energiesparpotentiale bis zu 50% festgestellt. Zur **Erweiterung der Pinch-Methode auf diskontinuierliche Prozesse** [25] erwies sich ein bestehendes Berechnungsmodell als ungenügend und es wurden diverse Verfeinerungen vorgeschlagen. In diesem Projekt wird auch eine interessante **Verbindung der Pinch-Methode mit der exergetischen Analyse von Prozessen** hergestellt.

Dynatherm, eine **neue Strategie zur Systemidentifikation** nichtlinearer thermischer Systeme, konnte am Beispiel eines Wärmeübertragers einer Klimakammer erarbeitet und validiert werden [26]. Das Besondere der Methode Dynatherm beruht auf einer **Trennung** thermischer Systeme in einen **nichtlinearen statischen Teil** und einen **linearen dynamischen Teil**.

Die bisherigen statischen und quasistatischen Simulationen sind für das optimale Betreiben von Fernwärmeanlagen nur bedingt geeignet. Deshalb wurde ein Simulationsprogramm zur **dynamischen Simulation von Fernwärmeanlagen** entwickelt [27]. Das Simulationsprogramm DYNA beruht auf der dynamischen Modellierung des Wärmeerzeugers, des hydraulischen und thermischen Verhaltens des Fernwärmenetzwerks wie auch der angeschlossenen Wärmeverbraucher. Es wurde an der Fernwärmeversorgung der Stadt Lausanne **validiert**.

Zur **dynamischen Planung und Optimierung von WKK-Anlagen** werden anhand einer messtechnischen Analyse von fünf Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 160 bis 370 kW im praktischen Betrieb Grundlagen bereitgestellt [28]. Der erste Schritt zur Verbesserung der **Verfügbarkeit von WKK-Anlagen mit Gasmotorantrieb** ist eine Analyse des Istzustands. Deshalb werden die Betriebsausfälle an 17 BHKW-Modulen, 3 Gasmotorwärmepumpen und einer Totalenergieanlage systematisch untersucht [29].

Im Rahmen der Entwicklung eines **rechnergestützten Betriebsführungssystems** wurden in einer ersten Etappe die entsprechenden Module für **Blockheizkraftwerke** erarbeitet [30]. Während das **Expertensystem**-Modul zur **Störungsdiagnose** weitgehend von einem früheren Projekt übernommen werden konnte, war das **Modul für die Abnützungsprädiktion** neu zu entwerfen. Bei der noch wenig etablierten Abnützungsvorhersage wurde für die zu erwartende Restlebensdauer eine Kombination von Abnützungsmodellen mit periodischen Istzustandsmesungen vorgeschlagen. Als Beispiel wurde für Abgaskatalysatoren ein Abnützungsmodell hergeleitet und mit Versuchsergebnissen verglichen. In einer zweiten Etappe werden diese Arbeiten weitergeführt und das Störungsdiagnose-Expertensystem zusammen mit einem **Industriepartner realisiert, validiert** und wenn nötig modifiziert.

Als Alternative zu elektrischen Trocknungssystemen (Tumbler, Trockenschrank, Raumluftentfeuchter) wurde die **Wäschetrocknung** im Trocknungsraum **mit geregeltem Luftwechsel und geregeltem Wärmeeintrag aus dem** (nicht-elektrischen) **Raumheizungssystem** durch Computersimulation und in zwei Mehrfamilienhäusern experimentell untersucht [32]. Bei dieser alternativen Trocknungsart werden der Aussenluftwechsel und der Heizwärmeeintrag in Abhängigkeit der Zustände der Raumluft und der Aussenluft gesteuert. Entsprechende Steuerstrategien wurden entwickelt und praktisch erprobt. Es wurden spezifische Trocknungsenergiewerte im Bereich von 1 kWh/kg Trockenwäsche erreicht (Praxiswerte üblicher Systeme 2 - 4 kWh/kg).

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit ; Transfer in die Praxis

Innerhalb der "Programmfamilie" - mit einbezogen sind auch durch den NEFF finanzierte Forschungsvorhaben - fand zwischen verschiedenen Projektmitarbeitern und Institutionen ein reger Informationsaustausch statt. Um diesen zu intensivieren, wurde am 22.12.93 an der Ingenieurschule Burgdorf ein **erster Workshop** mit drei Vorträgen zu den Projekten [14], [16] und [23] durchgeführt.

Gegenüber dem neuen Programm **Geothermie** wurden die "Grenzen" wie folgt festgelegt: **Erdregister** und ähnliche Nutzungssysteme für Tiefen von 10 - 15 m gehören zum hier beschriebenen Programm. Bei **Nutzungssystemen für Tiefen über 15 m** liegt die Trennung der beiden Forschungsprogramme zwischen dem Erdreich und der Hinterfüllung.

Da **etwa die Hälfte der Projektarbeiten von privaten Firmen durchgeführt** wurde, ist die **direkte Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft sehr eng**. Die gleichzeitige Bearbeitung von Projekten durch Hochschule und Industrie hat sich als besonders fruchtbar erwiesen: z.B. [2, 8, 10, 16, 31]. Sieben [2, 4, 10, 14, 16, 23, 32] der 32 Forschungsarbeiten führen mit grosser Wahrscheinlichkeit direkt zu **neuen Produkten** im Sinne der eingangs erwähnten Zielsetzungen. Die Ergebnisse der Arbeiten [12, 17, 18] sind **gute Grundlagen für eine industrielle Weiterentwicklung**. Die entsprechenden Industrieverbindungen bestehen bereits.

In einer grossen Zahl von Projekten konnten **Wissenslücken bei der Auslegung und Optimierung geschlossen** werden. Die erarbeiteten Berechnungsgrundlagen werden in erster Linie durch Publikationen in den einschlägigen Fachzeitschriften und Vereinsorganen - die wir in der Schweiz in diesem Forschungsbereich glücklicherweise besitzen - verbreitet. Wo nötig hilft der Programmleiter mit Kurzfassungen nach. An der Herbsttagung des Schweizerischen Vereins für Kältetechnik SVK wurde über das Vorhaben [7] berichtet.

Die **internationale Zusammenarbeit** fand vorab über die schweizerische Beteiligung im IEA-Programm ***Advanced Heat Pumps*** statt. Im Rahmen des Projekts ***Experiences with new refrigerants in evaporators*** hat die Schweiz aus den Projekten [6] und [19] wertvolle Beiträge auch zum inzwischen erschienenen, sehr lesenswerten Schlussbericht [33] geleistet. Innerhalb des ***Heat Pump Center*** werden durch Mitgliedländer wertvolle Informationen über die Anstrengungen zur Förderung der Wärmepumpentechnologie in Politik, Forschung und Entwicklung ausgetauscht. Insbesondere fand dieses Jahr ein intensiver Gedankenaustausch mit dem Direktor der technischen Abteilung des *Heat Pump Center* von Japan statt.

Nebst dieser institutionalisierten Zusammenarbeit haben Projektleiter und Projektmitarbeiter an den folgenden **internationalen Tagungen** über ihre Ergebnisse orientiert: *IEA Heat Pump Conference*, Maastricht, NL [19, 25] in [34], Internationale Stirling-Konferenz 93, Eindhoven, NL [14, 18], *Energy Systems and Ecology* 93, Krakau, PL [25], *26ème congrès de l'UNICHAL (Union Internationale des Distributeurs de Chaleur)*, Paris [27]. Über die Projekte [8, 25] werden auch enge Beziehungen zum ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) und zum *Harwell Laboratory* in England gepflegt.

4. Ausblick für 1994

Da laufende Projekte bereits weit über der Hälfte des Programmbudgets 94 beanspruchen, ist der Spielraum für neue Vorhaben eng, d.h. eine deutlichere Beschränkung auf das **Hauptziel einer Erhöhung der Jahresarbeitszahl** von Wärmepumpenheizsystemen. Daneben drängt sich - wie in anderen IEA-Ländern - ein **vermehrtes Engagement im Bereich der Absorptionswärmepumpen** auf.

5. Projets P+D de chaleur ambiante et de rejet de chaleur

(Chef du programme : Fabrice Rognon)

En 1993, au total 24 projets ont bénéficié d'un soutien financier dans le cadre du programme P+D de chaleur ambiante et de rejet de chaleur. Trois axes principaux caractérisent les projets soutenus:

- **la combinaison couplage chaleur-force et pompe à chaleur**, notamment pour des chauffages collectifs (petits réseaux de chauffage à distance);
- **l'utilisation** pour les pompes à chaleur électriques **de sources de chaleur jusqu'ici peu ou pas utilisées** qui permettent également d'améliorer sensiblement les performances;
- la mise en oeuvre de couplage chaleur-force ou de pompe à chaleur utilisant des **technologies nouvelles à l'échelle 1:1.**

La majorité des projets sont la mise en application ou le prolongement de projets de recherche antérieurs. Il est à relever que le nombre de projets déposés en 93 est en augmentation par rapport à l'année précédente et que la qualité des projets est généralement bonne: seuls deux projets ont été refusés.

Les priorités pour 1994 s'établissent sur deux plans:

- Sur le terrain, il est indispensable de **continuer selon les axes définis** et, surtout, de cerner plus activement les potentiels de réalisation et les segments de marché à soutenir. Dans cette optique, la fondation en automne 1993 du **Groupement promotionnel Suisse pour la pompe à chaleur** nous ouvre des perspectives d'action coordonnée intéressantes.
- Au niveau du **suivi des projets en cours ou achevés** (appelé aussi *controlling*), il est prévu de dresser le bilan énergétique et financier de chaque projet ainsi que de tous les projets additionnés. Ce bilan nous fournira la base de décision pour modifier ou affiner nos priorités.

6. Liste der Forschungsprojekte im Jahr 1993

[1] W.J. Eugster, R.Hopkirk, POLYDYNAMICS- *Zürich*: ***Messprojekt Schotterkoffer EKZ Regensdorf.*** (SB)

[2] K. OCHSNER, *Marthalen* & ETH - *Zürich*: ***Sicherheits-Erdwärmesonden für Direktverdampfung.*** (JB)

[3] R.J. Hopkirk, POLYDYNAMICS - *Zürich*: ***Eigenschaften von Wärmeträgerflüssigkeiten.*** (SB)

[4] A. Bölcs, LTT / EPF - *Lausanne*: ***Etudes expérim. & théor. des échangeurs des chaleurs à plaques.*** (JB)

[5] H. Wälchli, HTL - *Biel*: ***Kondensatoroptimierung für Lösungsmittel-Rückgewinnung.*** (JB)

[6] D. Favrat, LENI / EPF - *Lausanne*: ***Evaporation de nouveaux réfrigérants sur des tubes à surface améliorée.*** (JB)

[7] F. von Allmen, SCHECO - *Winterthur*: ***Praxisversuche für den Ersatz des Kältemittels R502 durch HP81, HP80 und HP62.*** (SB)

[8] M. Ehrbar, HTL - *Buchs*: ***Messungen an Wärmepumpen-Kompressoren.*** (JB)

[9] Th. Affjei, LES / ETH - *Zürich*: ***Scrollverdichter mit Drehzahlvariation.*** (SB: Dissert. ETH Nr.10 069)

[10] M. Lippuner, HOVAL INTERLIZ - *Vaduz*: ***Kompakt Wärmepumpe - Messphasen 1 und 2.*** (SB)

[11] R. Rhyner, CREM - *Martigny*: ***Test comparatif de deux pompes à chaleur.*** (JB)

[12] B. Nussbaumer, EICHER + PAULI - *Bern*: ***Versuchsbetrieb mit Messkampagne am Stirling-Motor SIBP Zollikofen, Phase 1.*** (JB)

[13] K. Malach, HTL-*Bern*: ***FCKW-freies Kälteaggregat, Bau & Ausmessung eines Funktionsmusters.***(SB)

[14] J.P. Budliger, TELMECO, *Plan-les-Ouates*: ***Wärmepumpe mit Stirling-Antrieb und Resonanzrohr.*** (JB)

[15] P. Krüsi, AMENA - *Schlieren*: ***Messprojekt "Im Bilander" Brugg.*** (JB)

[16] H.Stierlin, U. Wassermann, CREATHERM, *Schlieren* & W. Dörfler, J. Bösel, IfVK / ETH - *Zürich*: ***Messungen an Diffusions-Absorptions-Wärmepumpen DAWPt.*** (SB)

[17] R. Ruch, EICHER + PAULI, *Liestal*: ***Klein-Blockheizkraftwerk-Anlage.*** (JB)

[18] Ch. Gaegauf, S.Delzer, Th.Schmidt, H.P. Zumsteg, ÖKOZENTRUM - *Langenbruck*: ***Untersuchung eines Freikolben-Stirling-Generators.*** (SB)

[19] M.R. Conde, LES / ETH-*Zürich*: ***A Contribution to Heat Pump Design by Simulation.*** (SB: Diss. 9870)

[20] M.R. CONDE - *Zürich*: ***Simulationsmodelle Kompressions-Wärmepumpe, Vorphase und Phase 1.*** (JB)

[21] M. Stalder, A. Schweizer, EICHER + PAULI, *Zürich*: ***Dimensionierung WKK: Rechenhilfe "WKK-Calc".*** (SB)

[22] M.Nani, HTL - *Buchs*: ***Software-Evaluation für Wärmepumpen und WKK-Anlagen, Phase 3.*** (JB)

[23] Th. Afjei, J.Good, INFEL - *Zürich*: ***Simulation von Wärmepumpen-Heizsystemen mit Holzkessel.*** (JB)

[24] P. Krummenacher, LENI / EPF - *Lausanne*: ***Analyse énergétique de la fabrique de pâtes alimentaires Pasta Gala SA.*** (SB)

[25] D. Favrat, LENI / EPF - *Lausanne*: ***Intégration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement étendue aux procédés discontinus et à la prise en compte des factuers exergétiques: extension du logiciel PinchLENI.*** (JB)

[26] Y. Allani, S.Karoui, LENI / EPF - *Lausanne*: ***DYNATHERM (phase pilote).*** (SB)

[27] J. Kunz, EPF - *Lausanne*: ***Simulation of the Dynamic Behavior of District Heating Systems.*** (SB)

[28] M. Stalder, EICHER + PAULI, *Zürich*: ***Dynamische Betriebsweise von WKK-Anlagen, Phase II.*** (JB)

[29] Ch. Erb, EICHER + PAULI, *Liestal*: ***Analyse der Betriebsstörungen bei gasbetriebenen WKK- und WP-Anlagen.*** (JB)

[30] P. Neuenschwander, LES / ETH - *Zürich*: ***Expertensystem BHKW (Expertensystem für präventive Wartung und Alarminterpretation in der Haustechnik, Phase 2: Blockheizkraftwerke).*** (JB + ZB)

[31] N. Herzog, HERZOG + LEE, *Reinach*: ***Wärmepumpen-Warmwassererwärmer (WPW) - Energienutzung und Planungshinweise.*** (SB)

[32] J. Nipkow, ARENA - *Zürich*: ***Wäschetrocknen mit geregelter Ventilation und Heizung.*** (JB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden / (ZB) Zwischenbericht vorhanden / (SB) Schlussbericht vorhanden

7. Referenzen

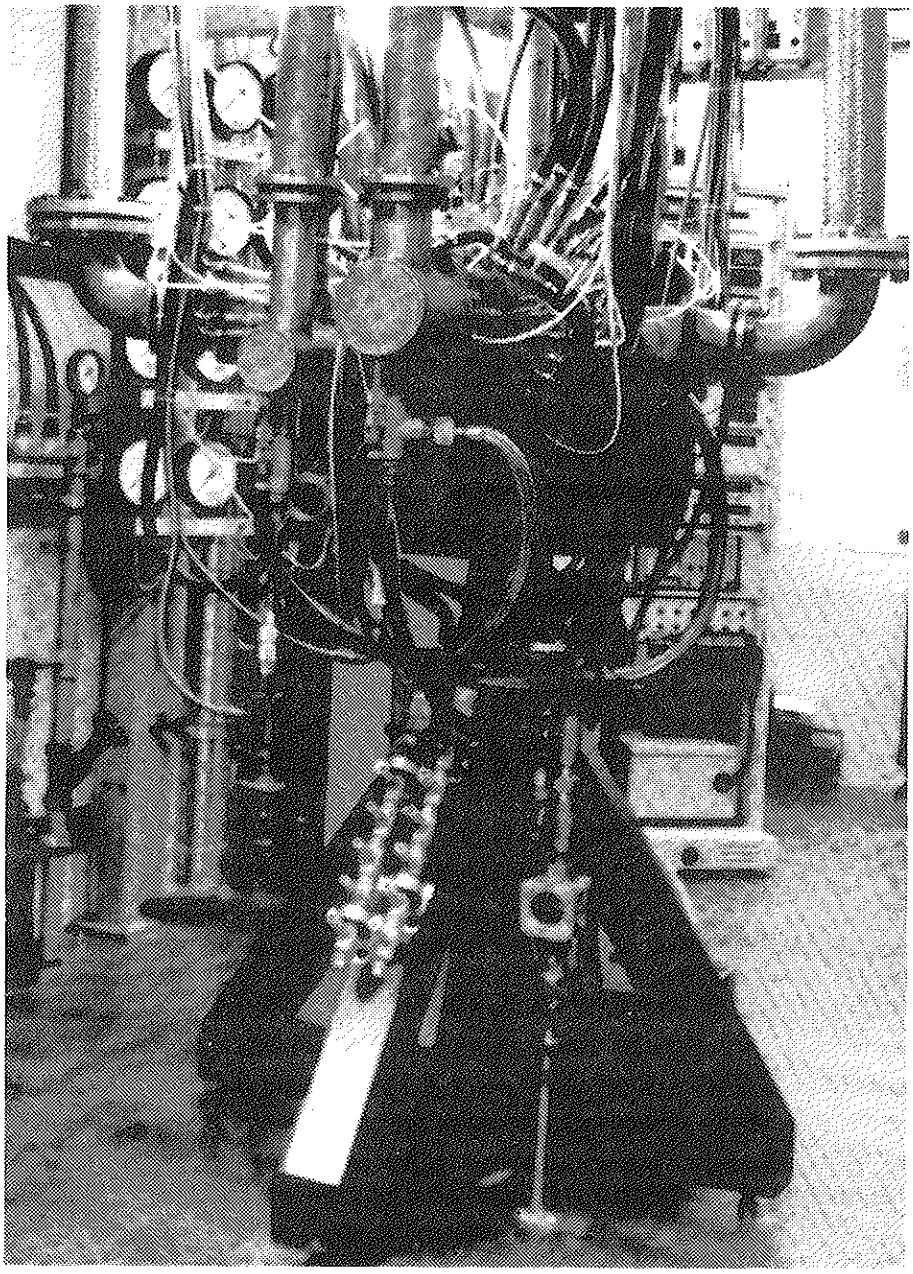
[33] P. Melin: ***Experiences with new refrigerants in evaporators,*** *IEA final report.*

[34] J. Bosma: ***Heat-Pumps for Energy Efficiency and Environmental Progress***, Elsevier, 1993.

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Alphons Hintermann



Druckwellenmaschine mit Zellenrotor

Solche Maschinen sind als Antriebseinheit für eine neue Generation von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit stark reduziertem Schadstoffausstoss in Erprobung. Die abgebildete Anlage bei der ABB in Baden erlaubt die Überprüfung des Konstant-Volumen-Verbrennungsprozesses.

1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1993

Langfristiges Programmziel ist, am PSI und an den ETH-Laboratorien für Energiesysteme (LES) und für Verbrennungsmotoren (LVV) mit modernen Methoden der Verbrennungsforschung wie numerische Simulation, Laserdiagnostik und Schadstoffanalytik, schlussendlich energetisch, ökologisch und ökonomisch optimalen Verbrennungsanlagen zur industriellen Anwendung und zur Verbreitung zu verhelfen. Starkes Gewicht wird dabei auf die Sicherung der Kontinuität der Forschungsaktivitäten, hohe Fachkompetenz der Forscher, effiziente Umsetzung der Forschungsergebnisse, intensive Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Privatwirtschaft und internationale Vernetzung der Projekte gelegt.

Die Projekte im Forschungsprogramm **Feuerung und Verbrennung** gliedern sich um die Schwerpunktsthemen:

- Grundlagen der Verbrennung,
- Laser- und andere optische Messmethoden,
- Numerische Simulation von Verbrennungsvorgängen,
- Schadstoffreduktion.

Eine absolute Abgrenzung ist schwierig, da in den Projekten meist mehr als ein Thema, jedoch mit unterschiedlichem Gewicht, bearbeitet wird. Damit ist gleichzeitig die Grundlage für einen rege genutzten Informationstransfer geschaffen.

Die anvisierten Ziele für 1993:

- **Festigung der internationalen Einbindung der Projekte,**
- **Verstärkung der Zusammenarbeit Hochschule - Privatwirtschaft,**

konnten im wesentlichen erreicht werden. Insbesondere waren den drei im Rahmen des Programms organisierten Tagungen mit internationaler Beteiligung volle Erfolge beschieden.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1993

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Am LVV standen die Experimente am Einzylinder-Forschungsmotor im Rahmen des Projekts **Turbulenzparameter von Strömungen** [1] im Vordergrund. Um die Parameter des turbulenten Strömungsfeldes im Brennraum eines Kolbenmotors zu beschreiben, wurden Laser-Doppler-Velocimetry-Messungen zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeit durchgeführt. Parallel dazu wurde das Strömungsfeld numerisch berechnet, indem die drei-dimensionalen Navier-Stokes Gleichungen mit K-ε Modellierung integriert wurden. Die Vergleiche der experimentellen Werte mit den Modellrechnungen zeigten eine gute Übereinstimmung.

Im PSI-Vorhaben **Katalytische Verbrennung** [2] gelang es, die relevanten Mechanismen bei der katalytisch stabilisierten Verbrennung von H_2-Luft-Gemischen qualititiv zu verstehen. Bei der katalytisch stabilisierten Verbrennung von Propan wurde die NO_x-Bildung experimentell und numerisch untersucht. Beobachtet wurde, dass mit zunehmendem Anteil des im Katalysator umgesetzten Brennstoffs die Bildung von Prompt-NO_x abnimmt, während die vom thermischen NO_x nicht beeinflusst wird [25, 26]. Die geplanten Arbeiten betreffend Katalysatorentwicklung sind mit der Charakterisierung von Perovskit-Katalysatoren auf verschiedenen Trägern abgeschlossen worden. Es wurde festgestellt, dass noch keine technisch einsetzbaren Katalysatoren existieren, die bei Temperaturen von 1300 bis 1500 °C eine hohe Standzeit und gleichzeitig eine hohe Aktivität aufweisen. Geeignete Verbindungen zur Oxidation von Methan bei hohen Temperaturen wurden gefunden.

LASER- UND ANDERE OPTISCHE MESSMETHODEN

Die Beherrschung moderner optischer Messmethoden ist ein absolutes Muss in der heutigen Verbrennungsforschung. Das PSI-Projekt **Laser-Diagnostik in der Verbrennung** [3] ist aufgeteilt in die Anwendung vorhandener Messmethoden [27] und die Weiterentwicklung bestehender und neuer Diagnosemöglichkeiten [28]. Als Anwendung konnte mittels laserinduzierter Fluoreszenz in OH die Flammenfront im Ölbrenner des ETH-Projekts [4] bestimmt werden. Die Messung ortsaufgelöster OH-Konzentrationen in einem katalytischen H_2-Ofen [2] wurde abgeschlossen. CARS-Messungen lieferten wertvolle Informationen über das zeitliche Verhalten der Temperatur im PSI-Solarreaktor. Neue SO_2-Nachweismethoden wurden erarbeitet, da diese Komponente in der Verbrennung schwefelhaltiger Brennstoffe eine entscheidende Rolle spielt. Das ETH-Projekt **Temperatur- und Turbulenzstrukturerfassung in Flammen** [5] wurde in die PSI-Laseraktivitäten integriert. Es bestehen konkrete Pläne, dieses Projekt in Richtung der holographischen Erfassung von Spezieskonzentrationen und Tomographie auszuweiten.

Im Projekt **Schnell-Messverfahren in Flammen** [6] steht mit dem aufgebauten IR-Spektroskopiesystem nun eine leistungsfähige Prototypanlage bereit, um qualitative Temperaturverteilungen in Flammen auf rasche, unkomplizierte Art zu visualisieren. Die aus ersten Messungen berechneten Temperaturen stimmen ermutigend mit Vergleichstemperaturen überein. Eine in der Praxis einsetzbare Variante ist im Aufbau.

Die Verminderung partikelförmiger Emissionen von Dieselmotoren ist ein vielbearbeitetes Forschungsthema. Im Projekt **Geometrische Partikeldetektion von Russteilchen** [7] wurde eine laseroptische Messmethode entwickelt, welche die Detektion und Charakterisation von Russpartikeln in Diffusionsflammen ermöglicht. Neben Aussagen über die Grösse eines Partikels lassen sich durch die Messung des optischen Brechungsindexes auch gewisse Informationen über die Zusammensetzung bezüglich der Oxidation der Partikel gewinnen. Ein neues Laser-Messverfahren garantiert berührungsfreie Temperaturmessungen in Flammen. Die entwickelten Theorien über Partikelstreuung konnten anhand von Streuversuchen vollumfänglich bestätigt werden.

Nach Abschluss der ersten Phase im Projekt **Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung** [8] stehen neue laseroptische Verfahren zum Studium vertiefter Aspekte der instationären Verbrennung, insbesondere der Flammenfrontausbreitung und der Schadstoffbildung zur Verfügung [29]. Im numerisch-theoretischen Bereich sind neue Modelle zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen turbulenter Strömung und Verbrennungschemie entwickelt und mit den Laserexperimenten validiert worden. Im experimentellen (zeitliches und räumliches Laser-Auflösungsvermögen) wie auch im numerischen (Rechenkapazität) Teil wurden die Grenzen des heute machbaren ausgeschöpft. Qualitative Ergebnisse, wie die Bestätigung der nichtlinearen Abhängigkeit der turbulenten Flammengeschwindigkeit vom Verhältnis der Turbulenzintensität zur laminaren Flammengeschwindigkeit, liegen vor.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSVORGÄNGEN

Numerische Simulation ist integrierender Bestandteil vieler Vorhaben der Verbrennungsforschung. Meist werden kommerzielle, primär zur Simulation von reinen Strömungsvorgängen entwickelte Programmpakete mit zusätzlichen Verbrennungsmodellen ausgestattet, um den spezifischen Bedürfnissen der jeweiligen wissenschaftlichen Fragestellung gerecht zu werden. Die Zielsetzung der folgenden Projekte ist, in enger Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft praxistaugliche Programmpakete zu entwickeln.

Ein für die Entwicklung von schadstoffarmen Brennern im Heizungsbereich einsetzbares Werkzeug zur numerischen Simulation von Diffusionsflammen ist Ziel im Projekt **Modellierung der NO-Bildung in Flammen** [9]. Hier werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit der theoretischen Verbrennungsmodelle gestellt [30]. Um die Temperatur- und Speziesmittelwerte an der Flammenspitze besser berechnen zu können, musste das bekannte Eddy-Dissipationsmodell mit einem chemischen Term ergänzt werden. Auf der experimentellen Seite dient ein auf die Randbedingungen der Simulation abgestimmter Prüfstand zur Verifikation der verwendeten Turbulenzmodelle [31]. Mit ihm können Diffusionsflammen laseroptisch vermessen werden. Erste Messungen einer Wasserstoffdiffusionsflamme liegen vor. Die Zwischenberichte der Phase I [32,33,34] im parallel zu [9] bearbeiteten NEFF-Projekt **Basiswissen für Low-NO_x-Brenner und -Brennkammern** [4] haben unter den Beteiligten (LES, Brenner- und Kesselfirmen) eine gute Resonanz gefunden. In der angelaufenen 2. Phase werden zusammen mit einem

neuen Industriepartner weiterhin Grundlagen einer möglichst schadstoffarmen Verbrennung fossiler Brennstoffe erarbeitet, die in der nächsten Generation von Brennern zum Einsatz kommen sollen.

Eng verknüpft sind auch die Projekte **Physikalisch-numerisches Verbrennungsmodell für turbulente Diffusionsflammen** [10] und **Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern** [11]. Als Basis dient ein innovatives Finite Element Rechenprogramm, das im Rahmen des HERMES-Programms am Institut für Computeranwendung (ICA), Stuttgart, entwickelt wurde. In der Mitte 1993 abgeschlossenen ersten Phase des Projekts [10] wurde die Grundstruktur des primär für den Einsatz in der Industrie geplanten Simulationssystems in enger Zusammenarbeit der Firma ELCO, des ICA und des LES aufgebaut und verschiedene Modelle wurden auf ihre Eignung getestet. Als Ergebnis wurde eine Kaltströmung sowie eine reagierende Strömung in einem realen Brenner simuliert. Für technische Anwendungen ist die Voraussage, unter welchen Bedingungen eine Flamme auslöschen kann, sehr wichtig. Ziel des Projekts [11] ist daher, ein Laminar-Flameletmodell zur Berechnung turbulenter Diffusionsflammen zwecks Implementierung ins Programmpaket des Projekts [10] zu entwickeln. Die Modellierung ist in einem fortgeschrittenen Stadium und Vergleichsrechnungen erfolgen demnächst [35].

Im NEFF-Projekt **Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck** [12] ist der früher am LES entwickelte Strahlungscode erfolgreich in ein modernes Fluiddynamik-Programm integriert worden. Die ersten Versuche der vorgesehenen optischen Messverfahren zur Russpartikelbestimmung stimmen gut mit den in der Literatur gefundenen Werten überein. Der Versuchsaufbau für ein DIVA-Experiment - ein Flammenrohr für einen verschiebbaren ABB-Doppelkegelbrenner mit drei optischen Zugängen - ist soweit fortgeschritten, dass im kommenden Jahr erste DIVA-Experimente und entsprechende Vergleiche mit der Theorie durchgeführt werden können.

SCHADSTOFFREDUKTION UND SCHADSTOFFASPEKTE

Die Schadstoffreduktion bei den Verbrennungsprozessen ist ein wesentlicher Programmbestandteil. Die primären Massnahmen aus dem Erforschen der Grundlagen der Verbrennung [1, 12] werden integrierender Bestandteil der nächsten Generation von Feuerungsanlagen sein und erst im Laufe der Jahre ihre Früchte tragen. Um den verschärften Vorschriften der Luftreinhaltung zu genügen, wird parallel zu den Grundlagen in enger Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft auch die Verbesserung von sekundären Massnahmen gefördert. Ein Schwerpunkt ist dem Anwendungspotential der SCR/ SNCR-Verfahren in praxisnahen Anlagen gewidmet.

Zum Thema Abgasreinigung bei Diesel- und Gasmotoren sind drei vernetzte, vom selben Ingenieurbüro bearbeitete Projekte abgeschlossen worden. Im Projekt **Langzeit-Betriebsverhalten von Gasmotoren mit Katalysator** [13] konnte bei den beobachteten Dreiwegkatalysator-Betriebszeiten (maximal 13'500 Stunden) keine Verschlechterung der Schadstoffumwandlung festgestellt werden. Im Projekt **Entstickung von stationären Magermotoren und Holzfeuerungen mit Harnstoff** [14] wurde die Praxistauglichkeit der Harnstoffentstickung für Erd-, Klär-, Deponie- und Biogas betriebene Magermotoren sowie zur Nachrüstung von sanierungsbedürftigen Holzfeuerungen und Altholzfeuerungen nachgewiesen. Einfache Entstickungsapparaturen, die auch von angelerntem Personal bedient werden können, stehen nun zur Verfügung. Gasmotoren mit häufigen und kurzen Stillstandzeiten emittieren in den Anfahrphasen bedeutend mehr Schadstoffe als im Dauerbetrieb. Im NEFF-Vorhaben **Emissionsminderung bei Gasmotoren** [15] konnten mittels Anfahroptimierung die NO_x-Anlaufemissionen beträchtlich gesenkt werden. Als Schwachstelle hat sich die Regelung der Harnstoffdosierung und deren Überwachung herausgestellt. Optimal λ-geregelte Gasmotoren mit Dreiwegkatalysatoren liefern sehr tiefe Schadstoffwerte. Ausserhalb des λ-Fensters betriebene Anlagen emittieren jedoch leicht die 3 bis 4-fache NO_x-Menge. Wesentlich zu diesem Erfolg beigetragen hat die PSI-Grundlagenforschung **Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen** [16, 36]. An der Dieselmotorversuchsanlage werden Alterung der Katalysatoren, Harnstoffdosierung und Entstickungsgrade detailliert untersucht. Keines der vermuteten Nebenprodukte – Lachgas, Isocyansäure, Blausäure, Harnstoff – konnte in nennenswerter Konzentration nach dem Katalysator nachgewiesen werden.

Die Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens der emittierten Schadstoffmenge einer handbeschickten Holzfeuerung (< 70 kW) im Projekt **Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen** [17] ist abgeschlossen und die Daten sind nach verschiedenen Berechnungsverfahren ausgewertet. Das Prüfver-

fahren ist zur Erfassung der Emissionen bei Vollast-, Teillast- und Intervallbetrieb geeignet. Bei Einsatz des Verfahrens an Naturzugfeuerungen kann durch Simulation des Kaminzugs ein von klimatischen Verhältnissen weitgehend unabhängiger Prüfzyklus sichergestellt werden. Der Transfer in die Praxis ist durch die enge Zusammenarbeit mit der Technischen Kommission "Typenprüfung für Holzkessel" der Vereinigung Holzenergie gewährleistet.

Ein wesentlicher Engpass im Vorhaben **Optimierte Verbrennungstechnologie beim Automobil-Benzinmotor** [18] war der herstellerseits praktizierte Geheimhaltungsmodus der Steuerfunktionen in den digitalen Motorenmanagement-Systemen, der die Weiterentwicklung des Einsatzes der Sauerstoffsonde zur zylinderselektiven Steuerung von Benzin- und Dieselmotoren behinderte. Um die volle Nutzbarkeit der Sonde zu gewährleisten, wurde ein eigenes, total frei programmierbares Motorenmanagement entwickelt, das - im Gegensatz zu den serienmässigen Systemen, die nur bis zu 50% äusseren Eingriff erlauben - einen 100%igen Eingriff ermöglicht.

Das als **Müllverbrennung in Brasilien** gestartete Projekt wurde zum Vorhaben **Thermische Verwertung von Abfällen durch Wirbelschichtverbrennung unter Berücksichtigung des Einflusses der Aufgabe- und Bettkörnung** [19] umorientiert. In enger Zusammenarbeit mit einem industriellen Partner wurde das Pflichtenheft für eine Versuchsanlage hoher Flexibilität ausgearbeitet. Ziel des Projekts ist, Einflussfaktoren auf die Verbrennung von Abfällen mit sehr unterschiedlichem Heizwert (3-40 MJ/kg) in Wirbelschichtreaktoren mit angeschlossener Energieerzeugung aufzuzeigen. Die Inbetriebsetzung der $2MW_{th}$-Anlage ist für Mitte 1994 geplant.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im ETH-PSI-Bereich herrscht eine rege Zusammenarbeit. Wie in den Projektbeschrieben hervorgehoben, findet ein echter *Know-how*-Transfer statt, indem neu entwickelte Methoden von anderen Gruppen übernommen und angepasst werden. Wesentlich trägt dazu das nun jährlich stattfindende ETH/ PSI-Seminar bei. Am 29. März 1993 wurden zahlreiche Teilnehmer aus Hochschule und Privatwirtschaft über den aktuellen Stand von 12 ETH/ PSI- Projekten informiert.

Ein wichtiges Element nationaler Zusammenarbeit bilden die Arbeitsgruppen **Feuerungssimulationsmethoden, Laser-Messverfahren in Flammen** und **Abgasanalytik** der Schweizerischen Interessensgemeinschaft für Feuerungsforschung, SIFF. Besonders aktiv erwies sich die Gruppe Abgasanalytik. Mit der fürs BEW erarbeiteten **Übersicht über konventionelle Emissionsmessgeräte** [20] hat sie eine brauchbare Entscheidungsgrundlage geschaffen.

Betreffend dem Hochdruckprüfstand DIVA wurden die Forschungsbedürfnisse der DIVA-Partner ABB, ETH und PSI in mehreren Sitzungen ausgelotet und neue, DIVA-relevante gemeinsame Forschungsaktivitäten definiert, um die gegenseitige Zusammenarbeit zu stärken und zu koordinieren. Leider erlitten die DIVA-Experimente einen schweren Rückschlag. Die durch einen technischen Mangel bedingte Havarie des Prüfstandes vom 22. März 1993 verursachte einen halbjährigen Unterbruch.

Einen weiteren Meilenstein in der Zusammenarbeit ETH - Privatwirtschaft wurde mit dem erfolgreichen Abschluss der ersten Phase im NEFF-Projekt **Basiswissen für Low-NO_x-Brenner und -Brennkammern** [4] gesetzt. Anlässlich der Schlussveranstaltung zeigten die zahlreich erschienenen Vertreter aus der Privatwirtschaft ein starkes Interesse an den präsentierten Forschungsergebnissen.

Wie geplant, lag das Berichtsjahr stark im Zeichen internationaler Aktivitäten. Im Rahmen des Programms wurden folgende Tagungen mit internationaler Beteiligung organisiert:

XII. European CARS-Workshop **ECW'93**	**22. - 23. März 1993**	**PSI, Villigen**
Joint SIFF/IFRF-Seminar on Numerical Combustion, [37]	**17. - 18. Mai 1993**	**Zürich-Regensdorf**

IEA Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion, Task Leaders Meeting, [38] **6. - 9. Sept. 1993** **Baden.**

Alle Tagungen zeichneten sich durch ein attraktives wissenschaftliches Programm aus, das rund je hälftig mit schweizer Beiträgen aus den Projekten [1, 24] und solchen ausländischer Referenten bestritten wurde. Entsprechend zahlreich waren denn auch die nationalen und ausländischen Besucher. Letztere bekundeten ein reges Interesse an unseren Forschungsresultaten.

Als neuer Subtask zum Gebiet *Advanced Gas Turbine Technology* mit Titel ***Soot Formation and Flame Radiation at Elevated Pressure*** wurde das Projekt [12] in die Vorhaben des IEA-Programms *Conservation and Emissions Reduction in Combustion* eingebracht. Wenig Erfolg hatten unsere Bemühungen, künftig die IEA-Aktivitäten industrie- und zusammenarbeitsorientierter zu gestalten.

Der Gründung eines "Nationalen Komitees für Flammenforschung", das als Vollmitglied in die *International Flame Research Foundation (IFRF)* aufgenommen werden kann, steht mit der mündlichen Zusage von drei Privatunternehmen nichts mehr im Wege. Mit der am 10. 9. 1993 gegründeten *Austrian-Swiss Association for Laser Anemometry* (LA), wollen sich die LA-Anwender und -Entwickler künftig organisieren. Das neue Lausanner *Competence Center for Combustion* soll den Austausch von Forschungsresultaten innerhalb von ERCOFTAC förden. Das erste Jahrestreffen fand mit guter Beteiligung am 4.2.1993 in Lausanne statt.

4. Umsetzung der Ergebnisse und P & D - Projekte

Die Umsetzung erfolgte einerseits über die etablierten Kanäle der Jahres- und Schlussberichte via ENET, PSI-Berichte sowie Veröffentlichungen in Fachzeitschriften [25-39]. Nicht zu vernachlässigen sind die Fachtagungen und Symposien im nationalen und internationalen Rahmen, die neben dem Ausloten des aktuellen Wissensstands stets auch Gelegenheit zum wichtigen persönlichen Erfahrungsaustausch bieten. Auf die jährlich stattfindende SIFF-Tagung wurde zugunsten des obenerwähnten IEA-Meetings in Baden, das auch den SIFF-Mitgliedern offenstand, verzichtet.

Das nun abgeschlossene P&D-Projekt **Dauerentstickung eines Dieselmotors** [21], eine direkte Umsetzung der Projekte [13, 16], zeigte für das Harnstoff-Handling und die geregelte Reduktion von NO_x neue Perspektiven auf. Die automatische Harnstoffaufbereitung und -Eindüsung wurde praxisnah während einer Heizperiode erfolgreich eingesetzt. Hingegen konnte der neuartige Russpartikelfilter wegen zu hohem Druckabfall nicht verwendet werden.

Das P&D-Projekt **Konstant-Volumen-Verbrennung** [22, 39] visiert für 1997 den Prototyp einer neuartigen Druckwellenmaschine mit stark reduzierten Emissionen als Antriebseinheit von WKK-Anlagen an. Als wichtiger Zwischenschritt konnte die Implementierung des CVC-Prozesses in einer Druckwellenmaschine mit Zellenrotor (siehe Titelbild) realisiert werden. Die vorgesehenen DIVA-Hochdrucktests können erst 1994 erfolgen.

Im P&D-Projekt ***Développement d'une technique Low-NO_x de combustion étagée d'huile lourde avec brûleur à prémélange*** [23] wurde in Zusammenarbeit der *Centrale Thermique de Vouvry* und der ABB die gestufte Low-NO_x-Technologie im industriellen Massstab an einem 9MW-Kessel des Kraftwerks Chavalon mit Heizöl El und Schweröl eingehend untersucht. Obwohl das unbefriedigende Brenner/Zerstäubungssystem eine weitere Optimierung erfordert, konnte das Potential der 3-stufigen Schweröl-Vormischverbrennung für NO_x- Emissionen < 150mg NO_2 / Nm^3 ausgewiesen werden.

Eng verbunden mit dem Projekt [21] ist das P&D-Vorhaben **Motorenprüfstand** [24]. Der Motorenprüfstand wurde aufgebaut und samt eigenentwickelter Softwareprogramme auf den von der EMPA vorgeschriebenen Prüfzyklus für Schiffsmotoren gemäss Bodenseeschiffahrtsverordnung (BSO) erweitert. Dank des frei programmierbaren Motormanagement konnte die Abgastypenprüfbescheinigung nach BSO (Stufe 1) für 5,0 und 5,8 Liter Motorenfamilien (V8 Doppelmotorisierung) erreicht werden. Die noch in Kraft tretenden strengeren Normen der Stufe 2 können unter Verwendung dieses Motorenmanagements ebenfalls erfüllt werden.

5. Bewertung 1993 und Ausblick 1994

Aufgrund der Berichte [1-24] ist gute Arbeit geleistet worden. Bis auf wenige Ausnahmen sind die gesteckten Projektziele erreicht worden. Von den 1993 abgeschlossenen Projekten erhalten zwei zwecks Wahrung der Kontinuität Anschlussaufträge. Infolge der laufenden Verpflichtungen besteht im nächsten Jahr nur wenig Spielraum für neue BEW-Projekte. Berücksichtigt werden können nur innovative Projekte, die bestehende Vorhaben sinnvoll ergänzen.

Für 1994 wird die gegenseitige Abstimmung der DIVA-Forschungsaktivitäten der ETH (LES und LVV), des PSI und der ABB nach wie vor mit hoher Priorität verfolgt werden.

Die internationalen Verknüpfungen in der Verbrennungsforschung werden 1994 im Vordergrund bleiben. Im ersten Halbjahr soll das *Schweizerische Nationalkomitee für Feuerungsforschung* mit mindestens drei privatwirtschaftlichen Firmen gegründet werden; mit diesem Komitee kann dann die Schweiz als vollwertiges Mitglied in die ***International Flame Research Foundation*** **IFRF** aufgenommen werden. Gleichzeitig könnte es als Mitglied des weltweiten ***Combustion Institute*** (Pittsburgh, USA) vorgeschlagen werden. Im IEA-Programm *Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* werden unsere Bemühungen weiterhin in Richtung industrieorientierter Zusammenarbeit gehen.

6. Liste der Projekte

[1] K. Boulouchos, LVV / ETH - *Zürich:* ***Turbulenzparameter von Strömungen.*** (JB)

[2] P. Benz, S. Buser, P. Marti, A. Schlegel, P. Hütter, PSI - *Villigen:* ***Katalytische Verbrennung.*** (JB)

[3] T. Gerber, PSI - *Villigen:* ***Laser-Diagnostik in der Verbrennung.*** (JB)

[4] J. Gass, H. Dreher, M. Ochs, O. Schuler, LES / ETH - *Zürich:* ***Basiswissen für Low-NO_x-Brenner und -Brennkammern.*** NEFF-Bericht (SB + JB).

[5] T. Gerber, PSI - *Villigen:* ***Temperatur- und Turbulenzstrukturerfassung in Flammen .*** (JB)

[6] J. Gass, P. Stuber, LES / ETH - *Zürich*: **Schnell-Messverfahren in Flammen.** (JB)

[7] B. Ineichen, B. Mandel, LVV / ETH - *Zürich:* ***Geometrische Partikeldetektion von Russteilchen.*** (SB)

[8] B. Ineichen, K. Boulouchos, LVV / ETH - *Zürich:* ***Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung.*** (SB)

[9] J. Gass, M. Flury, M. Schlatter, LES / ETH - *Zürich:* ***Modellierung der NO-Bildung in Flammen.*** (JB)

[10] K. Kündig, ELCO, *Vilters:* ***Physikalisch-numerisches Verbrennungsmodell für turbulente Diffusionsflammen.*** (JB)

[11] J. Gass, LES / ETH - *Zürich:* ***Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennnern.*** (JB)

[12] J. Gass, S. Martens, B. Spiess, R. Schulz, LES / ETH - *Zürich:* ***Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck.*** (NEFF-JB)

[13] F. Kühnis, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, *Liestal:* ***Langzeit-Betriebsverhalten von Gasmotoren mit Katalysator.*** (SB)

[14] F. Kühnis, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, *Liestal:* ***Entstickung von stationären Magermotoren und Holzfeuerungen mit Harnstoff.*** (SB)

[15] F. Kühnis, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, *Liestal:* ***Emissions-Minimierung bei Gasmotoren.*** (NEFF-SB)

[16] M. Koebel, PSI - *Villigen:* ***Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen.*** (JB)

[17] T. Nussbaumer, D. Wagner, VERENUM, *Zürich:* ***Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen.*** (SB)

[18] K. LEISTRITZ, *Zürich:* ***Optimierte Verbrennungstechnologie im Automobil-Benzinmotor.***(JB)

[19] L. Reh, IVK / ETH - *Zürich:* ***Thermische Verwertung von Abfällen durch Wirbelschichtverbrennung unter Berücksichtigung des Einflusses der Aufgabe- und Bettkörnung.*** (JB)

[20] K. Wälti, UCW, *Rafz:* ***Übersicht über konventionelle Emissionsmessgeräte.*** (SB)

[21] P. Hess, CALOTEC, *Hölstein:* ***Dauerentstickung eines Dieselmotors.*** (JB)

[22] R. Althaus, ABB, *Baden :* ***Konstant-Volumen-Verbrennung.*** (JB)

[23] C. Pelet, EOS, *Vouvry:* ***Développement d'une technique Low-NO_x de combustion étagée d'huile lourde avec brûleur à prémélange.*** (JB)

[24] K. LEISTRITZ, *Zürich:* ***Motorenprüfstand.*** (SB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

7. Referenzen

[25] A. Schlegel, P. Benz, S. Buser, H. Bockhorn, F. Mauss, PSI - *Villigen:* ***NO_x- Emissions of Catalytically Stabilized Combustion in Comparison to Lean Premixed Combustion,*** *Proc.Conf. Lisbon, 1993.*

[26] V. Scherer, W. Weisenstein, T. Griffin, A. Schlegel, P. Benz, S. Buser, PSI - *Villigen:* ***Catalytically-Stabilized of Natural Gas: Experiments under Gas Turbine Conditions,*** *Proc. Conf. Lisbon, 1993.*

[27] R. Bombach, B. Hemmerling, W.Kreutner, PSI - *Villigen:* ***CARS Temperature Measurements in a turbulent 120 kW Natural Gas Flame,*** *Proc. XII. Eur. CARS-Workshop, Villigen,* 1993.

[28] P. Radi, B. Mischler, T. Gerber, PSI - *Villigen:* ***Double Phase-Conjugate Four-Wave Mixing of SO_2 .*** *Proc. Conf. Lisbon,* 1993.

[29] K. Boulouchos, T. Steiner, M. Kellenberger, LVV / ETH - *Zürich:* ***Einblicke in motorische Transport- und Verbrennungsvorgänge auf der Basis einer spektralen Betrachtung.*** *Proc. Conf. TU Graz,* 1993.

[30] M. Schlatter, ETH, *Zürich:* ***1. Zwischenbericht NO-Modellierung in Flammen,*** LES-Bericht, 1993.

[31] M. Flury, ETH, *Zürich:* ***3D-LDA-Messungen am 100 kW Rezirkulations-Ölbrenner,*** LES-Bericht, 1993.

[32] J. Gass, H. Dreher, LES / ETH - *Zürich:* ***Basiswissen für Low-NO_x-Brenner und -Brennkammern, Projektteil Simulation,*** *Abschlussbericht Phase 1,* 1993.

[33] J. Gass, M. Ochs, LES / ETH - *Zürich:* ***Basiswissen für Low-NO_x-Brenner & -Brennkammern, Projektteil Ölspray,*** *Abschluss Phase 1,* 1993.

[34] J. Gass, O. Schuler, LES / ETH - *Zürich:* ***Basiswissen für Low-NO_x-Brenner und -Brennkammern, Projektteil Umwelteinflüsse,*** *Abschluss Phase 1,* 1993.

[35] J. Argyris, H. Friz, B. Huurdemann and A. Laxander, ICA - *Stuttgart:* ***Turbulent Fluid Flow and its Incorporation into Combustion Processes*** *Computer Methodes in Appl. Mechanics,* 1993.

[36] M. Koebel, PSI - *Villigen:* ***Entstickung von Dieselabgasen mit Harnstoff-SCR,*** VDI-Ber. 1019, 1993.

[37] ***Joint IFRF/SIFF Seminar on Numerical Combustion,*** *Proc. Conf. Regensdorf,* 1993.

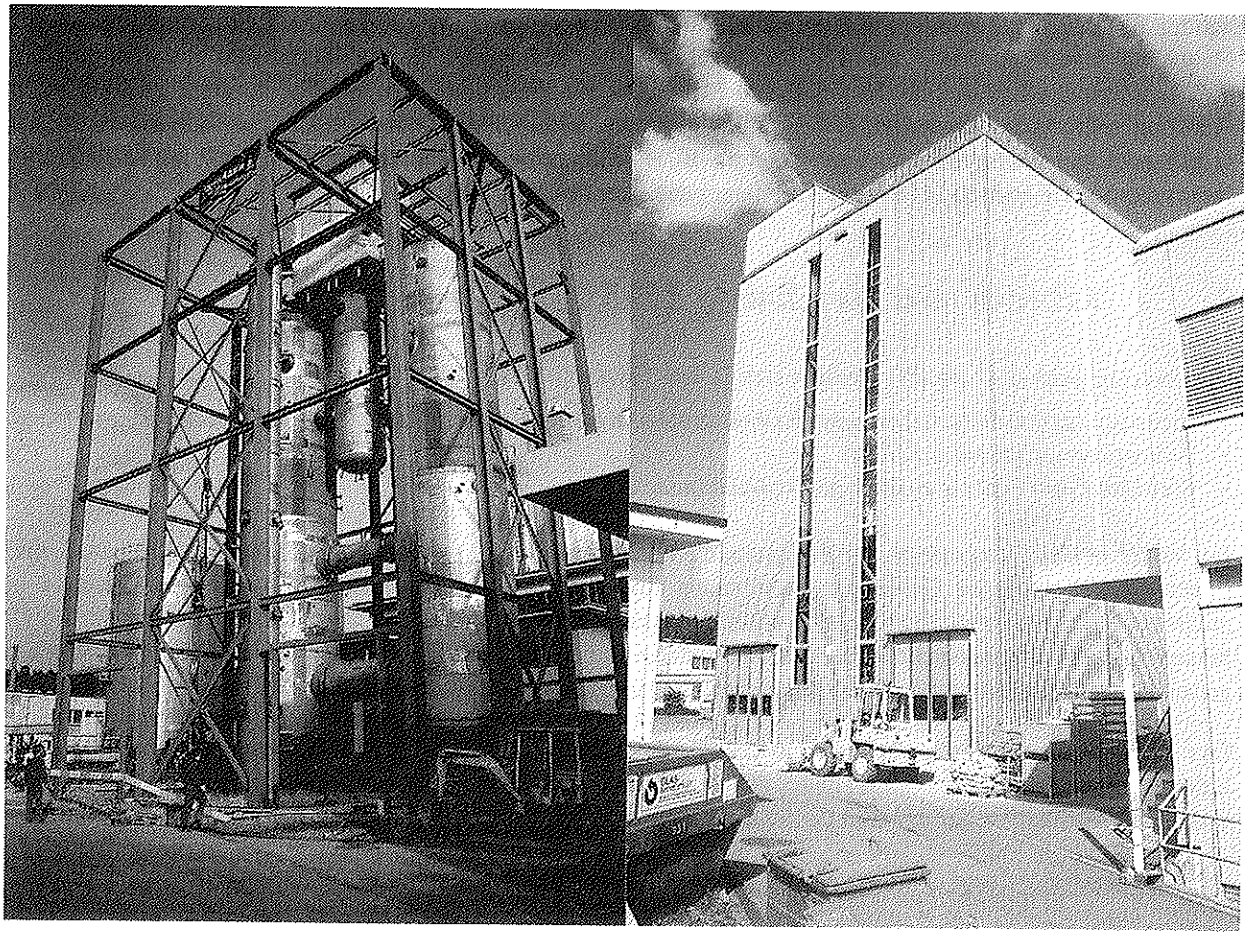
[38] ***XV Task-Leaders-Meeting,*** *Proc. IEA-Conf. Baden,* 1993 .

[39] E. Zauner, Y.-P. Chyou, F. Walraven, R. Althaus, ABB-*Baden:* ***Gas turbine topping stage based on energy exchangers: process and performance.*** *Proc. ASME Congress,* 1993.

KERNTECHNIK UND NUKLEARE SICHERHEIT

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Wolfgang Kröger



Experimentieranlage PANDA

Die am PSI neu errichtete Experimentieranlage PANDA erlaubt das Verhalten des Containments fortgeschrittener Leichtwasserreaktoren zu untersuchen. Links die Grossbehälter, die das Containment simulieren, im Aufbaustadium (Februar 1993); rechts das fertiggestellte Gebäude (August 1993).

1. Programmziele

Forschung auf dem Gebiet **Kerntechnik und nukleare Sicherheit** in der Schweiz dient heute primär

- der ständigen Anpassung der Kompetenz dem Stand der Technik in Fragen der nuklearen Sicherheit, der Entsorgung und der zugehörigen Anlagetechnik im Hinblick auf eine sichere Nutzung der Kernenergie auch in der Zukunft,
- der Ausbildung von Nuklearwissenschaftlern und -ingenieuren im Rahmen attraktiver Forschungsaktivitäten in Zusammenarbeit mit den Hochschulen,
- der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen bis hin zu Expertisen zu Einzelaspekten,
- dem aktiven Verfolgen sich international herausschälender sicherheitstechnischer Anforderungen und Merkmale für zukünftige Kernanlagen und Evaluation technischer Lösungen sowie
- dem Erbringen wissenschaftlich-technischer Dienstleistungen im nuklearen Sektor samt sicherem Betrieb der dazu notwendigen Anlagen.

Schwerpunktmässig findet die nukleare Energieforschung im Bereich **Nukleare Energie, Sicherheit** (F4) des Paul Scherrer Instituts (PSI) statt. Die Beiträge der Hochschulen konzentrieren sich auf die Lehre; Diplomanden und Doktoranden führen allerdings ihre Forschungsarbeiten in der Regel ebenfalls am PSI durch. Im Jahr 1993 wurden ca. 215 PersonenJahre (davon ca. 60 für Infrastruktur etc.) und ca. 12.5 Mio. Fr. Sachmittel in dieser Forschung investiert. Mehr als 1/3 der Personalmittel und etwa 2/3 der Sachmittel wurden durch die Elektrizitätswirtschaft und die NAGRA, das BEW über die HSK sowie den NEFF - meistens im Rahmen von Forschungsaufträgen - finanziert. BEW/HSK steuerten ca. 11% der drittfinanzierten Sachmittel und ca. 24% des drittfinanzierten Personals bei. Über die vom BEW mitfinanzierten Aktivitäten wird auch im nachfolgenden Jahresüberblick **Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK** berichtet.

2. Arbeiten und Ergebnisse 1993

Die Forschungsarbeiten am PSI gliedern sich in drei Themengebiete:

- Sicherheit und sicherheitsbezogene Betriebsprobleme schweizerischer Kernkraftwerke
- Entsorgung radioaktiver Abfälle
- Sicherheit und Technik zukünftiger Reaktorkonzepte.

Bei letzterem Forschungsgebiet geht es darum, die Funktionstüchtigkeit neuartiger Sicherheitsmechanismen, die in Reaktoren der nächsten Generation Anwendung finden sollen und die vermehrt auf passive Systeme und inhärente Systemeigenschaften bauen, verlässlich nachzuweisen und in ihren Grenzen kennenzulernen. Darüber hinaus wird die angesammelte kerntechnische Erfahrung bei der Behandlung nicht-nuklearer Spin-Offs, wie die ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen, eingesetzt.

Das Berichtsjahr ist durch das Erzielen erster relevanter Resultate auf neuen Experimentieranlagen oder im Rahmen neuer Projekte gekennzeichnet, die in den Vorjahren konzipiert bzw. initiiert wurden. Im Folgenden werden die wichtigsten der auf dem Gebiet der Kernenergieforschung abgewickelten Projekte kurz dargestellt.

REAKTORSICHERHEIT

Für die Beurteilung der Auswirkungen schwerer hypothetischer Reaktorunfälle ist die Kenntnis der im Verlauf eines solchen Unfalls an die Umgebung freigesetzten Radioaktivitätsmenge, des sog. Quellterms, von Bedeutung. Zur Ermittlung des Quellterms werden ausgewählte Unfallsequenzen, die in der Regel für eine Reihe von Szenarien abdeckend sind, mit Hilfe komplexer Rechencodes analysiert. Im Berichtsjahr wurden **Quelltermanalysen** [1] für zwei Unfallsequenzen im KKW Beznau I durchgeführt. Zwei interessante Ergebnisse standen dabei im Vordergrund: Ein angenommener Kernschmelzunfall unter hohem Systemdruck führte zum Versagen der Druckstossleitung noch vor dem Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters und dadurch zu einer Druckentlastung des Primärkreislaufs. So würde das Hochdruckszenario ohne externe Massnahmen zu einem Niederdruckszenario überführt. Das Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters unter niedrigem Druck

andererseits könnte zu solchen Bedingungen beim Heraustreten der Kernschmelze führen, dass diese im Reaktorgebäude-Sumpf wiederbenetzt würde, was deren Kühlbarkeit erhöhen könnte. Beide Aspekte stehen noch in Diskussion und benötigen eine vertiefte Untersuchung der relevanten Phänomene. Diese Arbeiten werden finanziell von der Elektrizitätswirtschaft unterstützt.

Die systematische Analyse des Verlaufs von Kernschmelzunfällen erfordert u.a. Kenntnisse über das in der Spätphase des Unfalls mögliche Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters (RDB) bei Kontakt mit Kernschmelze. Die Art des RDB-Versagens bestimmt den Verlauf des Druckaufbaus im Reactorcontainment und schlussendlich die Gewährleistung dessen Integrität. Das Projekt **CORVIS** [2] hat zum Ziel, die bei diesem Vorgang dominierenden Phänomene experimentell aufzufinden und messtechnisch zu erfassen. Die Untersuchungen tragen den spezifischen Auslegungsmerkmalen schweizerischer Reaktoren Rechnung. CORVIS ist zur Zeit weltweit das einzige Unternehmen seiner Art. Im Berichtsjahr wurde der Versuchsstand in Betrieb genommen. Darauf können Schmelzexperimente bei atmosphärischem Druck an Ausschnittsmodellen der unteren RDB-Kalotte mit Rohrdurchführungen im Massstab 1:1 durchgeführt werden. Als Substitut der Kernschmelze dient eine Schmelze aus Thermit, die nach dem Einfüllen in den Versuchstiegel mit einem elektrischen Lichtbogen nachbeheizt wird, um vorzeitiges Erstarren zu verhindern. Wahlweise können metallische oder oxidische Schmelzeanteile einzeln eingesetzt werden. Ein erstes Experiment mit voller Instrumentierung hat zwar vorzeitig abgebrochen werden müssen, aber trotzdem wertvolle Ergebnisse geliefert: Es zeigte sich, dass es bei der Berührung zwischen einer Stahlstruktur und überwiegend oxidischer Schmelze rasch zur Bildung von Krusten und Abhebungen der erstarrenden Schmelze kommt; dies verringert den Wärmeübergang bedeutend und kann somit einem Durchschmelzen stark entgegenwirken. Die Beobachtungsergebnisse leiten und unterstützen zugleich die Entwicklung von Berechnungsmodellen, mit denen sich sicherheitsrelevante Vorhersagen bezüglich Ort und Zeit des RDB-Versagens für reale Verhältnisse machen lassen. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung des BEW/HSK durchgeführt.

Im Reaktorcontainment befindliche Wassermassen können einen Teil der bei einem schweren Unfall aus dem RDB heraustretenden radioaktiven Substanzen zurückhalten und somit den Quellterm signifikant verringern. Zur Quantifizierung dieses Rückhaltevermögens und einer präziseren Ermittlung der Sicherheitsmargen werden Experimente und analytische Arbeiten durchgeführt. Die Experimentieranlage **POSEIDON** zur Untersuchung der Rückhaltung von Aerosolen und Gasen in Wasservorlagen wurde in Betrieb genommen [3]. Damit gehört das PSI zu den wenigen Institutionen weltweit, die typische Containment-Atmosphären (Dampf- und Aerosolgemische) während hypothetischer Kernschmelzunfälle simulieren können. Die Anlage wird derzeit u.a. genutzt, um die im von der Fa. SULZER entwickelten Containment-Druckentlastungssystem benutzten Filter zu qualifizieren. Die erste von insgesamt sechs geplanten Messungen fand im Dezember 1993 statt und verlief äusserst erfolgreich; erstmals hat eine Aerosolerzeugungsanlagen mit zwei Plasmafackeln ununterbrochen über mehr als vier Stunden Aerosole produziert. Das Projekt wird finanziell vom NEFF unterstützt.

1993 war das letzte Jahr der ersten Phase des Projektes **STARS** [4] (**S**imulationsmodelle zur **T**ransientenanalyse von **R**eaktoren in der **S**chweiz). Die Entwicklung und Validierung von Modellen zur Anlagenanalyse wurde fortgesetzt. Die analytische Arbeit umfasste die Untersuchung eines Kühlmittelverluststörfalles ohne Reaktorschnellabschaltung bei niedriger Leistung für das KKW-Leibstadt (KKL), eine umfassende Studie zur Siedewasserreaktor (SWR)-Rekritikalität nach Wiederbenetzung und eine Stabilitätsanalyse für das KKL. Die Validierungsarbeit lag schwergewichtig bei der Analyse eines Speisewasserverlust-Tests, der 1993 im KKW-Mühleberg (KKM) durchgeführt wurde. Nachdem die Spezifikationen für ein Informations-Management-System, das die hohe Zahl an Daten und Resultaten im Rahmen des Projektes effizient zu handhaben erlaubt, erstellt wurde, wurde im Herbst 1993 ein Prototyp am PSI installiert, und die technische Machbarkeit des Systems erfolgreich demonstriert. Die Analyse des Störfalles bei niedriger Leistung für das KKL wurde in Zusammenarbeit mit *GENERAL ELECTRIC* durch einen PSI-Mitarbeiter in den USA durchgeführt. Die Rekritikalitätsanalysen zeigten, dass der Reaktor bei Wiederbenetzung wohl wieder kritisch werden könnte, allerdings würden dabei keine solche Leistungsspitzen erzeugt, die eine explosionsartige Brennstofffragmentierung zur Folge haben könnten. Die Stabilitätssimulationen für das KKL zeigten, dass sich bedeutende lokale Leistungsoszillationen im Durchschnitt gegenseitig so kompensieren können, dass die Kernüberwachungssysteme sie nicht "sehen" und daher keine Reaktorschnellabschaltung auslösen. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung von HSK/BEW durchgeführt. Parallel zum Projekt STARS und ebenfalls mit Unterstützung der

HSK nimmt das PSI am internationalen Code Application and Maintenance Program (CAMP) teil, das unter Federführung der amerikanischen Sicherheitsbehörde NRC durchgeführt wird. Im Auftrag des KKW Beznau wurde schliesslich die Funktionstüchtigkeit des Systems bei beschädigtem Kernnotkühlsystem untersucht; signifikante Sicherheitsmargen konnten auch unter solchen Bedingungen nachgewiesen werden.

Mit zunehmendem Alter der Kernanlagen nimmt die Bedeutung des Material- und Komponentenverhaltens für die Anlagensicherheit zu. Experimentelle und analytische Forschungsarbeiten zielen darauf hin, das Verständnis auf diesem Gebiet zu vertiefen und Voraussagen, z.B. über die Restlebensdauer von Komponenten oder deren Verhalten unter extremen Bedingungen machen zu können. Auf dem Gebiet der **Komponentensicherheit** [5] wurde über Benchmark-Rechnungen mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode gezeigt, dass das mechanische Verhalten von Reaktorkomponenten genau simuliert werden kann, auch dann, wenn die Komponenten Defekte aufweisen und extremen Belastungen ausgesetzt sind. So wurde z.B. im Rahmen eines internationalen Projektes das transiente Verhalten eines Leitungssystems mit vorgängig angebrachten Rissen bei einem durch Kühlmittelverlust induziertem Wasserschlag untersucht. Die qualitative Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem globalem Verhalten des Leitungssystems war ausgezeichnet. Dieser Erfolg führte zur Entwicklung eines *Finite-Elemente* Rechenmodells für CORVIS, so dass alle CORVIS-Experimente durch entsprechende Rechnungen begleitet werden können. Bezüglich **Spannungsriss-Korrosion** [6] wird das Verhalten niedrig legierter ferritischer Stähle mit fortgeschrittenen Kreisläufen und Analyse-Techniken simuliert und untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass Spannungsriss-Korrosion erst induziert werden kann, wenn das Wasser eine Sauerstoffgehalt über 0.2 ppm und eine Leitfähigkeit über 0.3 mS/cm aufweist, und der Spannungsintensitätsfaktor 40 MPa $m^{1/2}$ übersteigt. Diese Werte liegen weit oberhalb der in SWR zulässigen Grenzen. Die **Reaktion** von Proben aus niedrig legiertem ferritischem Reakrtordruckgefäss-Stahl und entsprechender Schweisselemente **auf Neutronenbestrahlung** wurde mit Hilfe einer Reihe von Härte-, Dehnungs-, Zähigkeits- und bruchmechanischer Tests in Kombination mit Wärmebehandlung untersucht. Der Härtetest erlaubt allgemeine Bestrahlungseffekte aufzuspüren; der statische Zähigkeitstest auf Charpy-Proben mit künstlich angebrachten Rissen kann eine stärkere Versprödung aufzeigen als dynamische Zähigkeitstests. Die HSK beteiligt sich finanziell an diesen Untersuchungen. Die Proben zur Untersuchung der statischen und dynamischen Bruchzähigkeit sind Bestandteil des Reaktordruckbehälter-Überwachungsprogrammes (*Surveillance*) in den KKW Gösgen und Leibstadt.

Aktivierte Korrosionsprodukte aus dem Reaktorkern werden durch das Kühlwasser abgetragen und an verschiedenen Stellen des Primärkreislaufes abgelagert; diese Radioaktivität trägt einen wesentlichen Teil der beruflichen Dosisbelastung des KKW-Personals bei Wartungs- und Reparaturarbeiten bei. Das Projekt **LWR-Kontaminationskontrolle** [7] hat zum Ziel, die Kenntnisse über die Zusammenhänge und Einflüsse der Kühlwasserchemie bei der Aktivitätsablagerung in den Primärkreisläufen der Kernkraftwerke zu untersuchen, um die Betreiber und die Behörden in ihren Anstrengungen zur Senkung der Personaldosisbelastung zu unterstützen. Die PSI-Arbeiten umfassen den Betrieb eines Simulationskreislaufes, die Erarbeitung und Verifizierung eines Ablagerungsmodells, Laborversuche in Autoklaven, die Entwicklung fortgeschrittener Analysemethoden und vergleichende Untersuchungen in Kernkraftwerken. Im Berichtsjahr wurde im Simulationskreislauf der Abbau von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) sowie die Kinetik der Zersetzung von Wasserstoffperoxid untersucht. Die Arbeiten an einem eigenen vereinfachten Modell (Kristallisations-/Sedimentationsmodell) werden verstärkt weitergeführt. In umfangreichen Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass in Autoklaven mit COUETTE-Strömung das Ablagerungsverhalten von Co^{58} unter kontrollierten Strömungsverhältnissen untersucht werden kann. An Proben aus dem Kreislauf und aus Autoklavenversuchen, welche bis 300 Tage mit Wasser von 290 °C und 90 bar behandelt waren, wurden mittels verschiedener Methoden der Aufbau der Oxidschicht untersucht. Mit Hilfe der *Sputtered Neutral Mass Spectroscopy* (SNMS) und des Rutherford *Backscattering* (RBS) konnte gezeigt werden, dass die Strömungsgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf den Aufbau der Oxidschicht hat. Vor und während der jährlichen Abschaltung des KKM wurden in umfangreichen Analysen des Reaktorwassers die Korrosionsprodukte untersucht; insbesondere wurden die Partikelkonzentration, die gelöste und die partikelgebundene Aktivität sowie die Gehalte an Wasserstoffperoxid in Abhängigkeit vom thermohydraulischen Zustand des Reaktors bestimmt. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt.

Die aktuelle Tendenz im LWR-Brennstoffkreislauf deutet auf Hochabbrand-Brennstoffe hin, d.h. Brennstoffe, die länger im Kern verweilen und somit ihren Energieinhalt besser ausnutzen; die Einsatzdauer solcher Brennstoff-

elemente wird u.a. durch das Materialverhalten der Brennstoffstab-Hüllrohre begrenzt. Im Rahmen des Projektes **EDEN** [8] werden im PSI-*Hotlabor* Korrosions- und Schadensabläufe an Komponenten des Reaktorkernes identifiziert, mit dem Ziel, die Bauteile zu verbessern, ihre Betriebssicherheit noch zu erhöhen, die Restlebensdauer abzuklären und Korrosionsmodellvorstellungen zu entwickeln. Das Berichtsjahr war geprägt von Arbeiten zur Vertiefung des Verständnisses der Hüllrohr-Korrosion und zur Aufklärung des Risswachstums und Schadensfortschrittes an zwei SWR-Brennstäben und einer Steuerstab-Platte; hinzu kam die Charakterisierung hochabgebrannten Uranoxid- und Mischoxid-Brennstoffes. Mit Hilfe der bisherigen vergleichenden elektrochemischen, röntgenographischen, elektronen-optischen und oberflächen-analytischen Untersuchungen an bestrahlten Standard- und "Niedrig-Zinn"-Hüllrohren konnte der Grund für deren unterschiedliches Korrosionsverhalten noch nicht aufgeklärt werden. In einem Modellansatz wird hingegen versucht, das verschiedenartige Korrosionsverhalten mit dem erwarteten Einfluss von Zinn im sauerstoffreichen a-Zirconium der Grundmaterial-Oberflächenschicht zu erklären. Bei der mit Borkarbid und Hafnium gefüllten Steuerstabplatte aus rostfreiem Stahl 304L erscheint aufgrund des interkristallinen Bruchverlaufs die strahlungsinduzierte Spannungsriss-Korrosion als wahrscheinliche Ursache. Das spektakuläre Sekundär-Schadensbild der Zirkon-Liner-Brennstäbe schliesslich kann nicht allein dem schlechten Liner-Korrosionsverhalten zugeordnet werden. Die aufgetretenen langen axialen Risse scheinen nicht kontinuierlich mit zunehmender Linerkorrosion und Wasserstoffaufnahme in der Hüllrohr-Rissspitze zu wachsen. Diese Arbeiten werden im Auftrag der Elektrizitätswirtschaft und der Reaktorindustrie durchgeführt.

ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE [9]

Ziel der Entsorgungsaktivitäten ist es, mit Blick auf die Bewertung schweizerischer Endlager für nukleare Abfälle Modelle zu entwickeln und zu testen sowie Daten zu gewinnen. Die Arbeit konzentrierte sich im Berichtsjahr auf die Weiterentwicklung des Verständnisses sicherheitsrelevanter Mechanismen und Prozesse, die die Freisetzung von Radionukliden aus den verschiedenen Abfallmatrizen bestimmen, und den Nuklidtransport durch das Endlagernah- und Fernfeld; die dadurch erworbenen Kenntnisse wurden in Sicherheitsanalysen angewandt. Zwei Meilensteine der schweizerischen Bemühungen zur nuklearen Entsorgung müssen erwähnt werden: Der erste ist die Wahl des Wellenbergs als Standort für die Lagerung kurzlebiger schwach- und mittelaktiver Abfälle durch die NAGRA; der zweite ist der Abschluss der Sicherheitsstudie KRISTALLIN-1, die ein Endlager für hochaktive Abfälle im kristallinen Sockel der Nordschweiz zum Gegenstand hat. Das PSI hat durch seine Forschung Beiträge zu beiden geleistet.

Die PSI-Arbeiten zu KRISTALLIN-1 deckten alle Aspekte der Sicherheitsbeurteilung. Für ein ganzes Spektrum von Szenarien wurden Auslaugung aus der Glasmatrix, Transport durch die Bentonit-Verfüllung und dem kristallinen Gestein und schliesslich Dosisbelastungen für Menschen berechnet. Es wurde gezeigt, dass das Kristallin der Nordschweiz geeignete Bedingungen für die Lagerung verglaster hochaktiver Abfälle bietet. Für den Referenzfall liegt die berechnete Individualdosis mehr als zwei Grössenordnungen unterhalb des behördlichen Richtwertes von 0.1 mSv/a. Richtig ausgelegte technische Barrieren tragen wesentlich zu diesem günstigen Resultat bei. Unsicherheiten wurden durch die Betrachtung alternativer Szenarien und Modelle und durch Parametervariation abgeschätzt. Den grössten Einfluss hatten die Annahmen zur Geometrie der wasserführenden Zonen und zu Grundwasser-Durchflussraten. Aber auch für die höchsten angenommenen Durchflussraten und ungünstige Geometrie der wasserführenden Zonen bleiben die Dosen unterhalb des behördlichen Grenzwertes.

Der grösste Teil der F&E-Arbeiten widmet sich seit einiger Zeit Sicherheitsfragen eines Endlagers für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle. Ein solches Endlager enthält grosse Mengen von Zement; daher konzentrieren sich die Arbeiten auf das chemische Verhalten von Zement, das Verhalten in Zement gebundener Abfälle, die Nuklid-Zement Wechselwirkung und die Wechselwirkung von Zementwasser mit dem Mergel-Wirtgestein. Eine Datenbasis zur Nuklidsorption in Zement wurde für die Sicherheitsanalysen evaluiert. Verlässliche Daten für sicherheitsrelevante Experimente sind selten; besonders unsicher ist der Einfluss organischer Komplexbildner auf die Sorption. Erste Experimente zeigten, dass Zellulose-Abbauprodukte die Kationensorption merklich reduzieren. Die Charakterisierung der Komplexbildner ist derzeit in Arbeit. Der radiolytische Abbau von Anion-Austauschern erzeugte Ammoniak und Methylaminen; ihr Einfluss auf die Nuklidspeziation in hochalkalinen Lösungen wird derzeit modelliert.

Untersuchungen zur Sorption wurden auf Mergel angepasst. Die Kationenadsorption auf dreilagigen Silikaten zeigt zwei verschiedene Mechanismen, Ionenaustausch und Oberflächenkomplexierung mit strukturellen OH-Gruppen. Der zweite Aspekt wurde bisher nur mittels punktueller und qualitativer Messungen untersucht. In einem Modellfall (Adsorption von Nickel auf Montmorillonit in Funktion von pH und Ionenstärke) wurden am PSI beide Mechanismen untersucht und quantitativ modelliert. Während Adsorption durch Ionenaustausch mit dem Wassersalzgehalt abnimmt, wird die Kationenbindung von der Ionenstärke nicht wesentlich beeinflusst. Der Mergel enthält einen hohen Anteil an feinkörnigem Material; dementsprechend kann Nuklidtransport durch Kolloide wichtig sein. Erste Messungen in Wellenberg haben Kolloidkonzentrationen von 0.1 bis 1.0 mg/l, grob eine Grössenordnung höher als im kristallinen Grundwasser.

Die Entsorgungsaktivitäten des PSI werden von der NAGRA finanziell unterstützt.

SICHERHEITSMERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Im Rahmen eines koordinierten Forschungsprogrammes der IAEO, an dem neben der Schweiz weitere sechs Länder beteiligt sind, werden derzeit am kritischen Reaktor **PROTEUS** [10] Experimente durchgeführt. Sie haben die Reduktion von Auslegungs- und Genehmigungsunsicherheiten bezüglich niederangereicherter Uranbrennstoffe für Hochtemperatur-Reaktoren mittels generischer reaktorphysikalischer Untersuchungen zum Ziel. In den 18 Monaten seit der ersten Kritikalität wurden drei verschiedene deterministische Kugelbett-Kernanordnungen untersucht. Jede Anordnung diente der Studie eines spezifischen reaktorphysikalischen Aspektes, wie der Einfluss eines grossen Leerraumes über dem Kern oder eines Wassereinbruches in den Kern bei stark untermoderierten Anordnungen. Von besonderem Interesse war der Einfluss dieser Effekte auf den Reaktivitätswert der Kontrollstäbe und die Reaktionsraten-Verteilung. Wesentlicher Fortschritt wurde in der Entwicklung und Anwendung qualitätsgesicherter Mess- und Analysetechniken erreicht.

Das Ziel des Projektes **ALPHA** [11] ist die experimentelle und analytische Untersuchung der passiven Langzeit-Nachwärmeabfuhr und des daraus resultierenden Containment-Verhaltens sowie der Spaltproduktrückhaltung in fortgeschrittenen "passiven" LWR der nächsten-Reaktorgeneration. Die Energieabfuhr aus dem Reaktorcontainment aller passiven LWR basiert auf der Kondensierung des verdampften Reaktorkern-Wassers in Präsenz der nicht-kondensierbaren Gase, die die ursprüngliche Containment-Atmosphäre bildeten; die Effizienz dieses Kondensierungsvorganges und die Migration dieser Gase bestimmen das globale Containmentverhalten. Das Projekt ALPHA umfasst drei Experimentieranlagen: PANDA, die in der heutigen Auslegung das Containment eines fortgeschrittenen SWR (GENERAL ELECTRIC; SBWR) im Volumen-Massstab 1:25, jedoch in Originalhöhe (25m), simuliert, LINX, eine kleinere Mehrzweckanlage zur Untersuchung von Kondensations- und gravitationsgetriebenen Vermischungs- und Stratifizierungsphänomenen und AIDA zur Untersuchung von Aerosoltransport und -verhalten in Kondensatoren.

Die Auslegung aller drei Anlagen und die Bestellung der Hauptkomponenten erfolgten bereits 1992. Die Errichtung der Anlagen auf dem PSI-Areal begann früh im Jahre 1993. Ihre Inbetriebnahme ist für den Anfang 1994 geplant. Wesentliche Arbeit wurde in die Auslegung und Entwicklung neuartiger, nicht standardisierter Messsysteme investiert: Beispielsweise wurde eine *wet-bulb / dry-bulb*-Sonde zur Feuchtigkeitsmessung bei hohem Druck und hohem Feuchtigkeitswert in Zusammenarbeit mit der *University of California Berkeley* entwickelt; Erfahrung wird gesammelt auch im Gebrauch und in der Entwicklung optischer und Leitfähigkeits-Sonden für Zweiphasen - Massenstrom-Messungen. Das internationale Interesse am Projekt wächst: neben der ursprünglichen Zusammenarbeit mit dem *ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE* und GENERAL ELECTRIC, werden KEMA (Holland) und IIE (Mexiko) bei der Auswertung der PANDA-Experimente mithelfen, während Diskussionen mit TOSHIBA (Japan) hinsichtlich einer Beteiligung im PANDA-Programm weit fortgeschritten sind.

Das Projekt ALPHA findet mit finanzieller Unterstützung der Elektrizitätswirtschaft und des NEFF statt.

Obwohl schnelle Reaktoren derzeit kein F&E-Thema sind, möchten einerseits die schweizerischen Behörden eine nationale Kapazität zur sicherheitstechnischen Beurteilung solcher Anlagen mit Blick auf die französischen Reaktoren *Phénix* und *Superphénix* aufrechterhalten; andererseits sieht die Elektrizitätswirtschaft längerfristig die Notwendigkeit solcher Reaktorsysteme bei expandierender Kerntechnik und möchte die Ankopplung an

diesbezügliche Entwicklungen nicht verlieren. Das Projekt **Sicherheit schneller Reaktoren** [12] dient dem Verständnis relevanter Sicherheitsaspekte schneller Reaktoren und der Aufrechterhaltung von Know-how auf diesem Gebiet. Am PSI werden reaktorphysikalische und thermohydraulische Aspekte angegangen: In der Reaktorphysik wurden Rechencodes implementiert und mit Benchmark-Problemen getestet. Insbesondere wurden sicherheitsrelevante Reaktivitätskoeffizienten basierend auf verschiedenen international verfügbaren Datensätzen wie JEF-1.1, JEF-2.2 und ENDF/B-6 berechnet. Auf dem Gebiet der Thermohydraulik werden Phänomene der Vermischung von Strömungsschichten unterschiedlicher Temperatur und Geschwindigkeit experimentell untersucht und direkt numerisch simuliert; diese beeinflussen wesentlich die Wärmeabfuhr aus dem Reaktorkern. Experimente in einem Wasserkanal mit transparenten Wänden erlaubten eine gute Visualisierung der Strömungsstrukturen und die Messung der Entwicklung der Mischungsschicht. Analytische Voraussagen durch direkte numerische Simulation waren qualitativ in sehr guter Übereinstimmung mit visuellen Beobachtungen. Diese Arbeiten werden finanziell von der Elektrizitätswirtschaft und dem BEW unterstützt.

Die Reduktion der Bestände an Plutonium und höheren Actiniden ist international zu einem wichtigen Forschung -schungsgebiet geworden. Das PSI konzentriert seine Aktivitäten einerseits auf die Herstellung und Bestrahlung von Proben aus keramischen Metarialien und andererseits auf Untersuchungen zu beschleunigergetriebenen Transmutationssystemen. Auf dem ersten Gebiet wurden Parameterstudien zur Präparation von Zircon-Uran-Nitriden, zur Mischfällung von Uran mit Al_2 MgO_4 sowie zu MOX mit hohem Pu-Gehalt eingeleitet. Im Rahmen des Teilprojektes ATHENA wurde ein kleines UO_2-Target hergestellt und an der PIREX-Anlage mit $3.7 \pm 1.6 \cdot 10^{17}$ Protonen/cm^2 bestrahlt. Ziel dieses Exeprimentes war, die durch Kernmodelle vorausgesagte Massenverteilung an Spalt- & Spallationsprodukten zu validieren. Im Laufe des Jahres wurde das Programm einer kritischen Überprüfung unterzogen. Das Resultat : eine Schwergewichtsverlagerung in Richtung Plutoniumvernichtung und die verschiedenen in diesem Zusammenhang stehenden Aktivitäten des Bereichs unter dem Titel **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen** [13] bereinigt.

GLOBALE BETRACHTUNGEN

Das Projekt **Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen** [14] wurde formell im April 1993 initiiert. Im ersten Projektjahr wurden die PSI-internen und externen (mit ETHZ) Zusammenarbeiten formalisiert sowie zahlreiche internationale Kontakte etabliert. Die Projektkoordination liegt beim PSI-Forschungsbereich **Nukleare Energie, Sicherheit.** In Zusammenarbeit mit der ETHZ wurden desaggregierte, transparente und konsistente Umweltinventare für neun Brennstoffzyklen, basierend auf dem Prinzip *von der Wiege bis zum Grabe*, erstellt. Im Vergleich zu früheren Studien wurde ein viel breiteres Spektrum von Ressourcen sowie von Wasser- und Luftschadstoffen gedeckt; dazu wurden nicht-energetische Ressourcen wie Landverbrauch berücksichtigt. Auf dem Gebiet **Risiko/ Sicherheit** wurde eine vorläufige Datenbasis über schwere (vorwiegend energiebezogene) Unfälle erstellt, die bezüglich relevanter Ereignisse einen viel höheren Deckungsgrad als andere bekannte Datenbasen hat; vorläufige Auswertungen deuten auf eine wesentlich höhere Anzahl von Todesfällen pro Energieeinheit für Öl und Gas als bisher abgeschätzt hin. Parallel konzentrierten sich erste Anwendungen probabilistischer Betrachtungen auf hypothetische nukleare Unfälle. Analysen mittels PSA level 3 für KKM und zwei amerikanischen KKW wurden mit stark vereinfachenden Studien verglichen und die Unzulänglichkeiten der letzteren bezüglich Glaubwürdigkeit der Resultate aufgezeigt. Diese Analysen haben auch gezeigt, dass schwere Unfälle einen quantifizierbaren dennoch sehr kleinen Beitrag (in der Grössenordnung von 0.001 ¢/kWh) zu den externen Kosten der untersuchten Anlagen liefern. An diesen Arbeiten beteiligt sich finanziell das BEW.

3. Internationale Zusammenarbeit

- **CORVIS:** Vertragliche Kopplung von 17 Institutionen aus 11 Ländern im Rahmen einer *Task-Force*.
- **Aerosol-Rückhaltung, POSEIDON:** *ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE* (USA), *FRAMATOME* (F).
- **Komponentensicherheit, HDR-Experimente, Spannungsriss-Korrosion:** Kernforschungszentrum Karlsruhe, IAEA, MPA Stuttgart, VTT (Finnland).
- **EDEN, Materialien des inneren Kernbereichs, Brennstofforschung:** OECD/NEA-Halden Programme, EPRI/NFIR, internationale Brennstoffprogramme (DOMO, PRIMO, GEMINI).

- **PROTEUS-Experimente:** Delegieren von Experimentatoren aus USA, Deutschland, Japan, China, GUS im Rahmen IAEO-Programm; Beteiligung von Frankreich.
- **ALPHA:** *ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, GENERAL ELECTRIC*, KEMA.
- **Schneller Brüter:** *European Fast Reactor* (EFR), CEA.
- **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen:** CEA, OECD/NEA.

4. Perspektiven für 1994

Die oben dargestellten Programme stellen mittel- und langfristige Forschungsaktivitäten dar. Die meisten davon werden auch 1994 fortgeführt oder werden durch neue Aufgaben auf verwandtem Gebiet ersetzt. Bei CORVIS ist es vorgesehen alle 2-3 Monate ein Durchschmelzexperiment durchzuführen; eine stärkere und formellere internationale Einbettung, z.B. als OECD-Projekt, steht in Diskussion. Diskussionen mit der HSK zur Fortsetzung des Projektes STARS wurden bereits eingeleitet; zunächst sollen noch ausstehende Arbeiten aus der ersten Projektphase abgeschlossen und ein computerbasiertes Daten- und Resultaten-Verwaltungssystem erstellt werden; später soll der Schwerpunkt des Projektes auf die Analyse schwerer, auslegungsüberschreitender Unfälle verlagert werden. Die HTR-PROTEUS-Experimente sollen 1995 abgeschlossen werden; erste Überlegungen über Nachfolgeexperimente sowie eine stärkere Einbindung der Anlage in die Hochschullehre werden derzeit angestellt. Im Rahmen des Projektes ALPHA sind die ersten Messungen für Mitte 1994 geplant; Priorität geniessen dabei Messungen, deren Resultate in den Zertifizierungsprozess der US-Sicherheitsbehörden einfliessen. Die Aktivitäten zum schnellen Brüter sollen bis zum Ablauf der bestehenden Verträge mit UAK und BEW (Ende 1996) fortgeführt werden. Falls bewilligt, soll das Programm **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen** zunächst während der nächsten zwei Jahre stattfinden. Im Rahmen von GaBE sollen die Arbeiten zu Umwelteinflüssen, makroökonomischen Modellen und sektorspezifischen Energie-Wirtschaftlichkeitsstudien 1994 in Angriff genommen werden.

5. Publikationen

Im Rahmen der beschriebenen Projekte wurden 1993 über 80 Arbeiten in Fachzeitschriften bzw. in Tagungsbänden von internationalen Konferenzen publiziert; weitere über 60 Arbeiten wurden im Rahmen von Kolloquien und Seminaren präsentiert. Diese sind im Jahresbericht des Forschungsbereichs **Nukleare Energie** des PSI (Annex IV) aufgeführt; die Liste kann auch beim Programmleiter angefordert werden.

6. Liste der Projekte

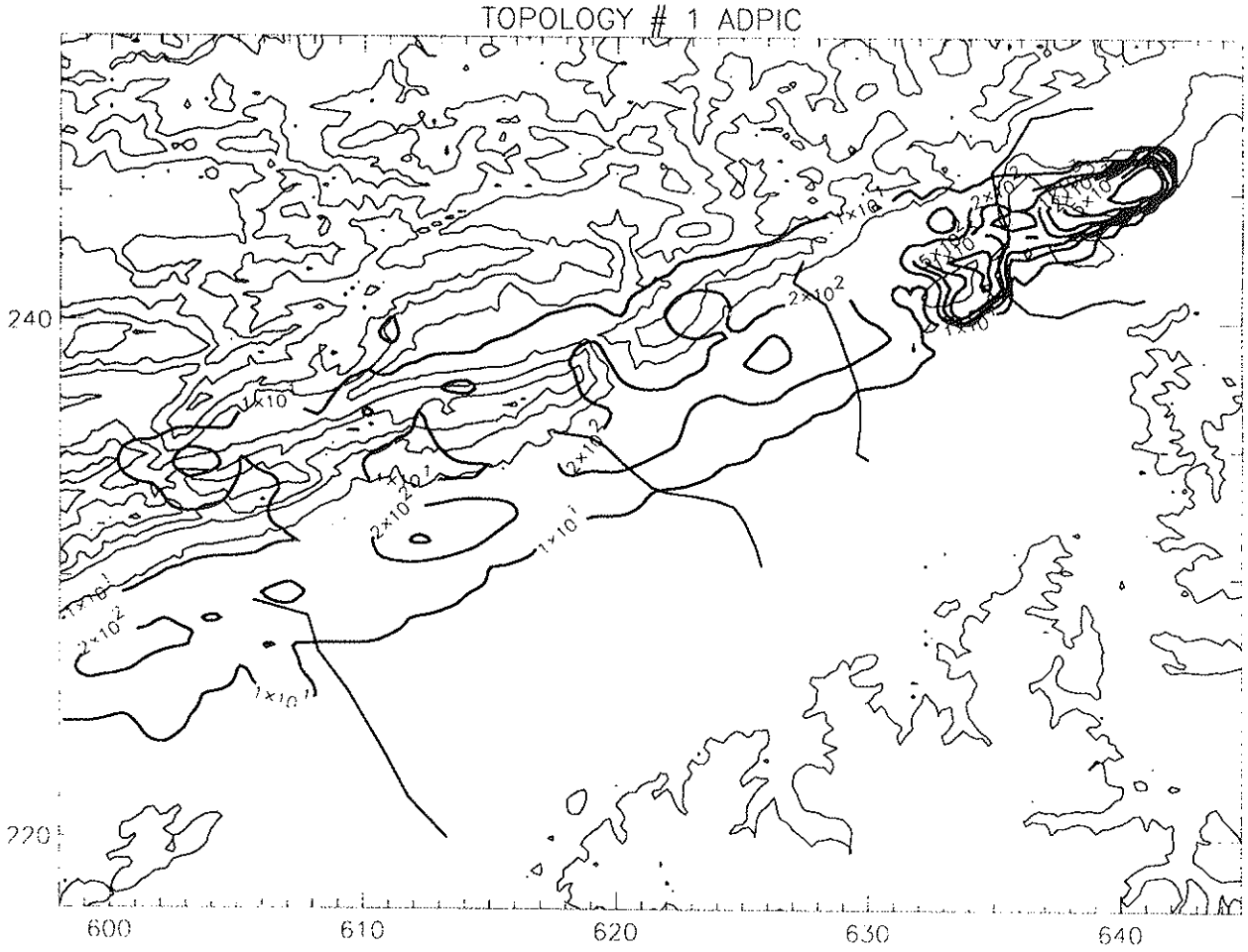
Angaben über Jahresberichte (JB) bzw. Schlussberichte (SB) für die von BEW/HSK mitfinanzierten Projekte sind im nachfolgenden Jahresüberblick "Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK" zu finden.

[1] P. Hosemann, PSI - *Villigen, **Quelltermanalysen***
[2] H. Hirschmann, PSI - *Villigen, **CORVIS (Corium-Reactor Vessel Interaction Studies)***
[3] S. Güntay, PSI - *Villigen, **POSEIDON-II - Experiment***
[4] M. Zimmermann, PSI - *Villigen, **Simulations-Mod. für Transienten Analysen der Reakt. in der Schweiz***
[5] S. Brosi, PSI - *Villigen, **Komponentensicherheit, HDR-Projektarbeiten***
[6] P. Tipping, PSI - *Villigen, **Spannungsriss-Korrosion - Loop***
[7] E. Schenker, PSI - *Villigen, **Kontamination LWR***
[8] G. Bart, PSI - *Villigen, **EDEN (Entwicklung, Durchführung und Evaluation von Nachbestrahlungsuntersuchungen)***
[9] J. Hadermann, PSI - *Villigen, **Programm Entsorgung radioaktiver Abfälle***
[10] R. Chawla, PSI - *Villigen, **PROTEUS - Experimente***
[11] G. Varadi, PSI - *Villigen, **ALPHA (Advanced LWR Passive Heat Remival and Aerosol Retention)***
[12] R. Brogli, PSI - *Villigen, **Sicherheit Schneller Reaktoren***
[13] R. Chawla, G. Ledergerber, PSI - *Villigen, **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen***
[14] S. Hirschberg, PSI - *Villigen, **Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen***

NUKLEARE REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Sabyasachi Chakraborty



Projekt RADAU

Computer-Simulation eines Tracer-Experimentes im Raume Goesgen mit dem ausgewählten Euler-Lagrange-Modell (ADPIC) in 2-dimensionaler Darstellung der Konzentrationsverteilungen. Der Schwaden zieht dem Jura entlang und dringt in ein Seitental, ein.

1. Programmziele

Um den Auftrag der Aufsichtsbehörde HSK (Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, BEW), die Sicherheit der schweizerischen Nuklearanlagen nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik auszurichten, erfüllen zu können, unterstützt und fördert die HSK verschiedene Vorhaben auf wichtigen Gebieten der **nuklearen Sicherheitsforschung**.

Die Arbeiten werden durchgeführt in:

- Forschungsvorhaben am Paul Scherrer Institut PSI und an den Hochschulen.
- Einzelprojekten bei in- und ausländischen Ingenieur-Unternehmungen.
- Beteiligungen an verschiedenen internationalen Forschungsprojekten.

Im folgenden werden diese Vorhaben und Projekte aus der Sicht des Programmleiters schwerpunktmässig kommentiert und deren Nutzen für die HSK beleuchtet. Für detailliertere Informationen und die Literaturlisten wird auf die einzelnen Jahresberichte der Projektleiter verwiesen.

2. Arbeiten und Ergebnisse 1993

Simulationsmodelle Transientenanalyse von LWR (STARS) [1]
(Dauer: 1. September 1988 bis 31. Dezember 1993 ; Stelle: PSI)

Verschiedene Studien über das statische und dynamische Verhalten der Siedewasseranlagen Mühleberg und Leibstadt wurden abgeschlossen. Die Simulationen wurden mit verschiedenen anerkannten Computerprogrammen durchgeführt und den anlagespezifischen Gegebenheiten angepasst.

Zur Erstellung eines Informationssystems, das die anlagespezifischen Daten für die Simulationsrechnungen enthält und benützergerecht aufarbeitet, sind die Spezifikationen erstellt und mit einer Prototyp-Software getestet worden.

Die ursprünglich gesteckten Projektziele wurden nicht alle erreicht. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass die HSK mit Studien ausserhalb der Projektziele für Sicherheitsfragen in der Begutachtertätigkeit unterstützt wurde. Die Arbeiten in diesem Vorhaben sind für die Beurteilung von aktuellen Problemen auf dem Gebiet der Störfallanalyse wertvoll.

LWR Kontaminationskontrolle [2]
(Dauer: 1. Januar 1992 bis 30. Juni 1995; Stelle: PSI)

Die Tätigkeiten konzentrierten sich auf 4 Schwerpunkte:

- Experimente am Pilotkreislauf (Loop) zur Abklärung des Abbaus von gelösten organischen Anteilen aus Ionentauscherharzen und des Zerfalls von Wasserstoffperoxid.
- Experimente mit Autoklaven bei einer kontrollierten Couette-Strömung zur Untersuchung der Kobalt-Ablagerung.
- Erweiterung der HSK-eigenen analytischen Ablagerungsmodelle und Abbklärungen zu bestehenden Modellen.
- Umfassende Messkampagne vor und während der Abschaltung im KKW Mühleberg.

Die auf breiter Front geführten Aktivitäten werden vor allem 1994 die wichtigsten experimentellen Ergebnisse liefern. Die bisher erlangten Erkenntnisse auf dem Gebiet der Reaktorwasserchemie, inbesondere über Ablagerungsmechanismen von Kobalt in Funktion des Eisen- und Zinkgehaltes können von den Betreibern der Siedewasser-Anlagen direkt umgesetzt werden.

Spannungsrisskorrosion von Reaktordruckbehältern [3]
(Dauer: 1. Januar 1989 bis 31. Dezember 1993, Stelle: Institut für Metallforschung und Metallurgie ETHZ)

Es wurden zahlreiche Experimente zur Erfassung der Wachstumsgeschwindigkeit von Spannungskorrosionsrissen in Reaktordruckbehältern unter reaktornahen Bedingungen durchgeführt. Insbesondere wurde der Einfluss des Sauerstoffgehaltes, des elektrochemischen Potentials, der Temperatur, des Schwefelgehaltes und der Spannungsintensität untersucht. Eine Dissertation mit den Ergebnissen aus diesem Projekt steht vor ihrer Fertigstellung.

Obwohl die eingesetzte Wasserchemie nicht der in schweizerischen Anlagen vorliegenden Reinheit entsprach, stehen um der HSK wertvolle Erkenntnisse für die Abschätzung der Lebensdauer von druckführenden Anlagekomponenten zur Verfügung.

Spannungsrisskorrosion von Stählen für Reaktorkomponenten im Heisswasser [4]
(Dauer: 1. April 1990 bis 31. März 1995; Stelle: PSI)

Verschiedene Versuche zur Untersuchung der Spannungsrisskorrosion im Autoklavenkreislauf unter Variation der Wasserchemie, insbesondere des Sauerstoffgehaltes und der Leitfähigkeit, wurden durchgeführt. Ein Modell zur Beschreibung der Spannungsrisskorrosion wurde weiterentwickelt. Ein neuer Autoklav mit einer realistischeren Probenbelastungsmethode konnte in Betrieb genommen werden.

Ein Gesamtgutachten über den Stand der Technik der Kreisläufe, der Autoklaven und der Messgeräte wurde im Auftrag des PSI von der Firma CAPCIS MARCH erstellt. Gemäss dieser Begutachtung sollte das wissenschaftliche Vorgehen geeignet sein, um die Spannungsrisskorrosion unter den extremen Bedingungen zu erforschen.

Experimente zum Reaktor-Druck-Behälter-Versagensmodus beim Kernschmelzen (CORVIS) [5]
(Dauer: 1. November 1991 bis 31. Dezember 1995; Stelle: PSI)

Der Experimentierstand konnte Anfang Februar fertiggestellt werden. Die Funktionstests wurden durchgeführt und die Experimentiertechnik erprobt. Beim 1. Hauptversuch im Juni wurde mit einer Thermit-Schmelze von 800 kg gearbeitet. Nach rund 3 Minuten musste der Versuch aufgrund unerwarteter Vorgänge abgebrochen werden. Die Beschädigungen wurden untersucht und daraus die Verbesserungsmassnahmen abgeleitet. Die Modellierung der Vorgänge in der Schmelze werden weitergeführt.

Das Projekt CORVIS ist von einem Beratungsgremium mit Delegierten von 18 Institutionen aus 11 Ländern begleitet. Die beim 1. Hauptversuch entstandenen Beschädigungen am Versuchsstand werden eine Verzögerung des Terminplanes ergeben.

Wasserstoff-Zündgrenzen [6]
(Dauer: 14. November 1991 bis 31. Dezember 1994; Stelle: PSI)

Die Versuche wurden an einem nachgerüsteten Autoklaven beim SVDB durchgeführt. Die Zielsetzung, die untere Zündgrenze von Wasserstoff-Dampf-Luft-CO2-Gemischen bei Bedingungen während eines schweren Kernschmelzunfalles im Containment zu bestimmen, konnte erfüllt werden. Die Erkenntnis, dass in allen Fällen eine untere Sauerstoffgrenze von 6,5 Vol-% entscheidend ist und dass auch bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen eine vollständige Wasserstoffverbrennung möglich ist, war neu.

Die Ergebnisse der Versuche sind in den Simulationsmodellen für schwere Kernschmelzunfälle eingebaut worden.

Zusammenarbeit HSK-PSI in der Dosimetrie [7]
(Dauer: 1. Januar 1992 bis 31. Dezember 1994; Stelle: PSI)

Es wurden 5 Teilprojekte bearbeitet und zum Teil abgeschlossen:

- Vorarbeiten für eine Richtlinie über Freimessung von Materialien

- Transportverluste in Aerosolmessgeräten
- Unterstützung der Organisation eines internationalen Workshops am PSI
- Test der Messsonden für ein Feld-Überwachungssystem (MADUK)
- Kalibrieren des Freigabemonitors im KKW Gösgen

Im Hinblick auf die neue Strahlenschutzverordnung und die erweiterten Überwachungskonzepte bei den KKW's hat die Dosimetrie einen besonderen Stellenwert. Die Zusammenarbeit HSK-PSI ist deshalb wichtig und wertvoll.

Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen [8]
(Dauer: 1. Januar 1989 bis 31. Dezember 1993; Stelle: Institut für Geophysik, ETH-Zürich)

Mit dem verbesserten Aerogamma-Spektrometriesystem (Navigation, Stromversorgung) wurden Praxistests durchgeführt. Insgesamt sind dazu 26 Flugstunden benötigt worden. Die Resultate der Messflüge 1993 liegen im Rahmen der Erfahrungswerte der früheren Jahre. Der Aktivitätspegel in der Umgebung der Kernanlagen blieb unverändert. Die Schulung der Mitarbeiter der HSK, SUeR, NAZ erfolgte gleichzeitig mit den Messflügen.

Die über 5 Jahre erfolgten Messflüge dienen der Erweiterung der nuklearen Beweissicherung sowie als Vergleichsbasis bei allfälligen Verstrahlungsfällen.

Strukturelle Verhältnisse in der nördlichen und östlichen Schweiz (Abschluss) [9]
(Dauer: 1. März 1993 bis 31. Dezember 1993; Stelle: RICO RESEARCH, Niederrohrdorf)

Die seit 1989 für die HSK ausgeführten Auswertungen von seismischen Reflexionsprofilen der NAGRA, insbesondere im Projekt "Opalinuston" wurde mit einem Synthesebericht abgeschlossen. Die Verhältnisse haben sich als komplexer herausgestellt, als ursprünglich angenommen wurde. Es existieren aber genügend ausgedehnte Gebiete mit ruhiger Lagerung des Opalinustons und der unteren Süsswassermolasse. Neu ist die Entdeckung zahlreicher Anzeichen für Kohlenwasserstoffvorkommen. Dieser Aspekt muss wegen des Nutzungskonfliktes im Auge behalten werden.

Die unabhängige Auswertung der Seismik durch einen externen Experten hat sich als sinnvoll erwiesen.

Verhalten von Radionukliden aus Kernkraftwerken in Aare und Rhein [10]
(Dauer: 1. November 1992 bis 31. Oktober 1994; Stelle: EAWAG)

Radionuklide (speziell Co^{60}) wurden in Wasserproben aus Feldkampagnen an Tagen der Abwasserabgabe aus dem KKW Mühleberg bis in den Bielersee bestimmt. Es zeigte sich, dass rund die Hälfte von Co^{60} im Wasser gelöst, der andere Teil an Partikeln angelagert (adsorbiert) ist. Mit hydraulischen Berechnungen konnte gezeigt werden, dass rund 80% des Co^{60} den Bielersee erreichen.

Die Kenntnisse über das Transportverhalten der Radionuklide aus den Abwässern der KKW stellt ein wichtiger Schritt für die Überwachung und mögliche Massnahmenplanung bei Störfällen dar. Zugleich dienen die Ergebnisse als Basis für Gespräche mit Rheinanstösser-Ländern.

RADAU: Dosisbelastung durch atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe im komplexen Gelände[11]
(Dauer: 1. Januar 1991 bis 31. Dezember 1993; Stelle : PSI)

Der ausgewählte amerikanische Simulationscode ADPIC wurde im Berichtsjahr vom Ersteller modifiziert. In der Zwischenzeit wurde eine menuegesteuerte Benutzeroberfläche erstellt, die sich auf die vorhandene Codeversion abstützt und erste Erfahrungen für den Benützer geben soll. Mit diesem Simulationscode soll die HSK die Möglichkeit erhalten, gegenüber den herkömmlichen Methoden verfeinerte Ausbreitungsrechnungen nach schweren Unfällen in KKW's machen zu könenn. Diese Simulationen erlauben auch die Justierung der Randbedingungen mit Feldmessungen.

Das Projektziel konnte vom zeitlichen Ablauf her nicht erreicht werden und muss ins laufende Jahr verlängert werden.

Berechnung der kinetischen Parameter von Leichtwasserreaktoren [12]
(Dauer: 1. Mai 1989 bis 30. April 1994 ; Stelle : Institut de Génie Atomique, ETH-Lausanne)

Die neuentwickelte mathematische Methode erlaubt es, die reaktorkinetischen Parameter mit Standard-Codes für stationäre Reaktorzustände zu ermitteln. Dazu sind nur kleine Modifikationen notwendig. Die Berechnungsmethode wurde am Forschungsreaktor CROCUS validiert und an einem Beispiel beim KKW Beznau mit Erfolg angewendet. Dieses Forschungsprojekt wurde in Form einer Dissertation durchgeführt. Die Arbeit ist bis auf den redaktionellen Teil abgeschlossen.

Für die HSK ist es wichtig, dass die Berechnungen der Brennelementhersteller mittels unabhängiger Rechenmethoden überprüft werden können.

Technical Support and On-Call Assistence to HSK on:
Thermal Hydraulics, Severe Accidents and Risk Assessment **[13]**
(Dauer: 12. Juli 1992 bis 31. Dezember 1994; Stelle: *Energy Research*, Rockville, USA

Mit verschiedenen international anerkannten Rechencodes wurden Störfallanalysen für die KKW's Beznau und Leibstadt durchgeführt.

Es ist notwendig, dass die HSK unabhängig vom Betreiber oder Ersteller einer Anlage Störfallanalysen nachrechnen kann. Solche Berechnungen können nur von Fachleuten vorgenommen werden, welche die betreffenden Rechencodes verstehen und handhaben können.

Development of a Basis for Beznau Living PSA using the SPSA Computer Code **[14]**
(Dauer: 6. Juni 1992 bis 18. Juni 1993; Stelle: *Energy Research*, Rockville, USA)

Für das KKW Beznau wurden funktionale Ereignisbäume für eine Living PSA entwickelt und im SPSA-Computer-Code integriert. Das Projekt wurde Mitte 1993 mit einem Schlussbericht erfolgreich abgeschlossen.

Die Begleitung einer Anlage mit einer Living PSA stellt eine optimale Methode dar, schnelle und fundierte Entscheidungsgrundlagen zu liefern.

Maitrise de la spectrométrie et de la dosimétrie neutroniques dans des champs de radiation complexes **[15]**
(Dauer: 1. Januar 1993 bis 31. Dezember 1994, Stelle: CERN, Genf)

In Zusammenarbeit mit dem IRA (Uni Lausanne) wurden ein Spektrometer- und ein Dosimeter-System weiterentwickelt, um Hochenergie-Neutronen zu messen. Verschiedene Messkampagnen mit Vergleichsmessungen im Rahmen der *Working Group 7* der EURODOS konnten durchgeführt werden. Die Messergebnisse sind vielversprechend.

Die Überwachung von nuklearen Energie- und Forschungsanlagen soll mit bestmöglichsten Methoden und Verfahren durchgeführt werden. Diese Tätigkeiten sind ein wichtiger Beitrag für erweiterte Überwachungskonzepte.

Radioanalytik [16]
(Dauer: 1. Januar 1993 bis 31. Dezember 1995; Stelle: PSI)

Es wird ein Dosimetrie-Verfahren zur Erfassung der Aktiniden (Strontium 90) und α-Strahler bereitgestellt. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Aufarbeitungsverfahren von Proben zur Bestimmung von Strontium-90.

Diese Arbeiten sind wichtig für die Umgebungsüberwachung nach radioaktiver Freisetzung aus Nuklearanlagen nach Störfällen.

Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des schnellen Brutreaktors [17]
(Dauer: 1. Januar 1992 bis 31. Dezember 1996; Stelle: PSI)

In der Reaktorphysik wurden Rechenprogramme implementiert, den speziellen Gegebenheiten des schnellen Brutreaktors angepasst und an Benchmark-Problemen getestet. Erste vereinfachte Superphenix-Rechnungen sind durchgeführt worden. In der Thermohydraulik wurden Vorversuche mit Wasser für die geplanten Mischexperimente mit Natrium durchgeführt. Diese Ergebnisse haben die Auslegung des geplanten NAMIX-Experimentes wesentlich beeinflusst.

Für das BEW ist es wichtig, auf Fachkompetenz für schnelle, natriumgekühlte Brutreaktoren zugreifen zu können, falls neue sicherheitstechnische Probleme mit dem französischen Brutreaktor auftreten und im Hinblick auf Anfragen vom Parlament und den Kantonen die Sicherheitsrelevanz beurteilt werden muss.

3. Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des OECD-Forschungsprogrammes über Halden Reactor Project in Norwegen arbeiten 2 Wissenschaftler aus der Schweiz für Weiterbildungszwecke auf dem Gebiet Mensch-Maschine-Wechselwirkung mit.

Die Zusammenarbeit über die schwere Unfallforschung mit der amerikanischen Sicherheitsbehörde USNRC ermöglicht der Schweiz, die fortschrittlichen und validierten umfassenden Computercodes für die Beurteilung des Verhaltens der schweiz. Kernkraftwerke bei schweren Unfällen zu erhalten.

Die weitere Teilnahme am international angewandten Forschungsprogramm International Piping Intergrity Research Group (IPIRG) hat den Zweck, das Bruchverhalten von Rohrleitungen in den nuklearen Anlagen unter dynamischen Belastungen zu untersuchen.

4. Perspektiven für 1994

Mit der Alterung der Kernkraftwerke entstehen neue Fragen, die zu beantworten, weitere Forschungsanstrengungen insbesondere auf dem Gebiet des Werkstoffverhaltens erfordern.

Das OECD-Halden-Forschungsprogramm wurde für weitere 3 Jahresperioden (1994-1996) verlängert. Die Schweiz setzt wegen der guten Erfahrung mit der Weiterbildung der Schweizer Wissenschaftler die Mitarbeit fort.

5. Liste der Projekte

[1] E. Knoglinger, PSI - *Villigen*: ***Simulationsmodelle zur Transientenanalyse (STARS) von LWR.*** (JB)

[2] E. Schenker, PSI - *Villigen*: ***Kontaminationskontrolle im Primärkreislauf von schweizerischen Siedewasserreaktoren.*** (JB)

[3] R.M. Pedrazzoli, A. Kraus, M.O. Speidel, IMM / ETH - *Zürich*: ***Spannungsrisskorrosion von Reaktordruckbehälterstählen.*** (JB)

[4] Ph. Tipping, U. Ineichen, PSI - *Villigen*: ***Spannungsrisskorrosion von Stählen für Reaktorkomponenten in Heisswasser.*** (JB)

[5] H. Hirschmann, PSI - *Villigen*: ***Experimente zum RDB-Versagensmodus beim Kernschmelzen (CORVIS).*** (JB)

[6] E. Schenker, PSI - *Villigen*: ***Wasserstoff-Zündgrenzen.*** (JB)

[7] Ch. Schuler, PSI - *Villigen*: ***Dosimetrie.*** (JB)

[8] L. Rybach, ETH - *Hönggerberg*: ***Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen.*** (JB)

[9] E.H.K. Kempter, RICO RESEARCH, *Niederrohrdorf*: ***Strukturelle Verhältnisse in der nördlichen und östlichen Schweiz***

[10] A. Albrecht, J. Beer, EAWAG - *Dübendorf*: ***Verhalten von Radionukliden aus Kernkraftwerken in Aare und Rhein***

[11] V. Herrnberger, PSI - *Villigen*: ***Programmsystem RADAU für die Ermittlung der Dosisbelastung durch atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Stoffe im komplexen Gelände.*** (JB)

[12] C. Decurnex, EPFL - *Lausanne*: ***Evaluation des paramètres cinétiques des centrales nucléaires application aux centrales utilisant des combustibles mixtes***

[13] M. Khatib-Rahbar, ERI, *USA*: ***Technical Support: Thermal Hydraulics, Severe Accidents and Risk Assessment.*** (SB)

[14] M. Khatib-Rahbar, ERI, *USA*: ***Development of a Basis for Beznau Living PSA using the SPSA Computer Code.*** (SB)

[15] M. Höfert, CERN, *Genf*: ***Maîtrise de la spectrométrie et de la dosimétrie neutroniques dans des champs de radioprotection complexes***

[16] S. Bajo, PSI - *Villigen*: ***Radioanalytik.*** (JB)

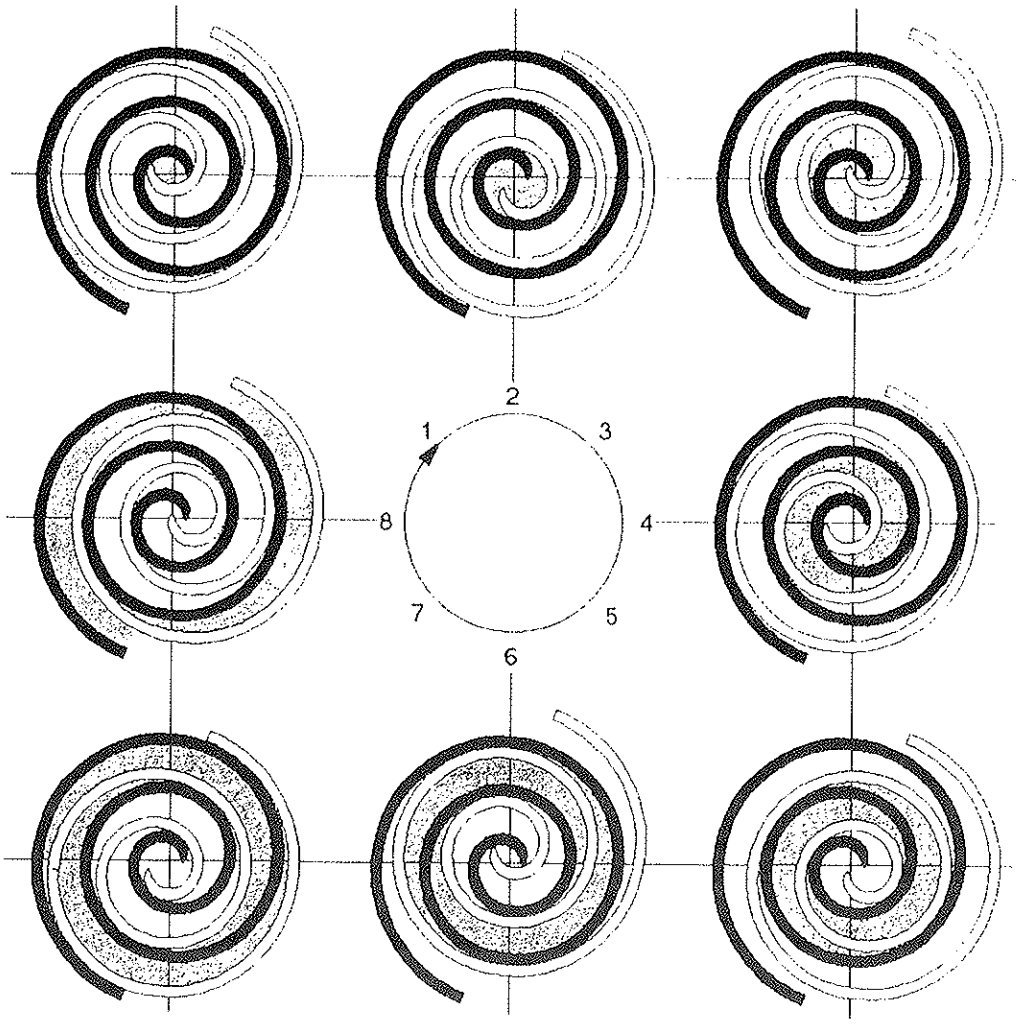
[17] R. Brogli, PSI - *Villigen*: ***Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des schnellen Brutreaktors***

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

SOLAIRE THERMIQUE
ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 1993 du programme de recherche

Chef de programme: Pierre Bremer



Turbine Scroll

Évolution du fluide de travail en cours de détente

1. Objectifs

Pendant l'année 1993, les divers travaux de recherche entrepris dans le cadre du programme 1992-1995 ont été poursuivis.

Six projets ont pu être menés à terme [1, 4, 5, 6, 8, 22]. Six projets sont en voie d'achèvement [11, 14, 15, 16, 17, 18]. Huit projets sont encore en cours [2, 3, 9, 10, 12, 13, 19, 23] et deux projets sont nouveaux [20, 21].

2. Les travaux effectués en 1993

MÉTÉOROLOGIE SOLAIRE

Dans le cadre d'un projet de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), il s'agissait, entre autres, de déterminer des **techniques adéquates pour l'interpolation spatiale des mesures du rayonnement solaire.** Ces travaux sont terminés et le rapport final "*Techniques for Supplementing Solar Radiation Network Data*" a été publié et est disponible auprès d'ENET [1].

L'une des techniques, le *krigeage*, plus particulièrement mis au point par la contribution suisse, est actuellement appliquée pour l'interpolation spatiale des mesures du rayonnement du réseau ANETZ en Suisse et utilisée pour la mise à jour de la publication **METEONORM 95**.

COMPOSANTS

Comme par le passé, les travaux de recherche concernant la technique des capteurs et des composants solaires ont été poursuivis au **Laboratoire Fédéral d'Héliotechnique de Rapperswil.** Son infrastructure a été complétée par des stands destinés à la mesure d'installations complètes de chauffe-eau.

Les principaux résultats sont [2]:

- *28 nouveaux capteurs ont été testés*, ce qui porte le nombre total à 86. Les catalogues des protocoles de mesures continuent de jouir d'une grande popularité. *Un millier d'exemplaires a été vendu.*

- Le nouveau stand pour capteurs à air a permis d'analyser un premier prototype et de *proposer des améliorations importantes.*

- La parution du rapport sur la *résistance des couvertures transparentes aux intempéries* a dû être reportée en 1994.

- La procédure de consultation internationale du rapport final du projet AIE sur le *traitement de surface des absorbeurs* est toujours en cours.

- Le *polyglycolether* est un produit antigel présentant une bonne stabilité chimique jusqu'à 200°C. Par contre, sa chaleur massique est faible, ce qui pourrait exiger une augmentation importante du débit du caloporteur et, conséquemment, de la *consommation électrique* de la pompe de circulation. Des essais comparatifs sur deux circuits *identiques* mais de caloporteurs *différents* seront entrepris.

- Les stands d'essais "systèmes", initialement construits dans le cadre des travaux de recherche d'un projet AIE, ont été modifiés pour déterminer les performances de chauffe-eau solaires. Il s'agit de mettre au point des *procédures de mesures permettant d'estimer la production annuelle sur la base de périodes de mesures de courte durée*. Cette activité devrait donner naissance à une **nouvelle norme ISO**.

- Une instrumentation spéciale, destinée à l'analyse de la distribution angulaire du rayonnement diffus, a été aménagée *par les étudiants de l'Ecole d'Ingénieurs de Rapperswil* lors de leurs travaux de semestre et de diplôme.

Les premiers résultats concernant le projet **Absorbeur 2000** sont encourageants [3]:

- L'appareil de mesure de l'efficacité de captage a été modifié pour permettre une *mesure quasi-automatique*;
- la construction en cuivre du tube à ailette en forme de Ω donne comparativement une bonne *efficacité de captage* pour un poids spécifique faible de 2,1 kg/m^2;
- la rugosité de la surface de la tôle de cuivre est déterminante pour la stabilité long terme de la couche sélective appliquée. Elle devrait être *inférieure à 50 nm*, valeur normalement pas atteinte par les tôles du commerce. Des contacts ont été pris avec l'industrie concernée.

Les résultats obtenus après 2 ans de mesures montrent que la conception originale du **capteur en asphalte** mérite d'être répétée. Constitué d'un réseau de tubes de cuivre noyés dans l'asphalte de la cour d'une salle polyvalente communale, ce prototype recharge les sondes en terre d'une installation de chauffage par pompe à chaleur. La production moyenne annuelle a atteint **300 kWh/m^2** [4].

Dans le projet **TOBLERONE**, plusieurs prototypes de chauffe-eau intégrés ont été fabriqués et testés. Les résultats ont été analysés au moyen du logiciel de simulation TRNSYS. Si la quantité d'eau chaude produite au moyen de capteurs non couverts pourrait convenir aux besoins d'un ménage de 2 à 3 personnes, le problème du gel des conduites de raccordement et de l'accumulateur intégré reste entier. Aucune des 5 variantes de configuration envisagées ne présente une solution vraiment satisfaisante. Le projet sera poursuivi sur une base privée [5].

APPLICATIONS

La conception énergétique de l'immeuble industriel de **Marcinhès**, à Meyrin, fait intervenir 940 m^2 de capteurs plans, un stockage souterrain de 2'000 m^3, une pompe à chaleur de 215 kW, trois chaudières auxiliaires (gaz, mazout, bois) totalisant 640 kW, ainsi que 3'400 m^2 de façade double-peau. Tous les éléments principaux ont fait l'objet de mesures en continu afin d'analyser le comportement de chaque composant et d'établir le bilan énergétique global. Les conclusions principales du rapport final sont :

- les capteurs solaires, mesurés pendant 3 ans, présentent des caractéristiques stables et un *rendement annuel de 40 à 50 %*;
- le stockage souterrain comportant 258 sondes en double U, d'une profondeur de 14,5 m, a fonctionné sans faille. Son efficacité a néanmoins été limitée par les *nombreuses pannes de la PAC*.
- La PAC *a mal fonctionné* et son COP a varié entre 1,1 et 1,8.
- L'inachèvement de la double-peau a permis de montrer tous les problèmes qu'une telle façade implique, notamment celui des *surchauffes estivales*.
- Le bilan énergétique du bâtiment, *inachevé et partiellement occupé*, a été de 126 MJ/m^{2}an en 90/91 et de 138 MJ/m^{2}an en 91/92. Le taux de renouvellement d'air a été bas (0,2 h^{-1}), ainsi que la température intérieure (17,8°C et 16,8°C). Vu cette faible demande et le mauvais fonctionnement de la PAC, le couplage ne constitue en réalité qu'une source de froid artificielle et non pas, comme on peut le croire, un stockage saisonnier proprement dit.

Malgré les difficultés rencontrées lors de ce projet, la qualité et la quantité de mesures ont permis de vérifier divers modèles de simulation traitant du comportement dynamique d'un stock en terre. Ces divers travaux ont fait l'objet d'une **thèse de doctorat** présentée à l'Université de Genève [6, 7].

L'installation **pilote de stockage en nappe phréatique** avait deux buts:

- montrer la possibilité de réaliser une toiture solaire bon marché de performances intéressantes dans la *gamme de température de 20 à 50°C*;
- tester la possibilité d'un *stockage en nappe phréatique* de taille modeste, d'un coût abordable, dans des conditions hydrogéologiques difficiles.

Le premier but a été largement atteint au moyen de ***capteurs non vitrés*** (absorbeurs sélectifs en acier inox), dont la production a été de 500 kWh/m^2. Le second but n'a pas été atteint: le débit de l'écoulement naturel dans la nappe a été trop élevé, de sorte que la plus grande partie de la chaleur stockée a été progressivement déplacée hors de la zone de stockage et *perdue*. Une tentative de stabilisation de la nappe, consistant à réinjecter en amont une partie du débit aval, n'a pas sensiblement amélioré la situation. Malgré cet échec, ce projet a été riche en enseignements divers et a permis la mise au point d'une toiture solaire performante et d'un coût abordable [8].

Au cours du 11ème cycle de **SPEOS (Stockage de chaleur en nappe phréatique)**, la recharge estivale usuelle n'a pas pu avoir lieu, car les têtes des drains inférieurs doivent être révisées pour cause de détérioration par corrosion et colmatage. La phase de décharge a été maintenue. Le système de gestion du stockage a été mis à jour en vue de préparer la phase de télésurveillance. Par ailleurs, une localisation des sources de rejets thermiques en Suisse et des utilisateurs potentiels a été faite [9].

La préétude concernant la possibilité d'un **stockage latent de chaleur de récupération dans un système industriel** avait été retardée en 1992 par les difficultés opérationnelles du système de rejet de chaleur. Après de nombreux essais avec diverses techniques de filtration, l'échangeur air/eau, qui s'encrassait régulièrement, fonctionne convenablement. Les mesures de puissance proprement dites pourront commencer incessamment [10].

Les **systèmes de régulation prévisionnelle**, appliqués à deux installations solaires identiques (eau chaude et chauffage) ont donné des résultats très intéressants: les performances des installations ont été ***améliorées de 12 resp. 15 %*** par rapport à une régulation conventionnelle. Des améliorations ont été apportées aux installations et aux algorithmes de régulation. Ces modifications doivent permettre d'atteindre des économies d'énergie de l'ordre de 20 % sur la saison 93/94 [11].

Le projet **CSIP2**, entrepris en commun par le laboratoire d'énergie industrielle de l'EPFL et du *Lab. für Energiesysteme* de l'EPFZ, basé sur la conception d'un *cycle de Rankine à 2 étages*, équipé de turbines-génératrices hermétiques, a franchi un premier pas important. En effet, il n'était pas évident de faire tourner en turbine un compresseur **Scroll**, machine produite en grandes séries et utilisée normalement dans des groupes de froid. Ce nouveau concept de turbine a été testé avec succès en mode quasi-stationnaire sur la plage de température correspondant à l'étage inférieur du cycle. L'évolution du fluide de travail en cours de détente est représentée sur la première page de ce rapport. Un programme de simulation du cycle est en bonne voie et plusieurs alternatives de capteurs ont fait l'objet d'étude théorique [12].

Le projet **SAILLON 1 MW Solaire** (62 m^2 de capteurs vitrés, 957m^2 de capteurs non-vitrés, stock saisonnier en acquifère, distribution par *calobus sanitaire)* est partiellement en service. Fin février 1993, 2/3 des logements étaient terminés. 16 appartement sur 22 sont occupés. Les capteurs vitrés sont opérationnels, les capteurs non-vitrés sont posés. L'installation de mesures fonctionne et la mise en service de l'ensemble aura lieu au printemps 1994 [13].

Les *sheds* d'une halle industrielle sont couverts **de panneaux photovoltaïques hybrides refroidis à l'air**. Cet air sert à la ventilation et, en été, sa chaleur est stockée en terre. Le stock souterrain est accouplé à une pompe à chaleur. Un groupe de chaleur-force complète l'installation. Le taux de couverture total (chaleur et électricité) nominal escompté est de 70 %. Pendant la période 1992-93, ce taux a atteint 64 %. Le couplage stock-PAC n'est pas encore optimal et l'onduleur n'a pas toujours fonctionné à plein rendement. Ces défauts ont été éliminés et l'on s'attend à atteindre le but fixé au courant de la saison en cours. Il faut relever que le "rendement air" des capteurs hybrides a dépassé toutes les attentes, soit 35 à 38 % au lieu de 20 %, ce qui est remarquable pour un premier prototype [14].

L'autonomie énergétique d'une fabrique de composants solaires n'a pas été entièrement atteinte pendant sa première année de fonctionnement. Les 80 m^2 de panneaux photovoltaïques ont produits 52'147 kWh, *soit 93% des 56'246 kWh consommés*. Le convertisseur de courant électro-mécanique fonctionne sans faille. Le bilan thermique de la saison n'a pas pu être établi, la mise en service n'ayant eu lieu qu'en décembre 1992 [15].

La procédure du taux de couverture annuelle d'un chauffe-eau solaire sur la base d'une *période de mesure de quelques semaines* mentionnée ci-dessus, avait été mise au point sur des installations de petite taille. Elle a été appliquée, à titre d'essai, sur une installation de 200 m^2 chauffant des accumulateurs d'une contenance totale de 4'000 litres et alimentant 126 logements, soit environ 400 habitants. Les mesures faites couvrent une saison complète. L'estimation de la production annuelle sur l'extrapolation des mesures d'un mois particulier a donné des résultats compris dans une fourchette d'erreur satisfaisante de -6 à +4%. Par contre, les valeurs des paramètres physiques du modèle décrivant l'installation, déterminées par un algorithme dit *d'identification de paramètres*, varient de mois en mois dans des rapports qui peuvent aller jusqu'à 4. En d'autres termes, ***un résultat juste est obtenu avec des paramètres faux***. La suite des travaux devra lever cette ambiguïté [16].

Selon une enquête faite auprès de 1'300 propriétaires **d'installations de séchage solaire du foin**, 97 % des utilisateurs sont satisfaits. 60 % des installations ont été construites par leur propriétaire. La surface moyenne de captage est de 250 m^2, avec un coût moyen de 40,- Fr./m^2. Environ 2/3 des installations sont construites avec un toit en éternit. Cinq installations ont été mesurées afin de vérifier et valider le programme de dimensionnement utilisé. Le rapport final paraîtra au début 1994 [17].

Une préétude théorique d'une **installation de climatisation "tout solaire" d'un bâtiment administratif** est en cours [18]. Les composants principaux, existant sur le marché, ont été choisis et définis. Ils comprennent des capteurs évacués, un groupe de froid à absorption, un accumulateur, des dalles thermoactives pour la réfrigération et le chauffage, et une chaudière d'appoint. L'étude se fera au moyen du logiciel de simulation solaire "TRNSYS" .

Une maison familiale comportant 2 appartements a été équipée d'un chauffage **solaire avec stockage saisonnier**. La surface de captage est de 70 m^2, le stockage est réparti sur 2 cuves à eau d'un volume de 40 et 5 m^3. L'accumulateur d'eau chaude sanitaire se trouve dans la 2ème cuve. Cette configuration permet une gestion très flexible de l'installation. Le système de régulation a été conçu et exécuté au moyen d'appareils programmables existant sur le marché. Le but du projet est de déterminer la stratégie de réglage optimale ***en variant les critères de gestion en fonction de la saison***. La mise en service a eu lieu en août 1993 [19].

Le nouveau projet **GEOSER** sert à l'étude du stockage diurne de la chaleur excédentaire d'une serre. Trois serres identiques ont été construites. Dans l'une, l'excédent de chaleur est récupéré par un échangeur air/sol et *stocké dans une cuve à eau*. Dans une autre, la chaleur de l'air chaud est *stockée en terre dans des conduites aménagées sous la serre*. La troisième serre sert de témoin. Les composants des systèmes ont été dimensionnés dans le cadre d'une étude de faisabilité, qui a montré un *potentiel d'économie d'énergie intéressant pour un coût abordable*. Le but du projet GEOSER est de vérifier ces estimations, tout en surveillant la croissance des cultures, et de valider un programme de simulation développé à cet effet. Les serres sont pleinement fonctionnelles depuis novembre 1993 [20].

Dans le but d'explorer les possibilités de **l'application de la production de froid d'origine solaire**, une installation avait été réalisée en 1983 sur l'initiative de l'Association pour le développement des énergies renouvelables (ADER). Pendant 10 ans, un groupe de froid à absorption a assuré le refroidissement d'une cave à vin. Il importait de faire le point sur cette technique et d'explorer les perspectives de la production de froid à partir de l'énergie solaire. C'est le but du nouveau projet **CLIMSOL**, qui a débuté en septembre 1993 [21].

LOGISTIQUE

Le **programme de simulation BWE91** calcule l'énergie utilisable d'un capteur à une température constante et pour une orientation quelconque (*Bruttowärmeertrag*). Il est largement utilisé dans les protocoles d'essai des capteurs. Les résultats calculés pour 12 orientations différentes ont été vérifiés au moyen de mesures faites sur un capteur plan et un capteur évacué. D'une façon générale, la *précision obtenue est excellente*, sauf aux très faibles irradiations, où l'erreur peut dépasser 10 %, l'erreur absolue restant cependant faible [22].

3. Collaboration nationale et internationale

Le projet **Absorbeur 2000** s'effectue en collaboration avec le programme de recherche THERMOCHIMIE et avec des partenaires industriels.

Internationalement, la participation de la Suisse aux projets de l'Agence Internationale de l'Energie dans le domaine de l'énergie solaire thermique (*SOLAR HEATING AND COOLING PROGRAMME*) reste très active:

- le projet *Advanced Solar Energy Systems* entrera dans sa 5ème année en 1994;
- le nouveau projet *Advanced Glazing and Associated Materials for Solar and Building Applications* est prêt à démarrer.
- Dans le cadre du Groupe de travail sur les installations solaires avec stockage de chaleur saisonnier, comprenant l'Allemagne, les Pays-Bas, la Suède, l'Autriche et la Finlande, la Suisse a développé un programme de calcul simplifié, qui est très apprécié [23].

4. Transfert à la pratique

Dans le cadre du programme d'action **PACER**, 8 cours de 2 jours avec un total de 188 participants ont été organisés en 1993 sur le thème "Les installtions solaires actives - réalisation, mise en service et entretien". Deux cours d'un jour sur le sujet "Construction de séchoirs à air pour le séchage du foin" ont été donnés à 37 agriculteurs. Le film vidéo "Les installations solaires thermiques" a eu un vif succès: 852 exemplaires en allemand et 814 exemplaires en français ont été vendus.

Dans le cadre du programme d'action **Energie solaire thermique**, 12 projets dits "Pilote et de Démonstration" ont été sélectionnés. Plusieurs concernent des maisons à taux de couverture solaire élevé. Les installations bénéficiant d'un subside de 270 Fr./m^2 de capteur ont été au nombre de 363, totalisant une surface de captage de 16'121 m^2.

Une action de promotion du préchauffage de l'eau chaude sanitaire dans les bâtiments locatifs cherche à dénouer la situation souvent bloquée des relations entre propriétaires et locataires.

Les premiers chauffe-eau solaires "SOLKIT", dont la conception originale est issue de la recherche, ont été installés.

5. Perspectives 1994

Divers nouveaux projets sont prêts à être mis en oeuvre. Ils concernent notamment l'application de capteurs non-vitrés pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire et leur intégration en façade pour le chauffage par dalles thermoactives.

En 1994, 6 cours PACER "installations solaires" seront organisés en Suisse alémanique, 5 en Suisse romande et 1 au Tessin. De même, 5 cours "Séchage solaire du foin" seront repris.

6. Liste des projets en cours en 1993

[1] A. Zelenka, ISM, *Zürich*: ***Techniques for Supplementing Solar Radiation Network Data.*** IEA-report, September 1992. (RF)

[2] U. Frei, ITR, *Rapperswil*: ***Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Solaranlagen.*** (RA)

[3] U. Frei, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle ITR, *Rapperswil*: ***Absorber 2000.*** (RA)

[4] B. MATTHEY, *Montezillon*: ***Analyse du bilan énergétique de l'installation héliogéothermique de la salle polyvalente de Cortaillod.*** (RF)

[5] J.-Ch. Hadorn, BSI, *Lausanne* & ENERGIE SOLAIRE, *Sierre* : ***Chauffe-eau intégré.*** (RF)

[6] D. Pahud, GAP / Uni - *Genève*: ***Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin.*** (RF)

[7] D. Pahud, GAP / Uni - *Genève*: ***Analyse énergétique de l'immeuble industriel "Marcinhès" à Meyrin.*** (Thèse)

[8] J.-Ch. Hadorn, BSI, *Lausanne* & ENERGIE SOLAIRE, *Sierre* : ***U-Sierre.*** (RF)

[9] B. Saugy, EPF - *Lausanne*: ***SPEOS Test de traitement et évaluation, Prospection de sites.*** (RA)

[10] F. Righetti, INTERTECNIC, *Vevey*: ***Stockage latent intégré dans un système industriel.*** (RA)

[11] M. Bauer, Y. Oestreicher, CUEPE / Uni - *Genève*: ***Régulateur prévisionnel appliqué à une installation solaire active.*** (RA)

[12] Y. Allani, LENI / EPF - *Lausanne* & LES / EPF - *Zürich*, : ***Mini-centrale électro-thermo-solaire CSIP2.*** (RA)

[13] J.-Ch. Hadorn, ENERGIE SOLAIRE, *Sierre* & BSI, *Lausanne*: ***SAILLON 1 MW solaire.*** (RA)

[14] P. Berchtold, ARGE ATLANTIS ENERGIE / ING.BÜRO P. BERCHTOLD, *Sarnen*: ***Fabrikgebäude mit einem hohen solaren elektro-thermischen Deckungsgrad.*** (RA)

[15] P. Stähli, HTL - *Burgdorf*: ***Energiemessung an der Solarwerkstatt Jenni.*** (RA)

[16] B. Lachal, CUEPE / Uni *Genève*: ***Application d'une procédure de test à un système solaire de préchauffage de l'ECS grande taille: SPIRKL - CGO.*** (RA)

[17] K. Egger, INFOENERGIE, *Tänikon*: ***Sonnenkollektoren für die Heublüftung: Erfolgskontrolle.*** (RA)

[18] O. Berchtold, Ch. Filleux, BASLER & HOFMANN, *Zürich*: ***Ganzjährige Nutzung der Solarenergie in Bürogebäuden.*** (RA)

[19] U. Frei, Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle ITR, *Rapperwil*: ***Regelstrategie einer Saisonspeicheranlage.*** (RA)

[20] A. Reist, RAC, *Conthey*: ***GEOSER, stockage souterrain temporaire de chaleur pour serres.*** (RA)

[21] J.-Ph. BOREL, *Cully*: ***Installation de production de froid par machine à absorption alimentée en chaleur d'origine solaire: dimensionnement, bilan d'exploitation et perspectives.*** (RA)

[22] R. Frey, U. Frei, IT - *Rapperswil*: ***Validierung des Bruttowärmeertragsmodells "BWE91".*** (RF)

[23] P. Jaboyedoff, SORANE, *Lausanne*: ***Groupe de travail sur les installations solaires avec stockage de chaleur saisonnier.*** (RA)

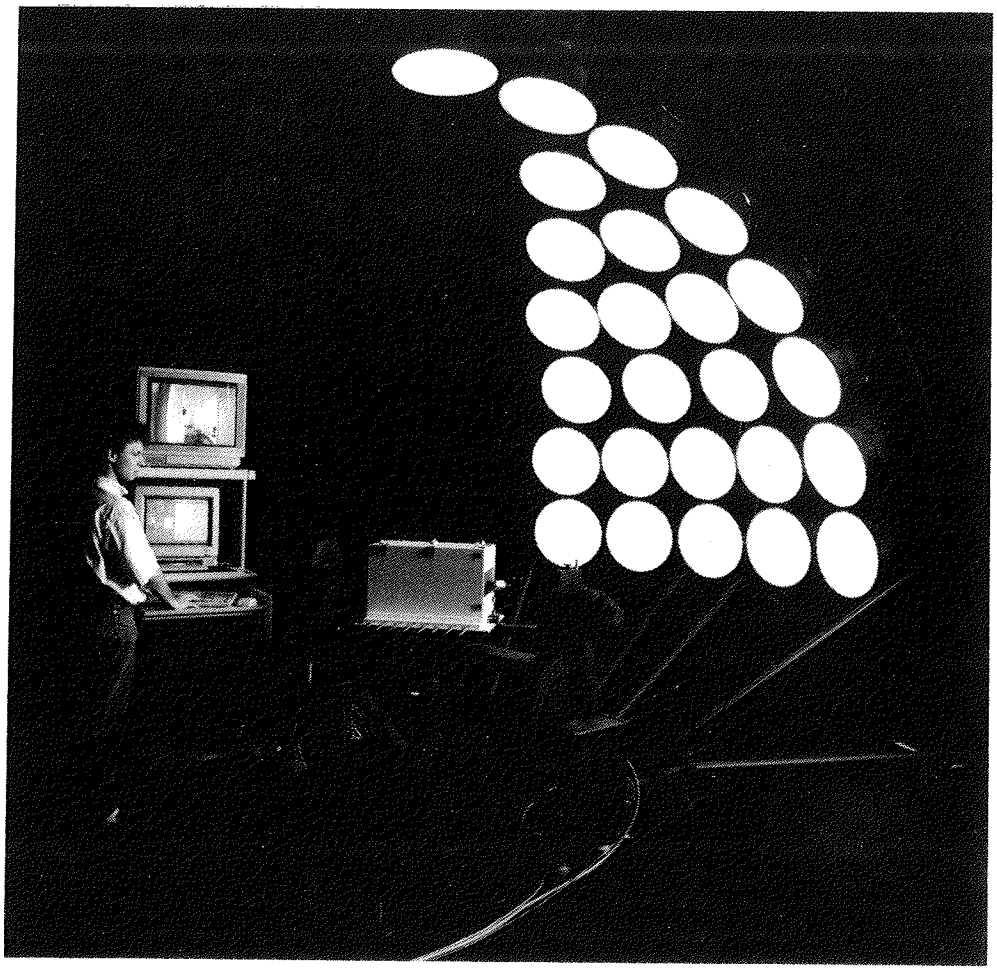
(RA) Rapport annuel 1993 disponible

(RF) Rapport final disponible

SOLARARCHITEKTUR

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: S. Robert Hastings



Künstlicher Himmel

Diese Vorrichtung des *Laboratoire de lumière naturelle et analyse des systèmes d'éclairage naturel lateral* an der ETH-Lausanne ermöglicht es, die Tagreslichtausnützung an Modellen zu untersuchen.

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1993

Mit dem Begriff Solararchitektur bezeichnet man nicht einen Baustil, sondern das Bestreben, bei der Gestaltung von Gebäuden die Sonne als Licht- und Wärmequelle stark einzubeziehen. Im Hinblick auf Solargewinn, interne Lasten und Wärmeverluste werden Form des Gebäudes, Verhältnis von transparenten zu opaken Elementen, Zonierung und thermische Masse so gestaltet und Zusatzheizung, Lüftung und Beleuchtung so geschickt integriert, dass der Verbrauch von nicht-erneuerbarer Energie extrem tief gehalten wird. Aufgabe des Forschungsprogrammes **Solararchitektur** ist es, die Erarbeitung neuer Konzepte, die Entwicklung von Prototypen neuer Materialien und Komponenten, Erfolgskontrollen an gebauten Objekten und die Bereitstellung von Planungshilfsmitteln zu unterstützen. Die Resultate müssen dann in die Praxis sowie in Aus- und Weiterbildung eingebracht werden. Wegen beschränkter Mittel ist eine starke Verknüpfung mit komplementären Forschungstätigkeiten im Ausland unerlässlich.

Die Ziele für 1993 lagen schwerpunktmässig bei

- der Fertigstellung und Auswertung von Prototypen einiger neuer Komponenten und Materialien,
- der Bewertung einiger Solarluftsystem-Typen mittels Messungen und Simulationen,
- der weiteren Entwicklung von Planungshilfsmitteln, u.a. für die intensive Nutzung von Tageslicht,
- der Umsetzung der Resultate in die Praxis und in die Aus- und Weiterbildung von Bauplanern.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

MATERIALIEN UND KOMPONENTEN

Im Projekt **Optische und thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien (Datenbank und PC-Programm)** [1] sollen Hilfsmittel für den Hersteller von Fenstern bereitgestellt werden. Im vergangenen Jahr wurden die Grundstruktur der Datenbank festgelegt und ein Programm zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten von Mehrfachverglasungen nach der Norm prEN 673 erstellt. Auf dem Gebiet transparenter Gebäudehüllen tauchen immer wieder neue Materialien auf, für welche geeignete Prüfverfahren nötig sind. Im Projekt **Untersuchungsmethoden für neue Gläser und transparente Materialien** [2] geht es darum, die in der Schweiz eingesetzten Untersuchungsmethoden zu inventarisieren und mit den entsprechenden IEA-Aktivitäten zu koordinieren.

Ein ***Prototype de vitrage isolant évacué*** [3] wird gebaut und bezüglich Durchlässigkeit von Licht und Wärme ausgemessen. Im abgelaufenen Jahr wurden Dichtungsmaterialien untersucht.

Nachdem schon im Vorjahr der Nachweis erbracht worden war, dass der Gesamtenergiedurchlassgrad herkömmlicher transparenter Wärmedämmungstoffe (TWD) erreicht wird, ging es im Projekt **Transparente Isolation auf Glaskapillarbasis** [4] 1993 darum, die Machbarkeit der Serienfabrikation nachzuweisen. In zwei Schritten wurde gezeigt, dass 1.) die Glaskapillaren in der nötigen Quantität herstellbar sind und 2.) ohne weisse Stirnflächen oder Verdickungen geschnitten werden können. Mittels einer Parameterstudie wurde nachgewiesen, dass in der Serienproduktion die nötige Konstanz der Schnittqualität gewährleistet werden kann. Mit einem Schlussbericht wurden die Vertragsarbeiten im Mai 1993 abgeschlossen.

Die im Vorjahr im Rahmen des Projektes **Gebäude mit transparenter Isolation, Optimierung des Überhitzungsschutzes** [5] entwickelten Lamellenblechbeschattungen wurden verbessert. Berechnungen und Messungen hatten ergeben, dass mit einem flacheren Lamellenblechwinkel (< 30°) und mit einem variablen Lamellenabstand

(Verhältnis Lamellenbreite zu Lamellenabstand) Beschattungselemente entstehen, welche sich besser an Klima und Gebäude anpassen lassen. Auch wurden nach einem neuen Verfahren sog. Faltbleche hergestellt. Dank dieser Änderungen wurden bessere Transmissionswerte erzielt. Auf dem Gelände des Projektnehmers wurde auch eine Testfassade mit TWD aufgebaut und ausgemessen. In der kritischen Jahreszeit Ende März/Anfang April konnte mit dem neuen Element die Wandtemperatur von 70°C auf 40°C gesenkt werden.

Im Projekt ***Façade double-peau*** [6] soll der Einfluss verschiedener Parameter wie Abstand, Glasart oder Lüftungskonzept auf das energetische und bauphysikalische Verhalten der Doppelwand-Fassade untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in einem Leitfaden interessierten Kreisen zugänglich gemacht werden. Seit dem Start des Projektes wurden Daten gesammelt über bestehende Doppelwand-Fassaden und eine Typeneinteilung vorgenommen.

Projektstart für **Denkraum** [7] war im Mai 93. Es geht um die Messungen von Licht, Wärme und Komfort in Musterbüros und an einer Musterfassade an der ETH-Lausanne.

Unter dem Titel **Verbesserte passive Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung mit Hilfe von teiltransparenten Latentwärmespeichern** [8] läuft eine Untersuchung von PCM-Speichern, welche durch direkte Sonneneinstrahlung aufgeladen werden. Zu klären ist, wie sich solche Bauelemente in Kombination mit TWD für Beleuchtung und Heizung einsetzen lassen. Im vergangenen Jahr wurde ein Rechenmodell entwickelt, welches erlaubt, das Langzeitverhalten als Heizelement zu bestimmen. Weiter wurden optische Messungen durchgeführt und auf dem EMPA-Gelände ein Prototyp aufgebaut, um das Verhalten unter Witterungseinfluss zu prüfen.

Beim Projekt **Aspekte des Bauens mit Lehm in der Schweiz** [9] ging es darum, Energieeinsparmöglichkeiten und bessere Ökobilanzen zu realisieren durch Verwendung von Lehm als Baumaterial.

SYSTEME UND GEBÄUDE

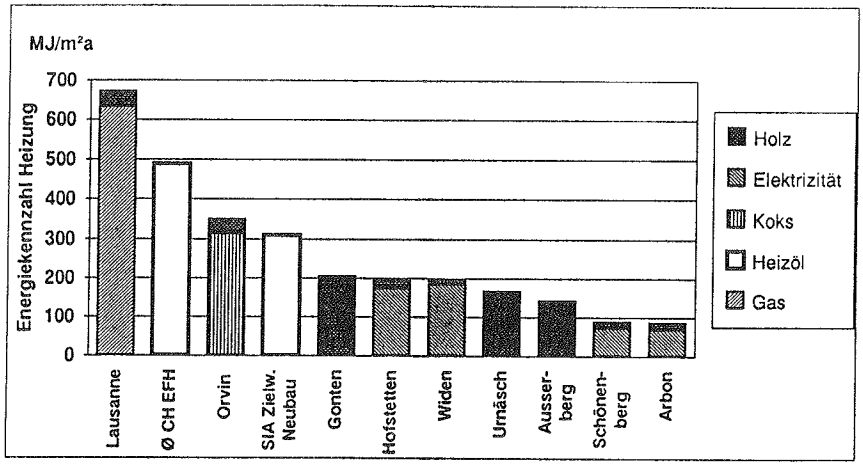
Im Projekt **Luftkollektoranlage und Latentspeicher in Schüpfen** [10] wird eine nichtfunktionierende Latentspeicheranordnung ersetzt. Sie soll aktiv geladen und passiv entladen werden. Mit demontiertem Speichermaterial wurde im Labor eine Versuchsanordnung erstellt und ausgemessen. Es wurde nachgewiesen, dass die neue Konfiguration funktioniert.

Wegen Verzögerungen in der Inbetriebnahme des Gebäudes konnten die Arbeiten am Projekt **Solare Luftvorwärmung in Atrien** [11] nicht planmässig durchgeführt werden. Es wurde am Messkonzept gearbeitet.

Die Arbeiten am Projekt **Modellierung von Komponenten für konvektive Solarsysteme** [12] konzentrierten sich auf die Festlegung der schweizerischen Beteiligung an einem IEA-Projekt.

Die Erfassung einer Heizperiode im **Messprojekt Solarhaus Bühler** [13] konnte im Frühjahr 1993 abgeschlossen werden. Obwohl die Resultate der Simulationsrechnungen noch ausstehen, lassen sich folgende Aussagen machen: die Planungswerte bezüglich Energieverbrauch wurden klar eingehalten resp. teilweise unterboten; der Direktgewinn liefert einen grossen Beitrag; in der sonnigen sowie der trüben Periode funktioniert das System wie erwartet, aber bei sehr kaltem Wetter (Aussentemperatur unter -5°C) kühlt die Speicherdecke rasch ab, und auch bei guter Sonneneinstrahlung lässt sich dann der Speicher nicht wirksam laden. Die Ursache kann noch nicht angegeben werden. Beim **Messprojekt EFH Gwadt, St. Gallenkappel** [14] soll das Solarheizsystem überprüft werden. Es besteht aus Fensterkollektor und Betonspeicher im Hausinnern, die Luft im Kreislauf zirkuliert durch Schwerkraft, als Zusatzheizung dient ein Holzofen. Das Haus ist in Leichtbauweise erstellt. Der schwerkraftbetriebene Fensterkollektor kann weder beschattet noch nach aussen entlüftet werden. Kühlung bringt die Nacht. Man möchte deshalb wissen, ob im Sommer ein Überhitzungsrisiko besteht. Die Messungen wurden im Juli

aufgenommen, ab August liegen die Daten vollständig vor. Sie lassen erste Trendaussagen über den Sommerkomfort zu. Wegen des bereits relativ tiefen Sonnenstandes und der Sommerhitze ist die Zeit von Ende August kritisch. In einem besonders exponierten Raum wurden denn auch tägliche Temperaturschwankungen von bis zu 5°C und am Ende einer warmen Woche Spitzentemperaturen von 29°C registriert. Als Ergänzung zu einem NEFF-finanzierten Messprogramm wird das Projekt **Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil** [15] durchgeführt. Wegen einer Verzögerung im Messprogramm wurde erst die Zusammenstellung der Simulationsmodule an die Hand genommen. Der heutige Zustand der Solarsysteme, Energieverbrauch und Zufriedenheit der Bewohner von **Sonnenenergiehäuser(n) der ersten Generation** [16], d.h. Häuser aus der Zeit vor 1985, wurden vor Ort erfasst. Eine Veröffentlichung der Erkenntnisse ist in Arbeit. Daraus stammt untenstehende Darstellung.



Energiekennzahl für die Heizung bei den 9 untersuchten Solarhäusern der 1. Generation.

PLANUNGSHILFSMITTEL

Mit der offiziellen Inbetriebnahme des Heliodon, einem künstlichen Himmel mit Diagnosegerät, im Juni 1993 wurden die Arbeiten am Projekt ***Laboratoire de lumière naturelle et analyse des systèmes d'éclairage naturel latéral*** [17] abgeschlossen. Die Vorrichtung erlaubt es, die Beleuchtungsverhältnisse im Innern eines Modells zu untersuchen und ist in seiner Art einmalig. Seit Inbetriebsetzung wurden denn auch schon verschiedene Studien an neuartigen Tageslichtsystemen auf der Basis nichtabbildender Optik durchgeführt. Im Rahmen des Projektes **Tageslicht** [18] wurde das Computer-Programmpaket ADELINE bearbeitet. In Verbindung mit einem IEA-Projekt wurden Test- und Prüfarbeiten durchgeführt, gefundene Fehler behoben sowie eine Anleitung geschrieben. Beim Projekt ***Eclairage naturel à Genève, modèles et mesures*** [19] handelt es sich um eine Messkampagne im internationalen Rahmen von längerer Dauer. Die Vorbereitungsarbeiten - wie Gerätekalibrierung und automatische Qualitätssicherung der Messdaten - wurden im ersten Halbjahr abgeschlossen. Die Messkampagne läuft. Numerische Modelle für die Helligkeitsverteilung am Himmel wurden überprüft und verbessert. Sie werden für die Qualitätssicherung der Messungen, aber auch als Helligkeitswertgenerator bei Computersimulationen von Tageslichtanordnungen eingesetzt. Der Schlussbericht zum Projekt **Interne Lasten in Nichtwohngebäuden: Grundlagen für den Solarplaner** [20] wird demnächst erscheinen. Er wird Angaben für die Simulation von Solarnutzung enthalten, wie Gleichzeitigkeit und Tagesverlauf der Abgabe von Wärme durch Arbeitsgeräte, Beleuchtung und Personen. Ergänzend dazu enthält er Anhaltspunkte für die Beschattungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Aussenhelligkeit.

Im Projekt **Rechenmodell für Hypokaustenspeicher** [21] wurden im vergangenen Jahr die Messungen am Prüfstand abgeschlossen. Ein bestehendes Rechenmodell für Fussbodenheizungen wurde an die in einem Hypokaustenspeicher gegebenen Verhältnisse - höhere Strömungsgeschwindigkeit und geringere Wärmekapazität der Luft - angepasst. Mit der Validierung des Rechenmoduls wurde begonnen, die Uebereinstimmung von gerechneten und gemessenen Werte ist bereits gut. Im Projekt **Modellentwicklung für grosse Atrien** [22] wurden für folgende Aspekte Algorithmen entwickelt:

- Natürliche Ventilation durch mehrere Öffnungen auf verschiedenen Höhen,
- Verteilung der solaren Gewinne auf verschiedene Partien des Atriums, Berechnung der besonnten Stellen,
- Temperaturschichtung der Luft in hohen Räumen,
- thermischer Komfort.

Das PC-Programm ***DIAS: Banque de données interactive sur la conception et la construction de bâtiments solaires*** [23] ermöglicht die visuelle Darstellung von Beispielen, das Aufsuchen der Beispiele nach verschiedenen Kriterien (Nutzung, Standort) und erlaubt Simulation und Berechnungen des Einflusses von Aenderungen, welche der Benutzer anbringen kann. Das Programm wird Anfang 1994 vertriebsbereit sein. Eine erste Version von **ISOLDE : Expertensystem zur Sonnenenergienutzung in Geschäftshäusern** [24] war schon 1992 fertiggestellt worden. Rückmeldungen veranlassten das internationale Team zu einer Überarbeitung, insbesondere in Bezug auf Benutzerfreundlichkeit. Es wurde eine *Windows*-Version in Angriff genommen, die ursprüngliche DOS/Crystal -Version und einige Algorithmen wurden verbessert. Im Rahmen des Auftrages **LESOSAI 4.0** [25] soll das bestehende Programm LESOSAI-X zur Berechnung thermischer, statischer Bilanzen unter Berücksichtigung solarer Gewinne um neue Elemente erweitert werden. Auch soll es benutzerfreundlicher werden und unter *Windows* 3.1 laufen können. Eine Prototyp-Version wurde fertiggestellt und an einige potentielle Benützer zur Stellungnahme abgegeben.

Zum Thema **Ausnutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen** [26] wurde eine Standortbestimmung durchgeführt, deren Resultate in einer Broschüre veröffentlicht werden. Die Druckunterlagen dazu sind erstellt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde auch die Mitwirkung an einem IEA-Projekt definiert. Die **Kosten-Nutzen-Analyse solarer Gebäudesanierungstechniken** [27] ist noch in Arbeit. Im Rahmen des Projektes **Nutzung der Sonnenenergie bei der Sanierung des Zentralschweizerischen Technikums Luzern** [28] wurde mit der Aufnahme des Ist-Zustandes und der Daten-Aufbereitung für die Simulationsrechnungen begonnen.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

NATIONAL

- PACER propagierte anlässlich einer Tagung Prinzipien der passiven Sonnenenergienutzung.
- ENERGIE 2000 dokumentiert Konzepte der passiven Sonnenenergienutzung, welche einen Beitrag zur Senkung der Abhängigkeit von nichterneurbaren Energieträgern im Jahr 2000 liefern.
- Die Begleitgruppe des Öko-Bau-Programmes von DIANE koordinierte den Erfahrungsaustausch unter Architekten und finanzierte Mini-Forschungsprojekte, wie Beurteilung von verglasten Balkonen und Kastenfenstern, Einfluss von Beschattung auf passive Solarsysteme und Speichermaterialien.
- Die Eidg. Kommission zur Förderung der Nutzung von Sonnenenergie (KNS) formulierte Visionen für die zukünftige Rolle der Sonnenenergienutzung im schweizerischen Energiehaushalt.
- 28 beauftragte Forscher und das Begleitkomitee des Forschungsprogrammes Solararchitektur präsentierten und diskutierten in einer zweitägigen Klausur ihre Erfahrungen und das weitere Vorgehen.

INTERNATIONAL

- Archiv-Fachzeitschrift "*Energy and Buildings*": Mitglied des *Editorial Review Board*
- *World Congress der International Solar Energy Society*: Mehrere Vorträge und Leitung einiger Sessionen
- IEA-Projekte: *Building Energy Analysis Tools*; *Advanced Solar Low Energy Buildings*; *Advanced Glazing Materials; Solar Air Systems*; *Solar Energy in Building Retrofit: Mitwirkung und teilweise Leitung.*
- AG Solar des Landes Nordrhein-Westfalen (D): Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats und Kuratoriums
- Ost-Bayrisches Technologie Transfer Institut (OTTI): Tagungsbeirat der Thermie-Tagung und Referat
- *Foundation for Research, Science and Technology* (NZ): Begutachter für neue Forschungsanträge.

4. Transfer in die Praxis

Das von Programmleiter geführte Diplomwahlfach "Bauen und Sonnenenergienutzung" an der ETH-Zürich wurde im Jahr 1993 weiterhin offeriert. Im Durchschnitt waren die Vorlesungen mit etwa 80 Studenten und einzelnen in der Praxis tätigen Architekten belegt. Acht Studenten haben eine Diplomwahlfacharbeit abgegeben und die Prüfung bestanden und eine Studentin hat eine Nachdiplomarbeit begonnen. Neuigkeiten auf dem Sektor Solararchitektur werden mittels des Informationsbulletins an über 700 Abonnenten weitergegeben und vertiefte Kenntnisse werden durch spezielle Veranstaltungen vermittelt. Um Planern direkte Erfahrung mit neuesten PC-Programmen für die Konzipierung von Solarbauten anzubieten, wurde ein Workshop mit 18 Teilnehmern und 6 Referenten durchgeführt.

5. P + D - Projekte Solararchitektur

Das P+D-Programm Solararchitektur beschäftigt sich mit der Umsetzung von Forschungsresultaten in konkrete Bauobjekte, welche die Öffentlichkeit überzeugen sollen. Gleichzeitig ergibt sich dabei auch ein nützlicher *Feedback* für die Forschungstätigkeit.

Die Zielsetzungen für 1993 waren: ein P+D-Konzept entwickeln und bekanntmachen (an 700 Baufachleuten vorgestellt) das P+D-Programm starten (6 Gesuche wurden in Zusammenarbeit mit den Gesuchstellern ausgearbeitet und eingereicht, davon wurden bis jetzt 5 genehmigt und 4 begonnen):

- Das **TWD-Haus in Ormalingen** ist fertig gebaut und die 40 m2 TWD-Panele sind montiert. Die eine Hälfte der TWD-Fläche ist mit einer fixen Beschattung (Lamellenbleche) ausgerüstet. Die installierte Mess-Einrichtung hat ihren Betrieb aufgenommen. Mitte 1995 soll der Schlussbericht erscheinen.

- Im Projekt **Luftvorwärmung mit vorgehängter Glasfassade** soll an einem praktischen Beispiel (Gebäude des Amtes für Bundesbauten) untersucht werden, inwiefern sich Doppelwandfassaden aus energetischer Sicht für die Sanierung eignen. Es werden Baudetails und vertiefte Kosten/Nutzen-Berechnungen angestellt und es wird versucht, die Resultate für andere Gebäude zu verallgemeinern.

- Die Projekte **Neubau mit TWD-Elementen auf der Hundwiler Höhe** und **Einfamilienhaus mit Fensterkollektor St. Gallenkappel** wurden bis und mit Bewilligungsverfahren von Programmleiter Solararchitektur in Zusammenarbeit mit den Gesuchsstellern bearbeitet.

Die Zielsetzungen des P+D-Programmes für 1994 sind: für das Projekt **Glaskapillarplatten für Gebäude** ist ein Industriepartner zu finden und auf den Gebieten Sanierungen, TWD, Luftkollektoren und Tageslichtnutzung soll mindestens je ein neues Projekt gestartet werden. Weil der Wechselwirkung Forschung - P+D ein grosses Gewicht beigemessen wird, muss und die Arbeit schlagkräftiger gestaltet werden. Es wird im Hinblick auf die aktive Suche nach Projekten obenerwähnter Art die Umwandlung des P+D-Programmes Solararchitektur vom Status "reaktiv" auf "aktiv" beantragt.

6. Bewertung 1993 und Ausblick 1994

BEWERTUNG 1993

Das Forschungsprogramm umfasste ein breites Spektrum von Tätigkeiten. Die Entwicklung neuer Konzepte führte zu sehr originellen Lösungen, aber in der jetzigen Baurezession erwies es sich als sehr schwierig, die Beteiligung der Industrie zu erhalten [3, 4, 8]. Die Erfassung von Daten als Grundlage für Planer, z.B. realistische Werte für interne Lasten (um den Solargewinn richtig abzuschätzen) brachte Erkenntnisse, die bisher gemachten Annahmen widersprechen. Die Erstellung von Dateien über Eigenschaften hochisolierender, auf dem Markt erhältlicher Fenster und über Strahlungsdaten im Tageslichtbereich sind auf gutem Weg.

Wegen des enormen Sparpotentials ist die internationale Zusammenarbeit bei Solar-Sanierungsmassnahmen vielversprechend. Sehr informativ waren die Auswertungen von Solarhäusern der 1. Generation. Die Messungen von Häusern mit Solarluftheizsystemen und die Entwicklung von Rechenverfahren für Hypokausten und Atrien sind fortgeschritten und Ergebnisse können nun gut mit ähnlichen Arbeiten in IEA-Ländern verglichen oder ergänzt werden.

Die Bereitstellung von Planungshilfsmitteln verlief unterschiedlich. Ein Workshop, an dem Planungshilfsmittel vorgestellt wurden, hat gezeigt, dass zwei Programme sehr vielversprechend und ambitiös, aber noch nicht marktreif sind [17, 24]. Ein drittes Programm wurde als reizende Alternative zu einem Lehrbuch [23] bewertet. Aus der Klausur der Projektleiter kam die Kritik, dass öffentliche Mittel nicht für benutzerfreundliche Oberflächen eingesetzt werden sollen (dies sei Aufgabe der Software-Hersteller). Wir bezweifeln das, weil der Markt für solche Programme so klein ist, dass sich Profi-Softwarefirmen nicht dafür interessieren. Die beauftragten Institute sind u.a. auch mit der Lehre beschäftigt, setzen die Programme in Ihrem Unterricht ein und bekommen dadurch sehr wertvollen und direkten *Feedback*.

ZIELE FÜR 1994

- Planmässiger Abschluss einiger Projekte und Einengen der Bandbreite des Forschungsprogramms gemäß Vorschlägen der Begleitgruppe.

- Beschaffung von Daten über die Eigenschaften auf dem Markt erhältlicher Komponenten als Entscheidungsgrundlage für Planer, inklusive nötiger Entwicklung und Einsatz von neuen Messverfahren oder Rechenmethoden.

- Auswertung von Konzepten und Systemen mittels Messkampagnen an Gebäuden (koordiniert mit P+D) und Einsatz von Computermodellen für Sensitivitätsstudien (z.B. für Hypokausten, PCM, TWD), sowie Dokumentierung bewährter Ausführungen inkl. Baudetails und Tips (wie in einem IEA-Projekt).

- Definition sinnvoller internationaler Zusammenarbeit auf dem Sektor intensiver Tageslichtnutzung (ev. neues IEA-Projekt) und weitere Mitarbeit an 4 IEA-Projekten.

- Fertigstellung von PC-Tools und Einführung in Praxis und Lehrbetrieb.

- Gestaltung von Workshops für die Praxis bzw. Forscher z.B.: TRNSYS und Hypokausten (Feb); Wärmespeicherung - Schwachpunkte/Stärken für die Solarnutzung (Frühling); EU-Solartagung (Nov.).

7. Liste der Projekte

[1] Th. Frank, EMPA, *Dübendorf*: ***Optische und thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien (Datenbank und PC-Programm).*** (JB)

[2] Th. Frank, EMPA, *Dübendorf*: ***Untersuchungsmethoden f. neue Gläser & transparente Materialien.***(JB)

[3] B. NYDEGGER, *Morges*: ***Prototype de vitrage isolant évacué.*** (JB)

[4] F. Mühlethaler; INFRACONSULT, *Bern*: ***Transparente Isolation auf Glaskapillarbasis.*** (JB +SB)

[5] P. Schneiter, ERNST SCHWEIZER, *Hedingen*: ***Gebäude mit transparenter Isolation, Optimierung des Überhitzungsschutzes.*** (JB)

[6] A. Faist, LESO / EPF *Lausanne*: ***Façade double-peau.*** (JB)

[7] A. Faist, LESO / EPF - *Lausanne*: ***Denkraum.*** (JB)

[8] H. Manz, EMPA, *Dübendorf*: ***Verbesserte passive Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung mit Hilfe von teiltransparenten Latentwärmespeichern.*** (JB)

[9] H. Hugi, HBT / ETH - *Hönggerberg*: ***Aspekte des Bauens mit Lehm in der Schweiz.*** (JB)

[10] G. Zweifel, EMPA, *Dübendorf*: ***Luftkollektoranlage und Latentspeicher in Schlüpfen.*** (JB)

[11] H. P. Eicher, EICHER+PAULI, *Liestal*: ***Solare Luftvorwärmung in Atrien.*** (JB)

[12] Ch. Filleux, BASLER & HOFMANN, *Zürich*: ***Modellierung von Komponenten für konvektive Solarsysteme (IEA).*** (JB)

[13] M. BLATTER, *Reinach*: ***Messprojekt Solarhaus Bühler.*** (JB)

[14] D. Brühwiler, INFORMATIK & ENERGIETECHNIK, *Volketswil*: ***Messprojekt EFH Gwadt, St. Gallenkappel.*** (JB)

[15] G. Zweifel, EMPA, *Dübendorf*: ***Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil.*** (JB)

[16] Th. Bürki, ERNST BASLER&PARTNER, *Zollikon*: ***Sonnenenergiehäuser der ersten Generation.*** (JB)

[17] J.-L. Scartezzini, CUEPE, *Genève*: ***Laboratoire de lumière naturelle et analyse des systèmes d'éclairage naturel latéral.*** (JB)

[18] N. Hopkirk, EMPA, *Dübendorf*: ***Tageslicht.*** (JB)

[19] O. Guisan, GAP / Uni - *Genève*: ***Eclairage naturel à Genève, modèles et mesures.*** (JB)

[20] A. Ruch, EICHER + PAULI, *Liestal*: ***Interne Lasten in Nichtwohngebäuden: Grundlagen für den Solarplaner.*** (JB)

[21] K. FORT, *Volketswil*: ***Rechenmodell für Hypokaustenspeicher.*** (JB)

[22] D. Aiulfi, SORANE, *Lausanne*: ***Modellentwicklung für grosse Atrien.*** (JB)

[23] W. Weber, CUEPE, *Genève*: ***DIAS: Banque de données interactive sur la conception et la construction de bâtiments solaires.*** (JB)

[24] N. Morel, LESO / EPF - *Lausanne*: ***ISOLDE: Expertensystem zur Sonnenenergienutzung in Geschäftshäusern (IEA).*** (JB)

[25] A. Faist, LESO, EPF - *Lausanne*: ***LESOSAI 4.0.*** (JB)

[26] P. Case, EN-SOLAR, *Oberdiessbach*: ***Kosten-Nutzen-Analyse solarer Gebäudesanierungstechniken.*** (JB)

[27] A. Haller, ERNST SCHWEIZER, *Hedingen*: ***Ausnutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen.*** (JB)

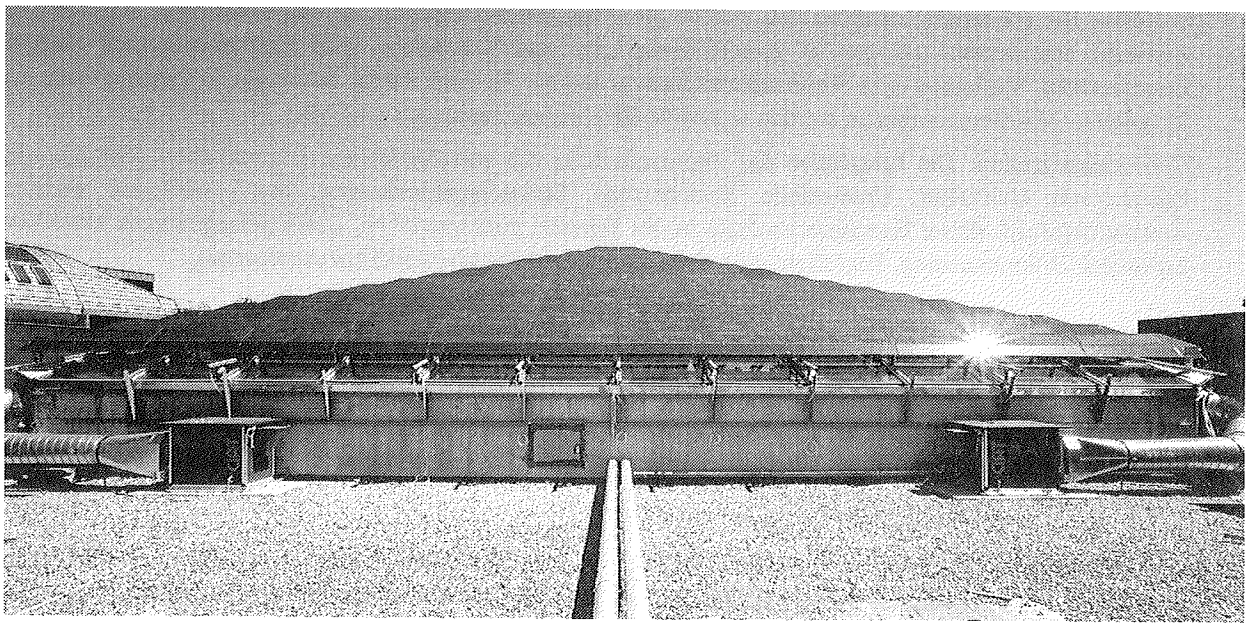
[28] M.G. Trawnika, ZTL, *Horw*: ***Nutzung der Sonnenenergie bei der Sanierung des Zentralschweizerischen Technikums Luzern.*** (JB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Stefan Nowak



Die Sonnen-Pyramide

Photovoltaik, Tageslichtführung und Beschattung über dem Atrium des neuen DEC-Gebäudes in Genf: *Shadovoltaic Pyramide*, 15 kWp Netzverbund, einachsig nachgeführt, Ausführung durch SOLUTION ENERGIE, ATLANTIS ENERGIE und COLT INTERNATIONAL.

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1993

Das Programm **Photovoltaik** war 1993 durch eine Änderung in der Programmleitung gekennzeichnet, in welcher S. Nowak von Ch. de Reyff die Leitung übernahm. Das dazugehörige P+D-Programm wird von Th. Nordmann, TNC Chur, geleitet. Die wesentlichen Elemente des Forschungsprogramms wurden durch diesen Wechsel jedoch nicht beeinflusst. Sie gliedern sich auf folgende Bereiche:

- **Zellen:** Für die Forschungsarbeiten zum **amorphen Silizium** bleiben **Stabilität** und **Wirkungsgrad** die wesentlichen Ziele; die dafür notwendigen **Plasmaprozesse** werden weiter untersucht, insbesondere bezüglich der bei der Abscheidung auftretenden **Pulverbildung**. Für **dünne kristalline Zellen** mit **Lichteinfang** soll das **Beugungsgitter** auf der Zellen-Rückseite bezüglich seiner Effizienz optimiert und die **Oberflächenrekombination** minimalisiert werden.
- **Module:** Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Herstellung von Modulen mit möglichst vielseitiger Verwendung in der **Gebäudehülle** unter Berücksichtigung der **Substitutionseffekte, der Kostenoptimierung, der Ästhetik** und dem erzielten **Energieertrag**.
- **Wechselrichter:** Die bestehenden Wechselrichterkonzepte, ihre **Regelung** und ihre **Zuverlässigkeit** sollen weiter verbessert werden; parallel dazu soll ein **Modulwechselrichter** entwickelt werden.
- **Systeme:** Die **PV-Systemkomponenten** werden an einem Ort evaluiert und in eine **Datenbank** integriert. Eine Auswahl bestehender Anlagen in verschiedener Lage und Konzeption wird ausgemessen und bezüglich **Energieertrag, Verhalten** und **Verlustmechanismen** untersucht. Eine breite nationale **Erfolgskontrolle** wird fortgesetzt. Mit diesen Arbeiten werden wertvolle **Erfahrungsgrundlagen** erarbeitet.
- **Gebäudeintegration:** Die **Integration** der Photovoltaik in die verschiedensten Bauvorhaben (Fassaden und Dächer von Gebäuden, Unterstände, Bahnperrons, Strasseneinkleidungen, usw.) wird als **wichtigste Anwendungsform** dieser Energietechnologie in der Schweiz vorangetrieben. Dabei gelangen auch **kombinierte Lösungen** (Wärmenutzung, Tageslicht, Schattenführung und Photovoltaik) zur Anwendung.

In begleitenden **Studien** werden weitere Anwendungsmöglichkeiten der Photovoltaik evaluiert, insbesondere bezüglich des Potentials ausgewählter Konzepte. Die **Planungsinstrumente** werden weiter verbessert und **Optimierungsmöglichkeiten** evaluiert. Die Arbeiten im Bereich der **internationalen Koordination** innerhalb der **IEA-Aktivitäten** werden fortgesetzt und ausgedehnt. Die Koordination mit dem **Europäischen Forschungszentrum** in Ispra wird weitergeführt. Diese Tätigkeiten werden durch die Teilnahme an verschiedenen internationalen Projekten der **Europäischen Union** ergänzt.

Diese Forschungsaktivitäten werden durch eine grössere Anzahl von **Pilot- und Demonstrationsprojekten** ergänzt. Diese Projekte erlauben die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse und sollen umgekehrt die noch zu lösenden F+E Fragestellungen mitgestalten. Damit soll der Kreis zwischen Forschung und Anwendung geschlossen werden, indem die Photovoltaik als Energietechnologie am Markt erprobt wird. Das F+E-Programm hat zum Ziel, die technischen Möglichkeiten der Photovoltaik zu erarbeiten und zu optimieren, um letztlich auch die Wirtschaftlichkeit anzustreben.

2. 1993 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ZELL-TECHNOLOGIE

Die Anstrengungen des *Institut de Microtechnique* (IMT) in Neuchâtel [1] auf dem Gebiet des **amorphen Siliziums** wurden fortgesetzt, wobei die Verbesserung des stabilisierten Wirkungsgrades im Vordergrund steht. Für eine a-Si:H p-i-n Zelle wurde von NREL (*National Renewable Energy Laboratory*, Colorado) ein Anfangswirkungsgrad von 9.6% bestätigt. Ein optimiertes Mikrodotierprofil in der intrinsischen Schicht führt zu einem verbesserten stabilisierten Wirkungsgrad bei Rotlicht, was wiederum für Tandemzellen verwendet werden

kann. Für letztere wurde ein Anfangswirkungsgrad von 9.4% gemessen. Bei Degradation unter echtem Sonnenlicht während 70 Tagen fällt der Wirkungsgrad für Einfachzellen von 9.6% auf 7%, für Tandemzellen von 9% auf 7.2%, was eine erhöhte Stabilität der Tandemzelle bedeutet. Der Einfluss von Mikrostruktur und Wasserstoffgehalt auf die Stabilität der amorphen Schichten wurde untersucht. Für dünne mikrokristalline <p> Si-Schichten, welche als Fenstermaterial in Frage kommen, wurde eine hohe Leitfähigkeit (1-10 $\Omega^{-1}cm^{-1}$) erreicht. Zudem wurden erste kristalline Hybridzellen hergestellt.

Am *Centre de Recherche en Physique des Plasmas* (CRPP) an der EPFL [2] wurden die **Prozesseigenschaften** bei der Deposition von amorphen Siliziumschichten weiter untersucht. Dabei konnte erstmals gezeigt werden, dass die im Silanplasma vorhandenen negativen Ionen ($Si_nH_m^-$) aufgrund ihrer langen Verweilzeit im Plasma für die bei der Schichtherstellung auftretende Pulverbildung verantwortlich sind. Durch Leistungsmodulation konnte die Anionendichte und damit die Pulverbildung beeinflusst werden. Der auf die Schicht auftreffende Ionenfluss beeinflusst zudem die Filmqualität (Wasserstoffgehalt, Defektdichte, usw.).

Am Paul Scherrer Institut (PSI) [3] wurde das zum Lichteinfang in **dünnen Silizium Schichten** verwendete Beugungsgitter auf der Solarzellen-Rückseite optimiert. Dazu wurde ein Sägezahngitter (~ 500 nm) hergestellt, welches zu längeren optischen Wegen in der Solarzelle führt als die symmetrischen Gitter. Nebst der geometrischen Struktur dieser Gitter wurde die elektronische Qualität der Oberfläche durch thermische Oxidation und anschliessende Entfernung des Siliziumdioxyds verbessert. Damit konnte der bisher beste Lichteinfang realisiert werden.

Die vom NEFF an der ETH-Zürich [4] unterstützten Arbeiten zur **elektrokatalytischen Herstellung** von Siliziumfolien führten zu mikrokristallinem, porösen p-Typ Material; n-Typ Material wurde durch Neutronenaktivierung hergestellt. Erste Solarzellen wurden auf diesem Weg hergestellt.

An der AFIF in Zürich wurde im Rahmen des Projektes EUROCIS [5] im JOULE II Programm der Europäischen Union an Dünnschichtzellen auf **$CuInSe_2$-Basis** (CIS) gearbeitet. Dabei stand die Herstellung von einkristallinen, epitaktisch gewachsen Schichten im Vordergrund. Ähnliche Arbeiten auf dem Gebiet der **CdTe-Solarzellen** sind im Rahmen des Projektes EUROCAD [6] vorgesehen.

SOLARMODULE

Die Entwicklung eines **flachdach integrierten** Photovoltaiksystems (SOFREL, *Solar Flat Roof Element*) unter Leitung von PMS ENERGIE [7] wurde fortgesetzt. In der nun abgeschlossenen ersten Phase konnte die Machbarkeit verschiedener Materialkombinationen (Blech, Metall, Plastik, Beton) und Ausführungen (offen, geschlossen) praktisch gezeigt werden. Als Vorteile dieses Systems konnte ein verbessertes Design und eine gefällige Ästhetik verbunden mit weniger Planungs- und Installationsaufwand erzielt werden.

In einem Projekt der SOLUTION [8] wurde untersucht, inwiefern sich die **Ästhetik und Architekturfähigkeit** von Glas-Glas-Modulen modifizieren lässt, indem gezielte optische Effekte (Reflexion und Farbe) erzeugt werden, ohne die photovoltaische Energieerzeugung zu beeinträchtigen. Hierzu wurden die entsprechenden Transmissonswerte des verwendeten funktionellen Glases bestimmt und optimiert.

In einem vom NEFF geförderten Projekt wurde unter Leitung von ALUSUISSE-LONZA [9] die Entwicklung eines **Fassadensystems** mit integrierten Solarzellenmodulen weiterverfolgt. Nach einer umfassenden und erfolgreichen Konzept- und Machbarkeitsstudie wurde ein neues Konzept zur Systemtechnik erstellt und die Auswahl der Solarzellenpartner getroffen. Dabei stehen Verbundfassaden im Vordergrund. Erste Labormodule auf der Basis eines Aluminium-Polymer-Verbundes wurden realisiert.

WECHSELRICHTER

Die Entwicklung eines 3kW-Wechselrichters mit **galvanischer Netzkopplung** an der HTL-Biel [10] konnte abgeschlossen werden. Durch Verzicht auf den Trenntransformator werden Materialkosten eingespart und der

Wirkungsgrad verbessert. Die Sicherheitsprobleme, welche sich durch die höhere DC-Eingangsspannungen ergeben, werden durch technische Massnahmen beherrscht.

An derselben Ingenieurschule wurde auch ein **digitales Leistungsmesssystem** für Solarwechselrichter [11] entwickelt, welches ein kostengünstiges Messmodul für Wirk- und Blindleistung zum Ziel hat. Dazu wurde der Algorithmus der komplexen Park'schen Leistung auf einem Mikrokontroller (µC 80C196) implementiert.

In einem NEFF-Projekt wurde durch INVERTOMATIC [12] an einem Solarwechselrichterkonzept im **50 kW-Bereich** weitergearbeitet. Der Wechselrichter-Steuerkreis ist auf einer neuen Mikroprozessorbasis (µC 68332) aufgebaut, welche durch die *in-system* Programmierbarkeit eine grosse Flexibilität erlaubt und die Messungen der Analogwerte vereinfacht. Das *Maximum Power Tracking* (MPT) soll damit verbessert und die Parallelschaltung mehrerer Wechselrichter ermöglicht werden.

Im Rahmen von zwei KWF-Projekten wurden am Neu-Technikum Buchs [13] die Arbeiten zu einem **3-Phasen-Wechselrichter** (5 - 20 kW) unter Verwendung kommerzieller Systemkomponenten weitergeführt. Die Entwicklung ist im wesentlichen abgeschlossen, die Feldversuche liegen jedoch noch nicht vor und die EMV muss noch weiter unterscuht werden.

Ein NEFF-Projekt [14] von ALPHA REAL befasst sich mit der Entwicklung eines **Solarmodulwechselrichters.** Zwei Schaltungstopologien wurden evaluiert und in der Simulation auf ihre Eignung geprüft. Daneben wurde eine Kostensensitivitätsanalyse durchgeführt, welche das Konzept als wirtschaftlich attraktiv einstufen lässt. Ein ähnliches Projekt wurde auch an der HTL-Biel [15] angefangen.

Parallel zu diesen Wechselrichter-Entwicklungsarbeiten wurden an der HTL-Burgdorf die Arbeiten zur Auswertung verschiedener kommerzieller Wechselrichter [16] auf eine **Testanlage für Solarwechselrichter** bis 60 kW [17] ausgedehnt. In diesem Zusammenhang wurde an der HTL-Burgdorf eine Photovoltaikanlage von 60 kWp aufgebaut. Verschiedene 3kW-Kleinwechselrichter (*TOP CLASS* 3000 und *SOLCON* 3400) und 20 kW-Wechselrichter (*SOLARMAX* und *ECOPOWER*) werden an dieser Anlage installiert und evaluiert. Erste Resultate werden nach der Inbetriebnahme der Anlage für 1994 erwartet.

SYSTEME UND ANLAGEN

An der HTL-Lugano wurde das Projekt TISO [18] als **Teststelle** für kommerzielle Photovoltaikmodule weiterverfolgt und ist nun für regelmässige und systematische Messungen bereit. Im Berichtsjahr wurden 6 Modultypen genauer untersucht: M55 (ARCO-SIEMENS), MSX60 (SOLAREX), BPX47500 (PHOTOWATT), UPM880 (USSC), BP 460 (BP SOLAR) und NT907S (SHARP). Dazu wurden nebst den elektrischen Eigenschaften und der Messung der nominalen Betriebstemperatur der Zellen (NOCT) auch thermografische Analysen der Module durchgeführt. Die gemessenen elektrischen Leistungswerte über die Prüfperiode liegen je nach Modul wesentlich unter den Herstellerangaben (bis zu 18.8%!). Die thermografischen Analysen zeigen inhomogene Temperaturverteilungen innerhalb der Module und damit die Schwierigkeit, die Betriebstemperatur der Module anzugeben. Die Datenbank der kommerziellen Systemkomponenten wird laufend aktualisert. Nebst den Anlagen am TISO (10 kWp monokristallin und 4 kWp amorph) werden Anlagen von Dritten (PARK & RIDE Neufeld: 80 kWp, Giubiasco 20 kWp, Riazzino 100 kWp) verfolgt.

Für das vom Konsortium PHALK betriebene Solarkraftwerk **Mont Soleil** (560 kWp) liegen zum ersten Mal Daten für ein volles Betriebsjahr vor [19]. Die Datenerfassung wurde in Zusammenarbeit mit der HTL-St. Imier durchgeführt. Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass die geplanten Leistungswerte erreicht werden; dagegen lag der Energieertrag im ersten vollen Betriebsjahr etwas unter den Erwartungen. Der vom 1. Nov. 92 bis 31. Okt. 93 gemessene Ertrag liegt bei 569'000 kWh gegenüber einem korrigierten erwarteten Ertrag von 662'000 kWh. Der Wechselrichter dieser Anlage weist einen mittleren Wirkungsgrad von 96% auf. Der *Performance Ratio* PR (Nutzungsgrad) liegt bei 77 %.

Die Untersuchungen der *Groupe de Physique Appliquée* in Genf zur 7.5 kWp-Anlage der *Services Industriels de Genève* (SIG) [20] wurden abgeschlossen. In einer Feinanalyse wurden die verschiedenen **Verlustmechanismen**

evaluiert. Die Resultate zeigten, wie im Fall des TISO, gegenüber den Herstellerangaben niedrigere Leistungswerte (-10%) der Module. Der Schwellwert für die Energieproduktion führt zu einem Verlust von -5%, die Temperatureffekte zu -3.5%. Die wesentlichen Verluste (-20%) wurden durch den verwendeten Wechselrichter verursacht. Dieser Verlust könnte durch neuere Wechselrichter vermindert werden. Der PR der Anlage liegt bei 0.64, der Gesamtwirkungsgrad der Anlage bei 8%.

An der HTL-Sion [21] wurde im Projekt SOLEIV ein Teststand für **synchrone Messungen** der elektrischen Eigenschaften von 8 PV-Modulen aufgebaut. In einer **Vergleichsmessung** werden ein fest installiertes und ein einachsig nachgeführtes Solarzellenmodul in bezug auf die Modulleistung erfasst. Das nachgeführte System führt über einen Tag zu einem Gewinn von ca. 30%. Ein **autonomes Datenerfassungssystem** wurde weiterentwickelt.

In einem NEFF-Projekt der EWI [22] wird das P+D-Projekt **HYDROSOL** zur solaren Erzeugung von Wassertsoff messtechnisch erfasst und ausgewertet. Die Anlage besteht aus einem Photovoltaikfeld von 31 kWp, welches einen Elektrolyseur zur Erzeugung des Wasserstoffs betreibt. Erste Resultate werden nach der Inbetrienahme anfangs 1994 erwartet.

Die HTL-Burgdorf untersucht **Ertrag und Zuverlässigkeit** [23] netzgekoppelter PV-Anlagen im Kanton Bern. Der PR der verfolgten Anlagen wird im wesentlichen durch Wechselrichterausfälle beeinträchtigt und liegt im Mittel zwischen 0.44 und 0.69. Die im Berichtsjahr neu erstellte 1 kWp-Anlage auf dem Jungfraujoch ist die derzeit höchstgelegene netzgekoppelte Anlage in Europa. Der maximale Strahlungswert liegt in dieser Lage im November bei 1.2 kW/m^2 und somit deutlich über sonstigen Erfahrungswerten. Entsprechend gut waren die ersten Messwerte, welche für November ein PR von 0.81 ergaben.

Im gemeinsamen Projekt von ALPHA REAL und dem Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) wird die **Energiestatistik** und die **Erfolgskontrolle** [24] von PV-Anlagen weiterverfolgt. Die Anlagenbetreiber erhalten Rückmeldung über das Verhalten ihrer Anlage im Vergleich zu den anderen Anlagen. Von den erfassten 150 Anlagen wurde in der Berichtsperiode nur gerade für 15 ein erkennbar geringerer Energiertrag festgestellt. Aufgrund der Erhebungen kann von einem spezifischen Ertrag von 810 kWh/kWp DC ausgegangen werden. Die Resultate fanden erstmals Eingang in die Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1992 [43].

GEBÄUDEINTEGRATION

Das an der EPFL am LESO aufgebaute Projekt **DEMOSITE** [25], welches verschiedene Möglichkeiten der architektonischen Integration aufzeigen will, wurde im Rahmen der IEA-Aktivitäten weitergeführt. An diesem Demonstrationsobjekt wurden im Rahmen von Führungen ca. 800 Personen aus der interessierten Fachwelt empfangen. Mit dem im Berichtsjahr hinzugefügten SOFREL-Stand werden nun 9 verschiedene Lösungen vorgestellt. Die Systeme werden messtechnisch erfasst und die reellen Leistungen können über Modem abgerufen werden. Zudem werden monatliche Datenblätter erstellt. Die Publikation DEMOSITE-NEWS soll zur weiteren Verbreitung der Information beitragen. Das Projekt findet international grosse Beachtung.

Die Arbeiten von ATLANTIS ENERGIE und ZETTER zur **Integration der Photovoltaik** in die Gebäudehülle [26] wurden erfolgreich abgeschlossen. Mit den in diesem Projekt realisierten Lösungen konnte die Integration der Photovoltaik unter kombinierter Verwendung der Wärme an grösseren Gebäuden (AERNI, Arisdorf: 53 kWp el., 105 kW th.; WINDMÜHLE, Biel: 9 kWp el.; SCHEIDEGGER, Kirchberg: 18 kWp el., 12 kW th.) gezeigt werden. Ein Schindeldach-System (Vitznau: 8.4 kWp el., 12 kW th.) wird ebenfalls bei ATLANTIS [27] entwickelt.

Eine weitere Form der Gebäudeintegration wurde durch ALPHA REAL bei der Autobahnüberdeckung "Breite" in Basel untersucht [28]. Die im **Überkopfbereich** zum Einsatz gelangenden Grossmodule (1.73 m x 1.94 m) müssen speziellen Anforderungen standhalten, insbesondere bezüglich ihrer mechanischen und thermischen Festigkeit, der damit verbundenen Sicherheit und der Schmutzanfälligkeit. Die verwendeten Laminate weisen zum Teil im Einsatz noch etwelche Mängel auf, welche sich vorallem optisch bemerkbar machen. Die in einem Teststand durchgeführten Messungen zeigten, dass die Temperaturen der Module nie mehr als 30°-40°C über der Aussentemperatur liegen.

Ein anderer Einsatz der Photovoltaik im Überkopfbereich auf **Bahnhofperrons**, als Vorstudie durch COPER durchgeführt [29], wird am LESO [30] weiterverfolgt. Bei dieser Anwendung muss die Verschmutzung durch den auftretenden Eisenstaub besonders beachtet werden.

Im Auftrag des NEFF entwickelt ALPHA REAL [31] ein optimiertes **Verkabelungssystem** für Solaranlagen im Gebäudebereich. Neben materialspezifischen Abklärungen (elektrisches und thermisches Verhalten, Feuchtigkeit, usw.) wird auch das mechanische Konzept untersucht. Einfache und handwerkergerechte Lösungen werden angestrebt.

DIVERSE STUDIEN

KELLER&ZAHN untersuchen zusammen mit dem LESO-PB / EPFL die **Optimierung** der Grösse eines Solarzellenfeldes [32] für einen gegebenen Wechselrichter. Dazu wird der Energieertrag unterschiedlich überdimensionierter Solarzellenanlagen über längere Zeit verfolgt. Dadurch kann insbesondere im Winter der Ertrag gesteigert werden. Über das Jahr gemittelt liegt der Gewinn jedoch nicht im Energieertrag sondern in der Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Von KOSMO SYNERGIE wird das Konzept von PV-Anlagen mit **Flächenverdichtung** [33] untersucht. Für die Strahlenverdichtung wurde ein Testkollektor mit 112 Oberflächenspiegeln entwickelt, welcher auf einer Nachführanlage aufgebaut ist. Mit einer mobilen Datenerfassung sollen die Eigenschaften der Anlage an geeigneten Orten untersucht werden. Erste Resultate werden anfangs 1994 erwartet.

In einer **Machbarkeitsstudie** [34] wurde von KELLER&ZAHN die Möglichkeit einer PV-Anlage entlang der Autobahn N9 untersucht. Die Messungen des Albedos durch den Genfersee zeigen, dass dieser Effekt vernachlässigbar ist. Die Realisierung des Projektes wird durch die Opposition in der Region in Frage gestellt. Eine ähnliche Studie [35] wurde durch ENERGIE SOLAIRE für die Autobahn N9 im Wallis abgeschlossen.

Bei der *Groupe de Physique Appliquée* in Genf wurde ein **Programm für Photovoltaiksysteme** [36] weiterentwickelt. Das Programm umfasst den Einbezug einer grossen Anzahl von Daten (Systemkomponenten und ihre Modellierung, meteorologische Daten, Auslegung der Anlage, Beschattungen, usw.) und simuliert das Verhalten der geplanten Anlage. Eine Version in *TURBO PASCAL* unter *DOS* liegt vor; die Umschreibung in *WINDOWS* wird durchgeführt.

Bei METEOTEST wurde der **PV-Monitor** [37] weiterentwickelt. Diese Software erlaubt via Modem den Zugang zu verschiedenen PV-Anlagen. An einer Neuauflage von METEONORM [38] wird gearbeitet. Die neue Version, METEONORM'95, wird sich auf die Messwerte 1983-92 des Netzes der automatischen Stationen der SMA abstützen und zusätzlich Horizontkorrekturen erlauben.

KOORDINATION

Am TISO wurde die Begleitung des Photovoltaik Forschungsprogramms weiterverfolgt [39]. In diesem Rahmen wurden auch die Kontakte mit dem CCR in Ispra und mit dem *European Working Group on PV Plant Monitoring* wahrgenommen. Im Rahmen der IEA Projekt *Exchange and Dissemination of Information on PV Power Systems* wurde ein Bericht über die Schweizer Aktivitäten erstellt [44].

PMS ENERGIE leitet ein IEA-Teilprojekt [40] und koordiniert hierzu auch die Schweizer Aktivitäten. In diesem Rahmen wird auch eine private 2.8 kWp-Anlage [41] erfasst und publiziert.

An der Universität Genf wurde die Koordination des IEA-Projektes **Spektrale Messungen der Sonnenstrahlung** [42] weiterverfolgt.

3. Internationale Zusammenarbeit

Die Projekte am IMT und am CRPP verfolgten zahlreiche Kontakte mit verschiedenen europäischen Forschungsgruppen; beide sind zudem in neue Forschungsprojekte der Europäischen Union eingebunden, das IMT im Rahmen des JOULE II-Programms und das CRPP wie bisher im BRITE-EURAM-Programm. Auch die AFIF ist, wie oben erwähnt, an Projekten im JOULE II-Programm beteiligt. Die Zusammenarbeit mit der IEA (siehe oben) hat sich im vergangenen Jahr verstärkt und erlaubt damit einen intensiven Erfahrungsaustausch.

4. Transfer in die Praxis

Viele der in diesen Forschungsprojekten erarbeiteten Kenntnisse werden unmittelbar in die Praxis umgesetzt, insbesondere auf dem Gebiet der Solarmodule, der Wechselrichter, der Systemtechnik und der Gebäudeintegration und finden zum Teil in der Form von P+D-Projekten eine Fortsetzung. Aufgrund der in Pilot-Serien festgestellten Mängel (Wechselrichter, Systemtechnik) können neue, verbesserte Lösungen erarbeitet werden.

5. P + D Projekte (Th. Nordmann, Förderprogrammleiter)

Bis Ende 1993 wurden für mehr als 30 Pilot- und Demonstrationsanlagen mit einer gesamten Nennleistung von ca. 750 kWp vom Bund Kostengutsprachen erstellt resp. werden Anlagen bereits betrieben. 1993 wurden vier weitere grössere Pilot- und Demonstrationsanlagen mit einer Gesamtleistung von 160 kWp ans Netz geschaltet.

Wichtige P+D - Objekte sind unter anderem:

Freistehende Anlage:

DESERTASOL (auf 1900 m.ü.M) Disentis **98 kWp** (eine mit einer namhaften Beteiligung des Kantons Graubünden, des Bundes und der NOK, mit Laminaten schweizerischer Provenienz und einem schweizerischen Wechselrichter).

Gebäudeintegration:

KIRCHE STECKBORN **20 kWp;**

Bergrestaurant SUNNEGGA Zermatt **11.5 kWp;**

ELEKTRO-BERUFSSCHULENZENTREN Uster, Frauenfeld und Herisau mit einer Totalleistung von **14.4 kWp.**

Schwerpunkte dieser Pilot- und Demonstrationsaktivitäten sind die Erprobung neuer Modul- und Inverterkonzepte, die Erprobung der Gebäudeintegration sowie die Umsetzung der Anwendungserfahrung.

Von wichtigen Pilot- und Demonstrationsanlagen, die 1989-1991 ans Netz gingen, stehen jetzt umfassende Datensätze zur Verfügung. Der spezifische Jahresertrag beträgt je nach Lage, Wirkungsgrad von Panel und Inverter sowie Zuverlässigkeit der Anlage zwischen 550 kWh/kWp - 1100 kWh/kWp. Der Performance Ratio (PR) konnte z.B. im Falle der Anlage N13 1993 auf 81% gesteigert werden.

Die Schweiz konnte ihre führende Stellung bei der Gebäudeintegration 1993 qualitativ halten. Allerdings sind in der Zwischenzeit weltweit, besonders in der EU (BRD) und auch Japan grosse Anstrengungen zugunsten der Weiterentwicklung der Gebäudeintegration angelaufen. Generell ist ein Trend zu grösseren Modulen und Laminaten mit höherem Wirkungsgrad feststellbar. Erste gelungene Realisierungen von Gebäudeintegrationen in der Schweiz haben weltweit hohe Beachtung gefunden. Die Dünnfilmtechnologie hat sich im Netzverbund wegen den hohen Betriebsspannungen und der noch ungenügenden Stabilität des Wirkungsgrades noch nicht durchgesetzt.

6. Bewertung 1993 und Ausblick für 1994

1993 war für die Photovoltaik als Ganzes, d.h. insbesondere für installierte Anlagen, kein herausragendes Jahr. Die allgemeinen wirtschaftlichen Schwierigkeiten und Unsicherheiten gingen auch hier nicht spurlos vorbei. Andererseits belegen einige Ereignisse und Publikationen [45,46] den kleinen, aber festen und stetig wachsenden Bestandteil der Photovoltaik in der Energielandschaft der Schweiz. Zudem sind die Photovoltaiker der Schweiz international angesehen und in manchen Gebieten führend. Durch die 1993 durchgeführten Forschungsarbeiten konnten in bezug auf sämtliche Teilaspekte des Programms wertvolle Erfahrungsgrundlagen erarbeitet werden. Damit stehen für die Anwendung der Photovoltaik für zahlreiche Lösungen entsprechende Kenntnisse zur Verfügung. Ausserdem besteht eine gute Infrastruktur mit entsprechendem Fachwissen, um zukünftige Photovoltaikkomponenten, -systeme und -anlagen auf ihre Eigenschaften zu überprüfen. Trotzdem gibt es noch zahlreiche zu lösende Probleme. Für 1994 ist eine Fortsetzung der meisten der bisherigen Stossrichtungen vorgesehen. Das Ziel soll eine rasche Umsetzung der gewonnenen Kenntnisse sein. Das erworbene Fachwissen und die vorhandenen Messeinrichtungen sollen hierzu möglichst effizient eingesetzt werden. Für die einzelnen Bereiche bedeutet dies:

Zellen: Ein höherer stabiler Wirkungsgrad des amorphen Siliziums bleibt oberstes Ziel. Die entsprechenden Arbeiten am IMT in Neuchâtel konzentrieren sich auf diese Frage, verfolgen aber auch das Konzept der Hybridzellen weiter. Parallel dazu läuft am CRPP in Lausanne ein Projekt an, welches die grossflächigere Abscheidung der Schichten anstrebt. Diese Projekte haben die Industrialiserung der gewonnenen Kenntnisse als klares Ziel.

Module: Weitere Materialvarianten sollen zum Einsatz gelangen und auf ihre Eignung geprüft werden. Im Sinn der architektonischen Integration sollen möglichst ansprechende und flexible Lösungen erarbeitet werden.

Wechselrichter: Mit Ausnahme des Modulwechselrichters besteht hier weniger Handlungsbedarf, auch wenn die Kinderkrankheiten der bestehenden Produkte überwunden werden müssen.

Systeme und Anlagen: Spezifische systemtechnische Probleme müssen noch gelöst werden. Hierzu sollen die Ingenieurschulen miteinbezogen werden. Die messtechnisch feinerfassten Anlagen sollen auf Besonderheiten beschränkt werden.

Gebäudeintegration: Die anerkannte Führungsstellung der Schweiz in diesem Bereich sollte beibehalten werden und durch neue flexiblere Modulvarianten und Systemtechniken dem Bausektor näher gebracht werden.

Diverse Studien: Die durchzuführenden Studien sollen sich auf wesentliche Fragen konzentrieren, z. B. die Umweltverträglichkeit der Photovoltaik oder unerlässliche Weiterentwicklungen.

Koordination: Die bisherigen internationalen Aktivitäten werden fortgesetzt, um eine optimale Einbettung in das internationale Umfeld zu gewährleisten. Weitere Beteiligungen an europäischen Projekten sind anzustreben, insbesondere im zukünftigen vierten Rahmenforschungsprogramm der EU.

1994 findet in Amsterdam die 12. Europäische Photovoltaikkonferenz statt. Die Schweiz ist mit 29 Beiträgen sehr gut an dieser Konferenz vertreten.

7. Liste der 1993 gelaufenen Projekte

[1] A. Shah, IMT / Uni - *Neuchâtel*: ***Solarzellen aus amorphem Silizium.*** (JB + SB)

[2] F. Troyon, Ch. Hollenstein, CRPP / EPF - *Lausanne*: ***Einfluss von plasma-physikalischen und plasma-chemischen Eigenschaften von VHF Silan-Plasmen auf die Abscheidung von amorphem und mikrokristallinem Silizium.*** (JB + SB).

[3] H. Kiess, PSI, *Villigen*: ***Dünne Solarzellen.*** (JB)

[4] P. Rys, H. Grüniger, LTC / ETH - *Zürich*: ***Elektrokatalytische Herstellung von Siliziumfolien für Solarzellen.*** (JB+SB, NEFF 160.3)

[5] H. Zogg, S. Blunier, A. N. Tiwari, AFIF / ETH - *Zürich*: ***EUROCIS.*** (JB)

[6] H. Zogg, S. Blunier, A. N. Tiwari, AFIF / ETH - *Zürich*: ***EUROCAD.*** (JB)

[7] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, *Mönchaltorf*: ***Entwicklung eines flachdach integrierten Photovoltaiksystems (SOFREL).*** (JB + SB)

[8] M. Rusterholz, SOLUTION, *Härkingen*: ***Funktionale Materialkomponenten im architekturfähigen Photovoltaik-Bauelement.*** (JB + SB)

[9] M. Weng, ALUSUISSE-LONZA, *Neuhausen*: ***Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen.*** (JB)

[10] V. Crastan, HTL - *Biel*: ***3 kW-Solarwechselrichter mit galvanischer Netzkopplung.*** (JB)

[11] V. Crastan, HTL - *Biel*: ***Digitales Leistungsmesssystem für Solarwechselrichter.*** (JB + SB)

[12] C. Giovannini, INVERTOMATIC, *Riazzino*: ***Solarwechselrichter mit Netzeinspeisung im 50 kW-Bereich.*** (JB)

[13] E. T. Schönholzer, NEU-TECHNIKUM - *Buchs*: ***Störungsfreie photovoltaische Netzeinspeisung mit 3-Phasen-Wechselrichter.*** (JB)

[14] U. Bühler, M. Real, ALPHA REAL, *Zürich*: ***Konzeptstudie und Entwicklung eines Solarmodulwechselrichters.*** (JB)

[15] V. Crastan, HTL-*Biel*: ***Mini-Wechselrichter für direkten Netzanschluss 230 V von Solarmodulen.*** (JB)

[16] H.R. Rötlisberger, H. Häberlin, HTL - *Burgdorf*: ***Vergleichsmessungen an PV-Wechselrichtern.*** (SB)

[17] H. Häberlin, F. Käser, S. Oberli, HTL - *Burgdorf*: ***Aufbau einer Testanlage für Photovoltaik-Wechselrichter bis 60kW.*** (JB)

[18] M. Camani, D. Chianese, S. Rezzonico, DIP. DEL TERRITORIO, *Bellinzona*: ***Tests di componenti e sistemi per progetti nel campo della tecnica fotovoltaica, TISO - periodo III.*** (JB+SB)

[19] R. Minder, Konsortium PHALK MONT-SOLEIL c/o EWI, *Zürich*: ***Photovoltaisches Kraftwerk PHALK Mont-Soleil Basis-Forschungsprogramm.*** (JB + SB)

[20] P. Schaub, O. Guisan, GAP / Uni - *Genève*: ***Etude d'une installation photovoltaïque de 7,5 kW couplée au réseau.*** (JB + SB)

[21] M. Maurer, P.-J. Duc, EIV, *Sion*: ***SOLEIV, recherche PV à l'EIV.*** (JB + SB)

[22] J.-R. Leidner, EWI, *Zürich*: ***Installation de mesures, évaluation des données et mise en service préliminaire du projet HYDROSOL pour la production d'hydrogène solaire.*** (JB)

[23] C. Beutler, S. Oberli, H. Häberlin, HTL - *Burgdorf*: ***Ertrag und Zuverlässigkeit Netzgekoppelter Photovoltaikanlagen im Kanton Bern.*** (JB)

[24] Chr. Meier, ALPHA REAL, *Zürich*: ***Energiestatistik und Erfolgskontrolle Photovoltaik.*** (JB)

[25] J.-B. Gay, C. Roecker, P. Affolter, LESO / EPF - *Lausanne*: ***Site de démonstration d'éléments de construction photovoltaïques intégrés au bâtiment. Phase I - 1991-1993.*** (JB + SB)

[26] M. Posnansky, ATLANTIS ENERGIE, *Bern* & ZETTER, *Bern*: ***Integration von Photovoltaik-Stromgeneratoren in die Gebäudehülle.*** (JB + SB)

[27] S. Gnos, ATLANTIS ENERGIE, *Bern*: ***Forschungsarbeiten betr. PV-Schindeldach Rigi.*** (JB)

[28] Chr. Meier, ALPHA REAL: ***Voruntersuchung für Photovoltaik-Kraftwerk Autobahnüberdeckung 'Breite'.*** (JB + SB)

[29] R. L. Egloff, COPER, *Genève*: ***Intégration photovoltaïque sur les nouvelles marquises de la gare de Morges.*** (JB + SB)

[30] J.-B. Gay, J. Bonvin, Ch. Roecker, LESO / EPF - *Lausanne*: ***Photovoltaïque intégré aux marquises.*** (JB)

[31] Chr. Meier, ALPHA REAL: ***Entwicklung eines optimierten Verkabelungssystems für Solarzellenanlagen im Gebäudebereich.*** (JB)

[32] L. Keller, KELLER&ZAHN, *Lavigny*, & LESO / EPF - *Lausanne*: ***Optimisation de la surface du champ photovoltaïque. Mesures & Validation.*** (JB)

[33] K. Stegmüller, Th. Steinemann, KOSMO SYNERGIE, *Bern*: ***HELIOFOL II - Sonnenkollektorsystem mit Flächenverdichtung.*** (JB)

[34] L. Keller, KELLER&ZAHN, *Lavigny*, & TNC, *Chur*: ***Faisabilité d'une installation PV le long de l'autoroute N9 dans le Lavaux.*** (JB)

[35] J.-P. Rossy, ENERGIE SOLAIRE, *Sierre*: ***Potentiel PV et étude de faisabilité le long du tracé de l'autoroute N9 en Valais.*** (SB)

[36] O. Guisan, A. Mermoud, GAP / Uni - *Genève*: ***Logiciel pour systèmes photovoltaïques.*** (JB)

[37] M. Baumgartner, METEOTEST, *Bern* : ***Weiterentwicklung PV-Monitor.*** (JB)

[38] J. Remund, METEOTEST, *Bern* : ***METEONORM Neuauflage - Etappen 2 + 3.*** (JB)

[39] S. Rezzonico, DIP. DEL TERRITORIO, *Bellinzona*: ***TISO: Valutazione e sorveglianza di lavori nel settore dei sistemi fotovoltaici.*** (JB)

[40] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, *Mönchaltorf*: ***Leitung, Betreuung und Koordination des Vorhabens "Photovoltaik in Gebäuden" mit dem IEA Solar Heating and Cooling Programme.*** (JB)

[41] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, *Mönchaltorf*: ***Ausmessen der Solaranlage Schauenbergstrasse 50 in Zürich.*** (JB)

[42] P. Ineichen, GAP / Uni - *Genève*: ***Coordination suisse du projet de mesures spectrales du rayonnement solaire du Programme SH&C de l'AIE.*** (JB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

8. Referenzen

[43] **Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1992**, BEW

[44] S. Rezzonico, Progetto TISO, *Canobbio*: ***Status review of PV power applications***

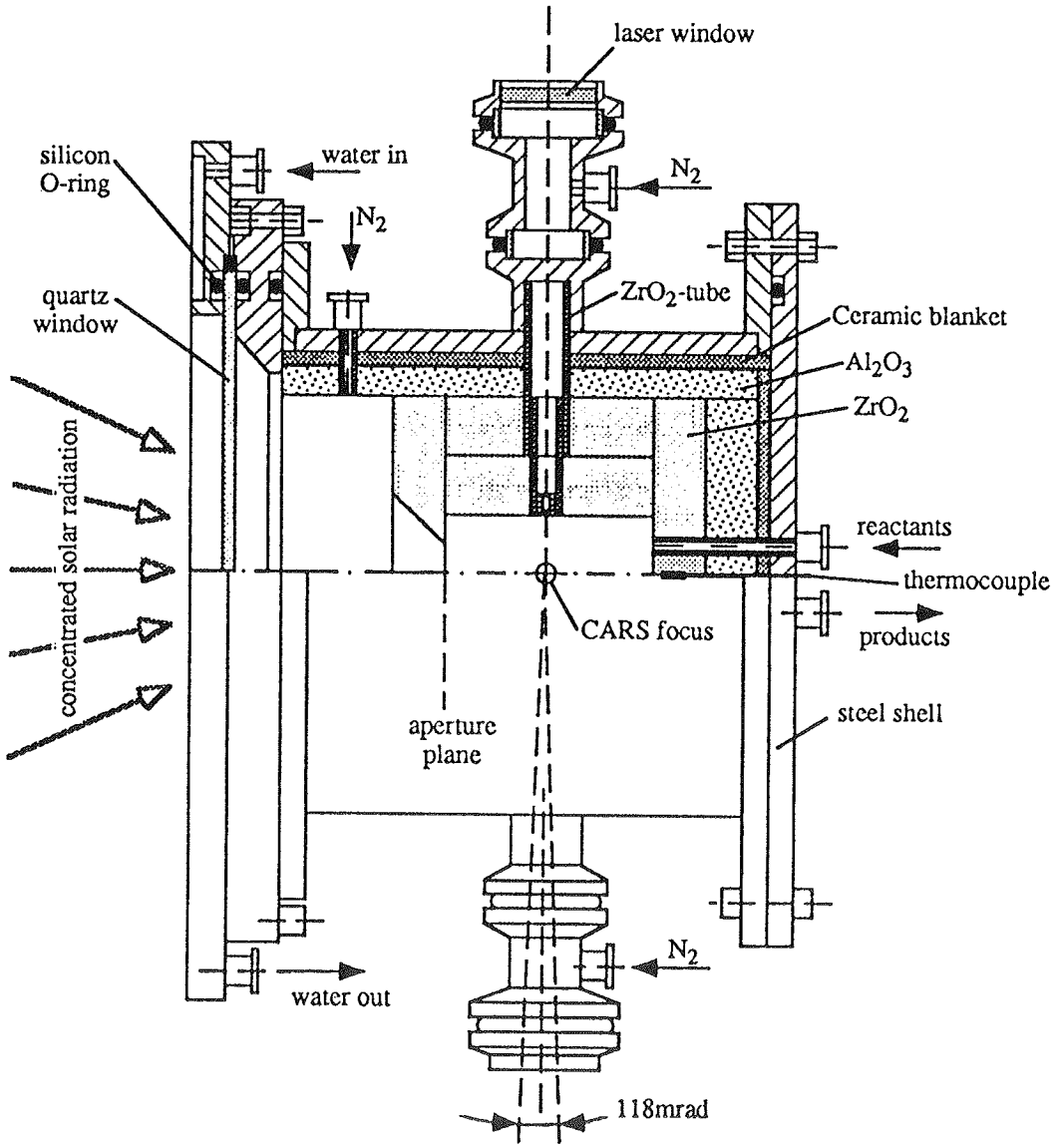
[45] Photovoltaikklausurtagung, *Gersau*, 24.-26.Okt.1993, ***Tagungsbericht***

[46] Bulletin des VSE 10 / 1993, ***Photovoltaik***

THERMOCHEMIE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Armin Reller



Solarreaktor zur Untersuchung von thermochemischen Gasreaktionen

Schema eines neuentwickelten Solarreaktors, mit dessen Hilfe thermochemische Prozesse in einem solaren Strahlungsfeld hoher Energiedichte untersucht werden können (z.B. Spaltung von Ammoniak, oder Reformierung von Methan mit Kohlendioxid unter Bildung von Synthesegas).

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1993

Die Zielsetzung des Programms **Thermochemie** besteht darin, Strahlungsenergie mit möglichst hoher Effizienz und möglichst geringen Umweltrisiken mittels thermochemischer und physikalischer Prozesse in speicherbare, transportfähige und schliesslich wirtschaftlich konkurrenzfähige chemische Energieträger umzuwandeln. Die dazu erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beinhalten einerseits die qualitative und quantitative Erfassung von potentiellen Strahlungsenergiequellen, insbesondere von Sonnenenergie. Andererseits werden die Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie eingehend untersucht, Reaktorsysteme entwickelt, welche eine möglichst effiziente Absorption und Speicherung der Strahlungsenergie mittels gasförmiger oder flüssiger Medien, bzw. deren Nutzung für chemische Reaktionen, ermöglichen. Schliesslich wird die Kinetik und der Mechanismus von optimal geeigneten, in Abhängigkeit des verfügbaren Temperaturniveaus angepassten , endothermen thermochemischen Prozessen charakterisiert.

Im Bereich der physikalischen Prozesse steht die Absorption von Strahlungsenergie durch Luft und Wasser mittels Absorbersystemen im Zentrum, welche dem jeweiligen Temperaturbereich, bzw. dem Konzentrationsgrad der Strahlung, optimal angepasst sind. Als Produkte der thermochemischen Prozesse stehen einerseits Wasserstoff aus der Spaltung von Wasser, andererseits Methanol, Ethanol, Amine und weitere Grundchemikalien im Zentrum des Interesses. Dabei wird angestrebt, dass auch die in Abfall, d.h. in Biomasse oder synthetischen Materialien gespeicherte Sonnenenergie, mittels katalysierter Prozesse, wieder in brauchbare Energieträger umgewandelt werden kann. Hier konzentrieren sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf die katalytische Umwandlung von Kohlendioxid sowie die Erzeugung von Wasserstoff aus Abfall mittels Pyrolyse.

Aufgrund des breiten Spektrums der im Berichtsjahr vorangetriebenen Arbeiten lässt sich leicht erklären, dass die einzelnen Projekte sowohl an technischen Hochschulen und Universitäten als auch in industriellen Betrieben (siehe Liste der Projekte) erfolgten. Diese Vernetzung zwischen Grundlagenwissenschaft, Angewandter Wissenschaft, Technischer Entwicklung und Realisierung stellt im Bereich der Energieforschung wohl eine unabdingbare Voraussetzung dar und soll im kommenden Jahr noch gezielt verstärkt werden.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Berichtsjahr 1993 wurden folgende Projekte ausgeführt:

a) Absolute Bestimmung des chemischen Potentials angeregter Moleküle aus Lumineszenzmessungen.
b) Simultane Messung der Verteilung, Emissivität, Temperatur und Beleuchtungsstärke an beleuchteten, heissen, matten Oberflächen.
c) Optische Schichten für die thermische Konversion von Solarenergie.
d) Strahlungsreaktoren für thermochemische Prozesse.
e) Entwicklung und Untersuchung an Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung.
f) Kinetische Untersuchungen an Redoxprozessen von Metalloxiden zur Speicherung konzentrierter Solarstrahlung.
g) Entwicklung katalytisch aktiver Schichten zur Herstellung von Methanol aus Wassestoff und Kohlendioxid, sowie die Herstellung von Wasserstoff durch Pyrolyse.
h) Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen.
i) Festkörperchemische & materialwissenschaftliche Untersuchungen des thermochemischen Reaktionsverhaltens von Phasen, die für die chemische Speicherung von Sonnenenergie interessant sind.

a) ***Absolute Bestimmung des chemischen Potentials angeregter Moleküle aus Lumineszenzmessungen***

Die thermodynamischen Grundlagen thermochemischer Prozesse stellen einen Eckpfeiler der Forschungsaktivitäten dar, welche zum Ziel haben, Strahlungsenergie, insbesondere Solarstrahlung, effizient in chemisches Potential umzuwandeln. Aufgrund thermodynamischer Überlegungen ist gezeigt worden, dass Systeme, welche Strahlungsenergie direkt in chemische oder elektrische Energie umwandeln, notwendigerweise lumineszieren. Demnach ist das chemische Potential eines angeregten Zusatnds eines bestimmten Systems ein Mass für die treibende Kraft einer photochemischen Reaktion. Da die messbare Lumineszenz vom elektrischen bzw. chemischen Potential der angeregten Zustände abhängt, ist sie ein Mass für das Energiespeichervermögen des untersuchten Systems. Die experimentelle Prüfung dieser Gegebenheiten stellt ein Ziel eines am PSI laufenden Projekts dar [1]. Ein weiteres Ziel besteht darin, die Lumineszenzquantenausbeute von Festkörpern, die für die Umwandlung von Sonnenenrgie in chemisches Potential relevant sind (Si, Fe_2O_3, TiO_2, etc.) in Abhängigkeit der Temperatur zu messen. Diese Projektarbeiten sind direkt mit den unten genannten Aktivitäten am PSI koordiniert.

b) ***Simultane Messung der Verteilung, Emissivität, Temperatur und Beleuchtungsstärke an beleuchteten, heissen, matten Oberflächen.***

Für die bei hohen Temperaturen und in einem Feld hoch konzentrierter Strahlungsenergie durchgeführten thermochemischen Prozesse (siehe unten) werden feste Materialien eingesetzt, sei es als verfahrenstechnisch notwendige Infrastruktur, sei es als Reaktionspartner. In jedem Falle sind mit konzentriertem Sonnenlicht bestrahlte Festkörperoberflächen sowohl hohen Beleuchtungsstärken im Bereich von bis zu 500 W/cm2 als auch extremen Gradienten der Beleuchtungsstärke ausgesetzt. Daraus resultieren hohe Temperaturen bzw. Temperatur-gradienten an den Festkörperoberflächen. Die notwendige gleichzeitige Messung von Emissivität, Tenperatur und Beleuchtungsstärke wird in einem PSI-Projekt vorangetrieben [2]. Ziel des Projekts ist es, ein bis dato nicht existierendes Messverfahren zu realisieren. Danach sollen Stoffsysteme untersucht werden, die in den untengenannten relevanten thermochemischen Prozessen zum Einsatz kommen. Von besonderem Interesse ist darüberhinaus, einen direkten Effekt von Photonen auf Hochtemperaturprozesse nachzuweisen oder zu widerlegen.

c) ***Optische Schichten für die thermische Konversion von Solarenergie.***

Das an der Universität Basel laufende Projekt [3] ist Teil des übergeordneten Verbundprojekts Absorber 2000, welches zum Ziel hat, ein im Temperaturbereich zwischen 100°C und 500°C arbeitendes Direktabsorptionssystem zu entwickeln. Als Einsatzgebiete sind Haustechnik und Industriebetriebe vorgesehen. Eine zentrale Bedeutung kommt der Beschichtung des Absorbers zu. In vorangegangenen Projekten wurden die festkörperphysikalischen Untersuchungen für optimale Eigenschaften erarbeitet. Zur Zeit werden selektive Schichten aus Chrom/Chromoxid und metallhaltigem Kohlenstoff mit plasmagestützten Methoden abgeschieden und bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften und ihrem chemischen Reaktionsverhalten geprüft. Die Chrom/Chromoxid-Schichten erwiesen sich bei beschleunigten Alterungsversuchen als sehr stabil. Für deren Abscheidung müssen jedoch noch die Bedingungen optimiert werden. Bei den metallhaltigen Kohlenstoffschichten konnten die für einen technischen Einsatz zu schnellen chemischen Abbauprozesse charakterisiert und entsprechend verhindert werden. Ein Problem stellt das für den technischen Einsatz verwendete, zu rauhe Kupfer-Trägerblech dar: Die Haftung und Alterungsstabilität der Absorberschicht muss wohl mittels Zwischenschichten verbessert werden.

d) ***Strahlungsreaktoren für thermochemische Prozesse [4].***

Aufgrund vorangehender Projektarbeiten (siehe JB '92) betreffend Bau und technischer Prüfung volumetrischer Receiversysteme erfolgten nun im Berichtsjahr die Grundlagenarbeiten für den Bau eines "industriellen" Prototyps mit einer Leistung von 3 - 5 MW für einen geschlossenen Kreislauf und Arbeitstemperaturen von über 850°C. Es wurden Luftströmungsversuche, Dauertests der Absorberbeschichtung, Dichtungstests und Temperaturschocktests der verwendeten Quarzglasrohre mit positiven Resultaten durchgeführt. Zusammmen mit dem HTL Windisch lieferten Strömungsversuche zur Aufklärung der Durchmischung und Geschwindigkeitsverteilungen des Trägergases im Absorber wichtige Daten. Die Konzeption für den Bau des "industriellen"

Prototyps konnte aufgrund der vorliegenden experimentellen Resultate sehr weit vorangetrieben werden, sodass im kommenden Jahr ein Segment unter Verwendung herkömmlicher Komponenten und Herstellungsmethoden vollständig konstruiert werden soll. Es wurden ebenfalls Receiverkonzeptstudien für Leistungsgrössen von 30 - 100 MW bearbeitet. Der Bau und die Prüfung des "industriellen" Prototyps in Zusammenarbeit mit den *Sandia National Laboratories* in Albuquerque, New Mexico, USA, soll im Jahre 1994 erfolgen.

e) ***Entwicklung und Untersuchung an Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung.***

Die Entwicklung und verfahrenstechnische Optimierung von Konzentratoren und Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe in einem Strahlungsfeld hoher Energiedichte stellt einen zentralen Bereich des Programms thermochemie dar. Am PSI stehen zur Zeit zwei Konzentratoranlagen - der McDonnell-Douglas Parabolspiegel und der Heliostat-Parabolspiegel-Konzentrator (siehe JB '92) - und drei Reaktorsysteme - der Zyklon-Reaktor (siehe JB '92), der sog. BÜHLER-Reaktor sowie eine Neuentwicklung - für Tests zur Verfügung. Mit dem Zyklon-Reaktor wurden eine grosse Anzahl Testreaktionen gefahren. Es konnte z.B. gezeigt werden, dass die thermochemische Zersetzung von Kalk mit einem Energieabsorptions-Wirkungsgrad von über 40% gefahren werden kann. Obwohl die Kalkzersetzung nicht der Prozess der Wahl darstellt, sind diese Versuche jedoch sehr vielversprechend für eine effiziente Umwandlung von Sonnenenergie in chemisches Potential. Der in Zusammenarbeit mit der Firma BÜHLER, Uzwil, gebaute Reaktor wurde getestet. Die Resultate werden in Kürze in einem Bericht zusammengefasst einsehbar sein. Schliesslich wurde am PSI selbst ein neuer volumetrischer Reaktor realisiert [5]. Die Leitidee dieses neuen Reaktorkonzepts besteht darin, eine Pulverwolke möglichst effizient und kontrolliert durch einen Fokusbereich zu bewegen und gleichzeitig die Reaktorwände möglichst kühl zu halten. Erste Versuche ergaben, dass Temperaturunterschiede von 500°C zwischen Pulverteilchen und Reaktorwänden aufrechterhalten werden können.

Weitere Aktivitäten dieses Projekts umfassen die Analyse von Strahlungswärmeübertragung, Laser-Diagnostik für solarchemische Reaktionen (siehe auch Abbildung), Evaluation von geeigneten thermochemischen Prozessen wie der direkten oder mittels Methan durchgeführten Metalloxidreduktion, etc.

Als vielleicht wichtigster Ansatz dieses Projekt stellt sich heraus, dass für die Entwicklung und Realisierung von neuen Energietechnologien ausgehend von den theoretischen Grundlagen über die Evaluation von geeigneten chemischen Speicherprozessen bis hin zu angepassten, optimalen verfahrenstechnischen Konzentrator-/Reaktor-System ein breites Spektrum von Voraussetzungen erfüllt werden muss. Dementsprechend ist eine weitgehende Koordination zwischen diesem Projekt, dem obengenannten Projekt [1] sowie den folgenden Projekten "Kinetische Untersuchungen an Redoxprozessen von Metalloxiden zur Speicherung konzentrierter Solarstrahlung [6]" und "Festkörperchemische und materialwissenschaftliche Untersuchungen ...[9]" unabdingbar.

f) ***Kinetische Untersuchungen an Redoxprozessen von Metalloxiden zur Speicherung konzentrierter Solarstrahlung [6].***

Die Arbeiten im Rahmen dieses Projekts fokussieren sich auf experimentelle Unrtersuchungen betreffend Kinetik und Mechanismus von Redoxprozessen in Metalloxiden, insbesondere auf Kreisprozesse zur Wasserspaltung mit kinetisch und thermodynamisch optimierten Eisenoxiden (teilweise mit Mangan substituiert) [6]. Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die wohl optimale thermochemische Reaktivität von Eisenoxid für eine Anwendung bezüglich Ökonomie und Ökologie äusserst günstig liegt.

Die relevanten thermochemischen Prozesse können wie folgt zusammengefasst werden:

Reaktion 1: $Fe_3O_4 \rightarrow 3\ FeO + \frac{1}{2}\ O_2$ (Hochtemperaturprozess: Speicherung)

Reaktion 2: $3\ FeO + H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + H_2$ (Niedertemperaturprozess: H_2-Produktion)

Die Experimente zur thermischen Reduktion (Reaktion 1) wurden in einem Direktabsorptions-Partikelreaktor in der am PSI installierten Konzentrator-Anlage - insbesondere bezüglich Reaktionszeit und Umwandlungsgrad - charakterisiert, zwei für den Energiespeicherprozess ganz entscheidende Faktoren. Die Wasserspaltung bei Temperaturen zwischen 500°C und 1000°C wurde im Labor (teilweise an der Universität Zürich) wurde in bezug auf Reaktionsparameter wie Oxidpartikelgrösse, Gasatmosphäre, etc. eingehend analysiert.

Neben der Wasserspaltung zur Erzeugung von Wasserstoff wurde ein weiterer Sofffkreislauf ausgearbeitet und experimentell verifiziert, der ausgehend von Methan (Erdgasbestandteil) und Eisenoxid zu Synthesegas führt, welches seinerseits für die Herstellung von nützlichen Grundchemikalien bedeutend ist.

g) Entwicklung katalytisch aktiver Schichten für die Herstellung von Methanol aus Wasserstoff und Kohlendioxid, sowie die Herstellung von Wasserstoff durch Pyrolyse.

Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Arbeiten dieses Projekts vor allem auf die Produktion von Wasserstoff aus Holz und Papier mittels Pyrolyse [7]. Die Relevanz der pyrolytischen Erzeugung von Wasserstoff aus den genannten Quellen für eine Optimierung der Stoffkreisläufe in einem Zementwerk, insbesondere zur Herstellung von Methanol, wurde im JB '92 eingehend dargestellt. Es konnte nun gezeigt werden, dass unter optimalen Bedingungen - d.h. unter Optimierung der Reaktionsparameter wie Holzmenge, Wasserzugabe, Katalysator - bis zu 950 l Wasserstoff pro Kilogramm Holz erzeugt werden kann (Wasserstoffkonzentration im Pyrolysegas: über 50%!). Das Projekt wurde per Mitte '93 abgeschlossen, es soll aber ein Nachfolgeprojekt an diesen wichtigen Arbeiten angeschlossen werden. Ziel der nun durchzuführenden Untersuchungen muss die Optimierung der verfahrenstechnischen Parameter sowie die Ausarbeitung technischer Realisierungskonzepte sein. Darüberhinaus wird zur Zeit die Koordination zwischen den am Gesamtprozess oder an Teilschritten interessierten Industriekreisen vorangetrieben.

h) Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen [8].

Als Nachfolgeprojekt zu Arbeiten betreffend der katalytischen Synthese von Methanol aus Kohlendioxid verfolgt dieses Projekt, mittels selektiver katalyischer Prozesse interessante Grundchemikalien, insbesondere Amine, zu synthetisieren. Diese Arbeiten umfassen einerseits die Evaluation günstiger und interessanter Prozesse, andererseits die Koordination mit den in den obengenannten Projekten laufenden Untersuchungen bzw. untersuchten thermochemischen Prozessen bereffend Einsatzpotentialen der Kohlendioxidreduktion.

i) Festkörperchemische und materialwissenschaftliche Untersuchungen des thermochemischen Reaktionsverhaltens von Phasen, die für die chemische Speicherung von Sonnenenergie interessant sind [9].

Im Berichtsjahr wurde ein Instrumentarium zur qualitativen und quantitativen Erfassung der Wasserspaltungsreaktion an Metallen und Metalloxiden aufgebaut. Es wurde insbesondere eine Reaktionszelle in ein Photoelektronenspektrometer eingebaut, welche die in-situ-festkörperchemischen Untersuchungen an den genannten Prozessen erlaubt. Darüberhinaus wird diese Apparatur für weitere materialwissenschaftliche Untersuchungen im Zusammenhang mit Energieforschungsprojekten wertvolle Informationen liefern. Weitere Arbeiten konzentrierten sich auf die Synthese und Charakterisierung von Metalloxidsystemen, welche für die thermochemische Wasserspaltung relevant sind. Schliesslich wurden im Zusammenhang mit anderen Projekten des Programms **Thermochemie** Untersuchungen an Reaktionssystemen bzw. an Materialien mit den zur Verfügung stehenden Apparaturen vorgenommen. Die Resultate wurden zusammen mit den jeweiligen Beteiligten publiziert.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die im Programm **Thermochemie** laufenden Projektarbeiten werden zur Zeit in sechs Laboratorien bzw. Institutionen (PSI Villigen; Institut für Physik, Uni Basel; ATLANTIS-ENERGIE, Bern; VILAB, Bern und La Reuchenette; Chemisch-technisches Laboratorium, ETH-Zürich; Anorganisch-chemisches Institut, Univ. Zürich) realisiert.

Mit dem Projekt ABSORBER 2000 besteht eine programmübergreifende Zusanmmenarbeit (zusammen mit dem Programm AKTIVE SOLARNUTZUNG & WÄRMESPEICHERUNG). Um Überschneidungen betreffend Forschungs- und Entwicklunggstätigkeiten auf dem Gebiet der Methanolsynthese zu vermeiden, wurden koordinierende Gespräche mit den verantwortlichen Projektleitern aus Hochschulen und Industrie durchgeführt. Insbesondere auf dem Gebiet der Umwandlung von Kohlendioxid ist gegenwärtig eine erhöhte internationale Forschungsaktivität festzustellen. Die notwendigen Kontakte zu den Forschungsgruppen in diesem Gebiet werden möglichst effizient wahrgenommen.

Die Zusammenarbeit mit Fachschulen (SPF Rapperswil, HTL Brugg-Windisch, etc.) soll - als Folge erfolgreicher Wechselwirkungen - weiter ausgebaut werden.

Für den kommenden Sommer ist wieder ein Mini-Symposium geplant, in dessen Verlauf die Aktivitäten des Programms **Thermochemie** präsentiert und koordiniert werden sollen.

Die internationale Zusammenarbeit wurde im Berichtsjahr weiter ausgebaut. Als wichtigste Partnerinstitutionen sind zu nennen:

- *SolarPACES, Task "Solar Chemistry", International Energy Agency*
- Universität Hamburg, Institut für Anorganische und Angewandte Chemie, Deutschland
- Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln, Deutschland
- *Plataforma Solar de Almerìa*, Spanien
- *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, New Mexico, USA
- *Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science*, Rehovot, Israel
- Universität Ferrara, Italien
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Deutschland

4. Umsetzung der Ergebnisse

Im Berichtsjahr wurden einige Projekte abgeschlossen und vor allem mit der Gruppe am PSI neue Projekte in Angriff genommen. Die schon 1992 erfolgte Straffung des Programms **Thermochemie** wurde weiter konsolidiert.

Die programmübergreifende Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Entwicklung von Absorbern ist weiter vertieft worden. Kontakte zu mittelständischen Industriebetriebn betreffend der Realisierung eines effizienten Absorbersystems sind teilweise erfolgt (U. Frei, SPF Rapperswil). Es bestehen auch Kontakte zu Interessenten in Deutschland, sodass für '94 weitere Fortschritte Richtung Realisierung eines wettbewerbsfähigen Systems zu erwarten sind.

Am PSI wurde ein Workshop für die an den Projekten des Programms **Thermochemie** Beteiligten durchgeführt (Organisation P. Kuhn und A. Reller).

In Köln fand ein von der DLR organisierter *Workshop* "Solare Chemie" statt. Es zeigte sich sehr deutlich, dass die gegenwärtigen Trends (Verknappung der Forschungsmittel sowie grosse Zurückhaltung seitens industrieller Unterstützung) für die Forschung im Bereich regenerativer Energiequellen nicht sehr günstig liegen. Es wurde auch deutlich, dass die schweizerischen Energieforschungsprogramme einen vergleichsweise hohen Stand aufweisen und in Anbetracht der international anwachsenden Energieprobleme unbedingt auf dem Niveau gehalten oder wenn möglich ausgebaut werden müssen.

5. Geplante Forschungsarbeiten für 1994

Die grundlagenwissenschaftlichen Arbeiten werden mit den experimentellen Untersuchungen an den potentiell wichtigen Stoffsysteme weiterkoordiniert und vertieft. Da auch auf internationaler Ebene gerade im Hochtemperaturbereich noch ein beträchtliches Wissensmanko herrscht, müssen diese Tätigkeiten auch auf dieser Ebene zur Diskussion gestellt werden.

Die Realisierung der Wasserspaltung mittels Redoxprozessen an Metalloxidsystemen erfordert weitere Optimierungsarbeiten, insbesondere seitens der verfahrenstechnischen Infrastruktur. Es müssen Reaktorsysteme dahingehend modifiziert und optimiert werden, dass der Hochtemperaturprozess, also die thermochemische Reduktion des Metalloxids, im Dauerbetrieb eingesetzt werden kann.

Für die in der Industrie angesiedelten Projekte (Strahlungsreaktor der Firma ATLANTIS-ENERGIE sowie Pyrolyse/Methanolsynthese-Projekt der VILAB) sind weitere Finanzierungsquellen erforderlich, d.h. für diese Arbeiten sind in naher Zukunft Pilotanlagen zu realisieren, um ihr Einsatzpotential festzustellen.

6. Publikationen

Über die geleisteten Arbeiten wurde eine grosse Anzahl von Publikationen in der Fachliteratur veröffentlicht. Darüberhinaus wurden die Resultate der Projektarbeiten an zahlreichen internationalen Konferenzen in Form von Vorträgen und Postern erfolgreich präsentiert. Detaillierte Angaben betreffend Publikationen können den Jahresberichten der Projektleiter (zu beziehen bei ENET) entnommen werden.

7. Liste der Projekte

[1] L. Forss, M. Schubnell, PSI, *Villigen*: ***Absolute Bestimmung des chemischen Potentials angeregter Moleküle aus Lumineszenzmessungen.*** (JB)

[2] H.R. Tschudi, M. Schubnell, H. Ries, P. Kuhn, PSI, *Villigen*: ***Simultane Messung der Verteilung von Emissivität, Temperatur und Beleuchtungsstärke an beleuchteten, heissen, matten Oberflächen.*** (JB)

[3] P. Oelhafen, R. Gampp, P. Gantenbein, Uni - *Basel*: ***Selektive Schichten in der Hochtemperatursolartechnologie.*** (JB)

[4] T. Pylkänen, M. Posnansky, ATLANTIS ENERGIE, *Bern*: ***Strahlungsreaktoren für thermochemische Prozesse.*** (JB)

[5] A. Steinfeld, W. Durisch, PSI, *Villigen*: ***Entwicklung und Untersuchung an Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung.*** (JB)

[6] P. Kuhn, K. Ehrensberger, P. Hug, PSI, *Villigen* & Uni - *Zürich*: ***Thermo-/Photochemische Reaktionen zur chemischen Speicherung konzentrierter Solarstrahlung bei hohen Temperaturen.*** (JB)

[7] P. Brunner, V. Gauché, VILAB, *Bern*: ***Entwicklung katalytisch aktiver Schichten zur Herstellung von Methanol aus CO_2 und H_2 sowie Herstellung von H_2 aus Abfall durch Pyrolyse.*** (JB + SB)

[8] R. Köppel, A. Baiker, ETH - *Zürich*: ***Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen CO_2-Quellen.*** (JB)

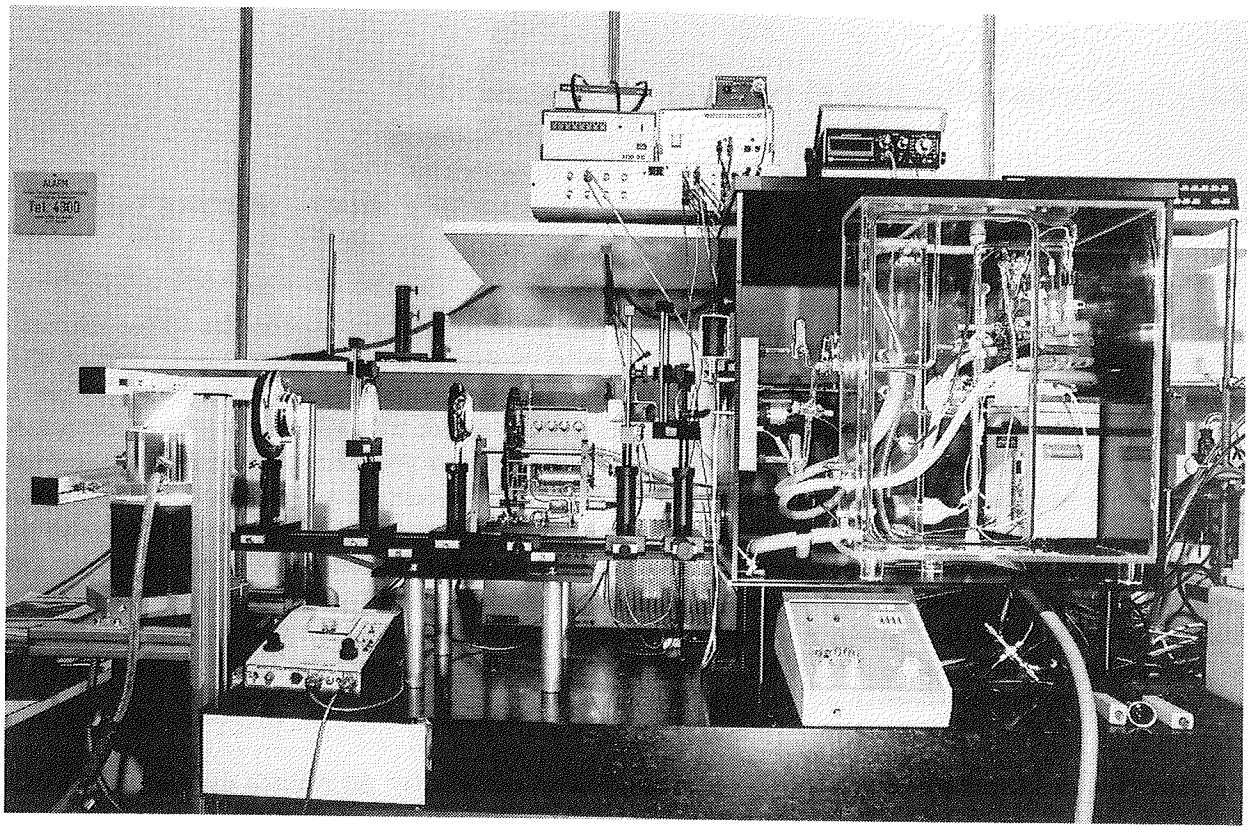
[9] P. Hug, H.R. Oswald, Uni - *Zürich* & A. Reller, Uni - *Hamburg*: ***Festkörperchemische und materialwissenschaftliche Untersuchungen des thermochemischen Reaktionsverhaltens von Phasen, die für die chemische Speicherung von Sonnenenergie relevant sind.*** (JB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

PHOTOCHIMIE

Rapport de synthèse
sur les activités 1993 du programme de recherche

Chef de programme: Jean-Claude Courvoisier



Photodécomposition

Appareil développé pour l'étude de la production d'hydrogène à partir de l'eau au moyen de la lumière visible (énergie solaire).

1. Objectifs du programme 1993

Les recherches groupées dans le programme **Photochimie** sont, dans l'ensemble à relativement long terme. C'est que l'objectif assigné à ces projets consiste à tenter de résoudre un problème clef de l'utilisation de l'énergie solaire: le stockage à long terme, sous forme condensée et compatible avec l'environnement. Aucune solution n'existe actuellement satisfaisant ces conditions, à l'exception peut-être de l'électrolyse de l'eau réalisée à partir de cellules photovoltaïques. Recherche à long terme ne signifie toutefois pas sans but et sans fin. Un critère de ce type de recherche est qu'elle doit tendre vers des solutions à des problèmes spécifiques bien définis. En aucun cas il ne peut s'agir de "l'art pour l'art". Chaque année donc, il convient d'évaluer critiquement les résultats obtenus par rapport aux programmes convenus. En ce qui concerne notre programme spécifique, il avait été prévu de mettre tout en œuvre pour que le projet sur les cellules photoélectrochimiques développées à Lausanne débouche sur une collaboration industrielle. C'est chose faite. Nous pouvons exprimer notre satisfaction du fait qu'un projet ambitieux et à long terme est jugé aujourd'hui assez avancé pour que l'industrie assume dorénavant la tâche de développement devant mener à un produit industriel; sachant que le projet comporte encore des risques et que cette phase entraînera des investissements importants. La suite du présent rapport commente les projets individuels qui ont été évalués dans la perspective définie ici.

2. Travaux effectués et résultats obtenus en 1993

CONVERSION D'ÉNERGIE SOLAIRE EN ÉLECTRICITÉ PAR DES PILES PHOTOVOLTAIQUES À BASE D'OXYDES SEMI-CONDUCTEURS [1]

L'objectif de cette recherche est d'exploiter la découverte faite à l'EPFL voici plusieurs années qu'une substance photosensible dont les électrons sont excités par la lumière visible peut être déposée sur la surface d'un semi-conducteur, l'oxyde de titane en l'occurrence, et que les charges photoexcitées sont capturées par le substrat et conduites vers un collecteur d'électrons, avec une très grande efficacité. De ce principe découle la conception d'une photopile dont le développement industriel devrait avoir pour résultat une cellule photovoltaïque d'un coût nettement inférieur, à performances égales, à celui des cellules au silicium disponibles sur le marché. Les résultats des efforts des années précédentes avaient montré que le principe est valable, que des cellules expérimentales pouvaient être réalisées en laboratoire avec des rendements intéressants, et que l'on avait pu identifier les paramètres sur lesquels appliquer l'effort pour approcher le concept d'une application pratique. Vu l'intérêt manifesté pour ces travaux par plusieurs industries suisses et étrangères, il était apparu que le soutien financier par l'Office fédéral de l'énergie devait être relayé par celui des industries manifestant la volonté d'exploiter industriellement ces résultats.

Au point de vue scientifique et technologique, des progrès substantiels ont été réalisés dans le domaine des colorants déposés sur le TiO_2, en vue de le rendre absorbant dans la plus large partie possible du spectre solaire, dans celui de l'électrolyte qui couple la partie photosensible à la contre-électrode et dans le domaine du scellement des cellules complètes. Le travail sur la mise en évidence de la stabilité à long terme des cellules s'est poursuivi et les résultats obtenus confirment la remarquable stabilité des colorants déposés sur le TiO_2 sans qu'il soit encore possible d'assigner une limite à la durée de vie des cellules.

En ce qui concerne le transfert à l'industrie, des négociations très actives ont été conduites cette année qui ont abouti à plusieurs contrats entre l'EPFL et les firmes intéressées, auxquels l'OFEN a donné son accord. Il ne faut pas cacher que le travail de développement qui incombe dorénavant aux partenaires industriels est important, car la distance qui sépare un résultat acquis par la recherche du produit satisfaisant tous les critères industriels est grande. Elle est facilement sous-estimée par ceux qui ne sont pas familiers de ces problèmes.

RÉDUCTION PHOTOÉLECTROCHIMIQUE DU CO_2 [2]

La réduction du CO_2 est et restera longtemps encore un problème important. Ce composé est libéré dans l'environnement en très grandes quantités par la combustion du charbon et des hydrocarbures, principales sources de chauffage et d'électricité à l'échelle mondiale. La réduction du CO_2 vise non seulement à réduire la pollution dont l'influence sur le climat risque de devenir catastrophique, mais encore elle peut fournir la source de composés chimiques de grande valeur. Il faut bien entendu que la source d'énergie nécessaire à la réduction du dioxyde de carbone soit autre que la combustion d'hydrocarbures! N'entrent en ligne de compte que l'électricité d'origine solaire ou nucléaire. L'Université de Genève a poursuivi ses travaux sur la réduction photoélectrochimique et sur la réduction électrochimique du CO_2, d'une part en développant la découverte faite précédemment que l'illumination par la lumière visible de l'électrode d'argent augmente significativement le rendement de la réaction; d'autre part, la recherche a permis de trouver un procédé très efficace pour pallier le défaut des électrodes de cuivre qui est de perdre leur activité dans un temps court, de l'ordre d'une heure ce qui les rend impropre à une utilisation industrielle. Ce procédé offre en outre l'avantage de permettre de travailler sur une gamme de paramètres et par là d'influencer la réaction dans le sens de favoriser la production de composés particulièrement intéressants tels que l'éthylène ou l'éthanol plutôt que le monoxyde de carbone ou le méthane.

Bien que la recherche en laboratoire académique soit encore loin d'être mûre pour que ses résultats soient transférables à l'industrie, il est apparu opportun de déposer une demande de brevet afin de pouvoir publier les résultats obtenus sans hypothéquer les chances d'intéresser un partenaire industriel. Les publications faites dans la seconde moitié de cette année ont rencontré un écho très favorable dans le milieu scientifique concerné.

CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES [3]

La recherche scientifique n'a sans doute pas épuisé la quête de solutions possibles au problème de la conversion de l'énergie solaire en électricité à efficacité suffisante, coût plus avantageux que par l'utilisation du silicium mono- ou polycristallin et à partir de matériaux compatibles avec les exigences de sauvegarde de l'environnement. Le phosphure de zinc, objet de recherches à l'EPF-Zürich s'est avéré être un candidat potentiellement intéressant. Alors que, cristallisé, il présente une stabilité chimique insuffisante, les travaux effectués à Zürich sur la forme amorphe de ce composé ont permis de montrer que ce défaut est supprimé. Une bonne collaboration avec l'Université de Neuchâtel a mené au concept d'une structure mixte, phosphure de zinc sur silicium microcristallin permettant de tourner la difficulté de réaliser une jonction p-n faute de savoir déposer une couche de Zn_3P_2 du type n. Toutefois, les résultats obtenus, bien que qualitativement positifs, sont quantitativement encore loin de ce que l'on devrait atteindre pour espérer concurrencer les solutions classiques. Le rendement de conversion de l'énergie solaire atteint dans le meilleur des cas ne dépasse pas 0,5%.

RÉDUCTION PHOTOÉLECTROCHIMIQUE DU CO_2 ET PHOTOLYSE DE L'EAU POUR RÉALISER LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE SOUS FORME CHIMIQUE [4]

Le projet traité à l'Université de Berne vise, d'une part à maîtriser les zéolithes substituées par des ions d'argent, tant du point de vue expérimental que du point de vue théorique, d'autre part à utiliser ces substances, pour réaliser la photolyse de l'eau. Des progrès réjouissants ont été faits cette année concernant le dépôt et la fixation de couches monograins de zéolithes sur des électrodes et sur le mécanisme de transfert de charges entre l'électrode et l'argent oxydé et réduit dans les grains de zéolithes. Cette étape était indispensable pour l'utilisation prévue de ce concept dans la perspective de la décomposition de l'eau par l'énergie solaire. En effet, le groupe de recherche impliqué avait précédemment mis en évidence la propriété des zéolithes substitués par l'argent d'oxyder l'eau en oxygène libre sous irradiation de lumière visible, ce qui constitue une étape difficile à réaliser pour la photodissociation de l'eau.

LA PHOTOÉLECTROLYSE DE L'EAU ET PRODUCTION D'HYDROGÈNE ET D'OXYGÈNE AU MOYEN DE L'ÉNERGIE SOLAIRE [5]

Ce projet est exécuté en étroite collaboration entre les groupes de Genève, Lausanne et Berne. L'objectif de la recherche consiste à exploiter la complémentarité des trois groupes pour réaliser la décomposition directe de l'eau en oxygène et hydrogène et réaliser ainsi le stockage d'énergie solaire sous forme chimique, c'est-à-dire sous une forme concentrée et non polluante. D'une part, on dispose à Lausanne d'un système apte à réduire les ions hydrogène à partir du TiO_2 photoactivé, d'autre part, Berne travaille sur l'oxydation de l'eau par les zéolithes illuminées dans le visible et Genève développe des couches d'oxyde de tungstène qui sont susceptibles d'oxyder l'eau sous illumination. La collaboration a permis de concevoir un système de couplage entre ces éléments à partir duquel les expériences réalisées ont montré la validité du processus. Sous illumination de lumière visible, on a pu observer la production d'hydrogène libre et d'oxygène de façon reproductible. La surface des électrodes photosensibles est bien entendu encore modeste, mais le but était de valider le concept et d'en étudier les paramètres. Le rendement obtenu se situe actuellement entre 2 et 2,5%. Ce résultat est considéré comme très encourageant et justifie que le projet soit poursuivi afin d'augmenter la performance du système, ce qui semble possible.

ÉTUDES DE STRUCTURES SUR DES MATÉRIAUX UTILISÉS POUR RÉALISER LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE SOUS FORME CHIMIQUE [6]

Un groupe de l'EPFZ spécialisé dans la détermination de structures fines des matériaux, y compris déposés en couches minces, collabore, dans le cadre du programme **Photochimie**, avec les laboratoires de notre pays impliqués dans l'étude de problèmes relatifs à l'énergie. Cette contribution est précieuse car les propriétés structurelles des matériaux utilisés dans les projets de recherche tels ceux qui sont décrits plus haut sont spécifiques des méthodes de préparation et influencent directement les résultats des expériences. Ce groupe a fourni des indications de première importance, notamment dans les travaux relatifs aux zéolithes, au TiO_2, au SnO_2, au platine déposé en couches minces, au Zn_3P_2 etc. Tous les groupes qui ont eu recours à cette expertise se sont déclarés très satisfaits de cette collaboration et en ont tiré des informations importantes pour la conduite de leur projet.

3. Collaboration internationale

La nature des projets du programme **Photochimie** est telle qu'ils s'inscrivent tous dans le cadre des préoccupations actuelles de la recherche internationale dans ce domaine de la chimie physique. En conséquence, ils ont fait pour la plupart l'objet de communications dans les congrès ou de publications dans des revues d'audience internationale. Plus spécifiquement, il convient de relever la collaboration entre l'Uni Genève et celle de Waterloo au Canada sur le sujet traité à Genève de la réduction électrochimique du CO_2. De plus G. Calzaferri de l'Uni Berne est l'organisateur de la *10th International Conference on Photochemical Transformation and Storage of Solar Energy*, qui se tiendra à Interlaken du 24 au 30 juillet 1994.

4. Transfert à la pratique

La recherche sur les photopiles au TiO_2 conduite à Lausanne ces cinq dernières années a abouti à la prise du relais par l'industrie afin d'assurer le développement industriel de cellules solaires de ce nouveau type (voir aussi les paragraphes 1 et 2 du présent rapport). La recherche sur la réduction électrochimique du CO_2 à Genève a conduit au dépôt d'une demande de brevet qui doit permettre d'attirer l'attention de partenaires industriels potentiels, en Suisse d'abord et à l'étranger le cas échéant, sans que la divulgation des méthodes et des résultats ne porte préjudice à l'intérêt industriel du procédé.

5. Perspectives 1994

L'effort dans le cadre du programme **Photochimie** se concentrera en 1994 sur la poursuite des recherches visant à trouver des solutions au problème du stockage sous forme chimique de l'énergie solaire. Dans la ligne de la réduction électrochimique du CO_2, on tendra à trouver les moyens de favoriser la production de composés de la plus haute valeur ajoutée possible (par exemple l'éthylène); on s'efforcera en outre d'attirer l'attention de partenaires industriels potentiels. La photolyse de l'eau pour produire de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire sera également un thème privilégié. Il convient de mettre en évidence les limites théoriques et expérimentales de la voie actuellement poursuivie et de concevoir des méthodes analogues mais potentiellement plus performantes afin de tracer une voie réaliste devant mener à une solution pratique de cet important problème.

6. Liste de projets

[1] M. Grätzel, EPF - *Lausanne*: ***Conversion d'énergie solaire en électricité par des piles photovoltaïques à base d'oxydes semi-conducteurs***. (RA)

[2] J. Augustynski, Uni - *Genève*: ***Réduction électrochimique du CO2***. (RA)

[3] H. von Känel, ETH - *Zürich*: ***Cellules solaires en couches minces***. (RA)

[4] G. Calzaferri, Uni - *Berne*: ***Réduction photoélectrochimique du CO2 et photolyse de l'eau pour réaliser le stockage de l'énergie solaire sous forme chimique***. (RA)

[5] J. Augustynski, Uni - Genève, & G. Calzaferri, Uni - *Berne*, & M. Grätzel, EPF -*Lausanne*: ***La photo-électrolyse de l'eau et production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire***. (RA)

[6] V. Shklover, EPF - *Zürich*: ***Études de structures sur des matériaux utilisés pour réaliser le stockage de l'énergie solaire sous forme chimique***. (RA)

B I O M A S S E

Rapport de synthèse 1993
sur les activités 1993 du programme de recherche

Chef de programme : Michel Roux (Martin Hinderling dès le 1er octobre 1993)

Récolte mécanisée du petit bois d'énergie

L'utilisation de telles méthodes permet non seulement une forte réduction des coûts, mais améliore la sécurité du travail sans pour autant provoquer de dégâts à la forêt (récolteuse pour des troncs d'un diamètre jusqu'à 35 cm, capacité: 10 à 15 m^3/h).

1. Objectifs du programme pour 1993

Le programme traite de l'aspect énergétique de la **biomasse** de sa création sous forme de plantation, de fumier ou de déchets organiques jusqu'à sa transformation en énergie utilisable.

Les buts visés en 1993 peuvent se résumer comme suit:

- Porter les chauffages à bois jusqu'au seuil de leur commercialisation.
- Amener au stade pilote la réduction de NO_x par les techniques *selective catalytic reduction (SCR)* et *selective non catalytic reduction* (SNCR) pour bois usagé, imprégné ou collé.
- Vérifier les progrès de la filière des gazogènes à bois sur des installations de démonstration.
- Appliquer les méthodes de récolte mécanique de biomasse et évaluer le potentiel énergétique des taillis.
- Tester les pilotes de digestion pour fumiers et déchets ménagers et les nouveaux types pour déchets industriels.
- Etoffer la variété des plantes énergétiques et choisir le type de leur conversion en énergie.

2. Travaux effectués et résultats obtenus

RÉCOLTE ET PRÉPARATION DE LA BIOMASSE

La **mise en valeur du bois énergie** [1] a analysé 12 chantiers de récolte mécanique et de déchiquetage. Les coûts varient selon le peuplement (diamètre 12-25 cm, 46-115 Fr/m^3 de bois) ou selon la taille de la déchiqueteuse (30-60 m^3/h, 5-12 Fr/m^3 de plaquettes). Ces machines ont souvent une capacité trop importante pour des bois de faible diamètre. Ce sont en fait l'organisation des chantiers ainsi que les frais fixes de machines (récolteuse: 500'000 Fr., déchiqueteuse: 300'000 à 1 million de francs) qui devront être optimisés.

Le **guide pratique OPair92** [2] a pour but de fournir au chef d'une entreprise traitant le bois l'interprétation en langue courante de la réglementation en vigueur. Celà concerne par exemple les types de bois, leur conditionnement, la conformité de leur combustion ou l'élimination de chutes éventuelles. Ce guide fait partie intégrante du cours PACER *"Energie aus Restholz"*.

Deux projets jumeaux traitent du potentiel énergétique, des techniques de récolte et du coût des **taillis sous futaie** (*Mittelwald*) [3] et **taillis** (*Niederwald*) [4]. Trois cantons (VD, GE, TI) totalisent 25'500 ha de taillis, dont 6% seulement sont exploités. Quatre exploitations de taillis sous futaie dans le Nord-Est de la Suisse ont produit 3 à 5 m^3/ha, soit extrapolé à l'ensemble du pays l'équivalent de 1.5 PJ.

CONVERSIONS THERMO-CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE

a) Combustion et gazéification du bois, de bois usagés et de vieux papiers

Les **6 petits chauffages de 10 à 30 kW et la chaudière de 30 kW à foyer horizontal à turbulateur CHIQUET** [5] permettent de brûler du hêtre avec des émissions ≤1000 mg CO/Nm^3 durant les 40 à 70 % d'une charge complète et ≤250 mg NO_x/ Nm^3 sur toute la durée de la combustion (OPair92: respectivement 4000 et 250). L'excédent d'air secondaire oscille entre 1.5 et 2 et le rendement autour de 90%. La chaudière présente des valeurs de CO un peu plus élevées; elle fait cependant l'objet d'un projet de réglage par sonde lambda [8] .

Des séries d'essais sur des **chauffages individuels à foyer horizontal** [6] d'environ 30 kW ont mesuré la puissance, les émissions de CO et l'excédent d'air selon le type de bois, sa quantité et le tirage. La recharge correcte du bois joue un rôle déterminant. L'adjonction d'un turbulateur ou d'un catalyseur risque d'étouffer le foyer.

Deux prototypes de **chauffages à bûches** TIBA identiques [7], de 12 kW, ont montré qu'il est possible de limiter les pointes de CO au-dessous de 4000 mg/Nm^3 (OPair92) par un allumage rapide, un réglage de l'air de combustion basé sur l'intuition de l'utilisateur, le ronronnement du fourneau ou une température de flamme ≥800°C. La recharge doit être proportionnée à la demande de chaleur et faite à temps. Le rayonnement des bancs en pierre olaire qui leur sont accouplés augmente le rendement de près de 20%.

Divers types de **réglage de chauffages à bûches** [8] ont été testés sur un modèle Keramat CHIQUET/SCHMID à puissance nominale (43 kW) et à charge partielle (15 kW). L'objectif était entre autres de limiter les émissions et les irrégularités de la combustion en régime stationnaire. Un niveau inférieur à 100 mg CO/Nm^3 a été obtenu. La puissance est ajustée par l'air primaire et la qualité de la combustion par l'action rapide d'une sonde lambda sur l'excédent d'air secondaire.

Sur les **chauffages hypocaustes individuels à bois** [9] le calcul de l'énergie apportée par l'air chaud circulant en circuit fermé dans les canaux de distribution (parois intérieures et sols) ne se satisfait plus d'une approche empirique. Le responsable coordonne actuellement ce projet avec d'autres recherches parallèles.

L'idée d'un **Centre d'essais et de développement pour chauffages à bois** [10] a été lancée en 1991. Avec une participation financière des fabricants, il s'agirait d'optimiser la géométrie des chambres de combustion, d'établir un service de mesures et développements pour les constructeurs de la branche et de proposer un concept de banc d'essai reconnu sur le plan national. Le procédé d'analyse développé à Langenbruck devrait servir de point de départ.

La production **d'air chaud par chauffage à copeaux de bois** [11] nécessite de développer un échangeur entre les gaz de fumée sortant du foyer à 1000°C et l'air pulsé . Le choix a porté sur un système contre-courant à tubes et flux croisé. La puissance de 60 kW a pu être obtenue à 100°C tout en rejetant les gaz de fumée à moins de 200°C et en maintenant les émissions de CO à la moitié de la limite fixée (1000 mg/Nm^3).

Le **pilote de chaudière de 120 kW à condensation des gaz de fumée** [12] a pu être mesuré malgré la mauvaise qualité de la combustion. Les émissions de CO, NO_x et poussières respectent l'OPair92. La condensation des gaz a contribué pour 17 et 24% respectivement à l'énergie produite au cours des hivers 1992/93 et 1993/94. La chaudière sera optimisée en 1994 et les gaz abaissé à <200°C. Celà garantira une part d'au moins 15% par condensation à l'énergie délivrée et supprimera l'encrassement du quench (lavage et échangeur à condensation). Une installation de 6 MW est en cours de planification.

Une 2ème installation expérimentale de **dénitrification des gaz de fumée par SNCR** [13] (réduction sélective non catalytique) a été mesurée sur une chaudière SCHMID munie d'un nouveau foyer à grille. Les premières mesures présentent une réduction de 80% du NO_x dans une fenêtre située entre 825 et 925°C et pour un temps de rétention de la solution d'ammoniac à 20% allant de 0.5 à 1.5 seconde. L'injection par buses coniques n'a pas posé de problèmes. Du bois de forêt ou usagé avec une humidité relative jusqu'à 80% a servi de combustible. Une installation pilote est en construction.

La réduction sélective catalytique **SCR *High Dust*** [14] avec catalyseur placé avant le filtre à poussières a été montée sur une dérivation des gaz de fumée provenant d'une chaudière à vapeur LANZ de 7 MW installée dans les ateliers principaux des CFF à Olten. La réduction du NO_x a atteint 93% avec du bois de palettes, un catalyseur porté à 245°C et une proportion stochiométrique de l'agent réducteur (urée). Le seul problème majeur a été l'encrassement du catalyseur par les cendres et les particules de bois.

L'énergie contenue dans les **déchets légèrement contaminés** [15] (palettes, caisses, bois de chantiers; papiers et cartons) représentent au plus 0.7% de la consommation finale suisse. L'étude répond aux questions: dans quelle mesure peut-on valoriser ces matériaux par combustion ou par recyclage, avec quelle taille d'installation

(papier: par exemple 2 x 2.5 MW) et avec quel bénéfice écologique. Un questionnaire adressé aux principaux acteurs de la branche papier est en cours d'évaluation.

Le **prototype de gazogène de 500 kW à cône réglable** [16], breveté et installé à Steinmaur, semble avoir produit pendant une semaine un gaz utilisable dans un moteur. Avec du bois de forêt ou contaminé, les émissions satisfaisaient presque l'OPair92. Une installation de démonstration est en cours de planification à Kestenholz (SO). La puissance sera portée à 1 MW_{th} (125 kW_e et 200 kW_{th} en couplage chaleur-force). Un revêtement céramique permet une gazéification à 1'800°C. L'objectif est un fonctionnement automatique en continu sur 6 mois.

Un nouveau créneau semble s'ouvrir au concept breveté ENSOFOR de **gazogène moyenne puissance** [17]: l'élimination avec production d'énergie à partir de déchets organiques provenant des industries agro-alimentaires et de la construction automobile. Un gazogène de 6 MW va être livré pour traiter en Italie 70'000 t/an de noyaux de pêches, un autre de 2.5 MW est à l'étude pour des noyaux d'olives. Le chercheur envisage la valorisation des matériaux d'isolation phonique et thermique des voitures vouées à la démolition ainsi que celle de pneus.

b) Déchets de l'agriculture et de l'élevage

Le **pilote de digestion de fumiers pailleux en canal** [19] de 29 m^3 (diamètre 2 m, 14 m de long) est rempli d'un mélange lisier-eau dans lequel transitent 11 paniers (diamètre 1.3 m, 1.1 m d'épaisseur) contenant le fumier à digérer. Des ouvertures aux extrémités permettent de plonger et retirer les paniers. Le scaling-up a réservé des surprises (flottage et blocage des paniers). La digestion à 36 et de 44 à 55°C produit 350 litres/kg pour un temps de rétention de 20 jours, comparable à celle d'autres types de digesteur. Les bilans énergétique et économique seront comparés à ceux de l'autre **pilote de 7 m^3 en continu pour fumier pailleux** [20] terminé.

Le **pilote de méthanisation en discontinu de fumier pailleux** [21] est suivi depuis un an. La production moyenne de biogaz de 70 m^3/jour, correspond au cheptel de l'exploitation et à son type de stabulation. Pour un temps de rétention de 45 jours, la production spécifique varie de 900 à 1'400 m^3/cuve selon que les 4 cuves de 30 m^3 chacune sont remplies de fumier seul ou mélangé jusqu'à 50% à des déchets de fruits et légumes. Des problèmes sont apparus au niveau du Totem après 2'500 h de fonctionnement, aux caillebotis de fond de cuve sous-dimensionnés et au colmatage de brides du circuit de purin.

Le **pilote de petit digesteur en bois, clé-en-main pour fumier liquide** [22] n'a pas trouvé d'acquéreur en 1993. Un agriculteur à Oberschan (SG) a cependant manifesté son intérêt à condition que l'installation s'intègre à son exploitation à moindres coûts. Le pilote a été redimensionné au standard de 60 unités de gros bétail (UGB): digesteur 70 m^3 (90'000 Fr.), intégration (≥12'000 Fr.), Totem SAURER 7 kW (30'000 Fr.). L'investissement spécifique de 1'700 Fr./UGB correspond aux objectifs fixés en 1991.

c) Déchets urbains

L'excellent fonctionnement du **pilote de méthanisation en discontinu** [21] avec des déchets ménagers a incité le propriétaire à mettre en place la collecte sélective des déchets dans les communes de la région.

L'**installation industrielle KOMPOGAS** [23] à Rümlang (ZH) est depuis peu commercialisée par Bühler AG. Elle rencontre encore quelques problèmes au niveau des traitements mécanique et biologique de ses eaux résiduelles. La présence de sable après la séparation liquide/solide bouche l'hydrolyse par filtre hybride de sorte que d'autres moyens doivent être évalués (filtre à bande, ultrafiltration, sédimentation, décanteur). Des tests chimique, physique, biologique et hygiénique de qualité ainsi que de mûrissement ont été conduits sur la fraction solide résultant de la digestion.

Un nouveau projet **pilote KOMPO-MOBIL** [24] vise à traiter le biogaz produit par le procédé Kompogas [23] pour alimenter les moteurs à essence de quatre camionnettes Ford de transport de personnes ou de livraison. Il comporte un compresseur de 250 bars, l'élimination du soufre par charbon actif, le lavage du CO_2, le séchage du méthane par tamis moléculaire (pureté 96%), un stockage stationnaire en 15 bouteilles et un réservoir de 50 l sur

le véhicule. La modification standard des moteurs s'effectue aux Pays-Bas; ils peuvent fonctionner indifféremment à l'essence ou au biogaz. Les mesures au banc montrent des émissions à l'échappement réduites d'un tiers.

Une étude accompagnée de tests préliminaires concerne la **co-digestion de déchets urbains avec les boues d'épuration** à la STEP de Frutigen (BE) [25]. L'intérêt réside dans un meilleur équilibre biologique du substrat à digérer avec pour corollaire une production spécifique accrue de biogaz.

La **récupération de chaleur à partir d'un compostage** [26] conclut que seule l'énergie soutirée de la halle fermée par l'air vicié pourrait être économiquement rentable pour autant qu'un preneur de chaleur se trouve à proximité.

d) Déchets organiques industriels

Le **digesteur à deux phases de déchets industriels solides** [27] fonctionne maintenant en automatique. Les essais "*on line*" portent sur la recirculation et le niveau du liquide dans le circuit hydrolyse/filtre de méthanisation, les mailles du tamis (0.5 à 4 mm) placées sur l'hydrolyseur à tambour, sa vitesse et période de rotation (4 tours/min pendant 5 min/h) et la température (35 à 55°C). Un certain nombre de problèmes mécaniques ont surgi: inétanchéité latérale du tambour (1.1 m^3, diamètre 1.4 m) et proportion trop importante de particules dans le liquide de percolation (conduites bloquées, perturbation du filtre anaérobie à basculement).

e) Plantes énergétiques

La **logistique** [28] analyse l'interaction entre récolte (jusqu'à 5 tonnes de matière sèche t MS/ha en exploitation extensive pour les herbes énergétiques), préparation et manutention (machines capables de simultanément récolter et densifier la biomasse en pellets ou briquettes jusqu'à >300 kg/m^3), transport et stockage (ballot de 1'250 litres; 500 kg). La préparation consomme moins de 5% du pouvoir calorifique des herbes.

Les **plantations de miscanthus** [29] se sont enrichies de trois nouveaux sites avec huit sortes et provenances différentes. L'objectif est de tester leur croissance, leur propagation et leur hauteur avec/sans engrais ou herbicides. Leur rendement atteint 18 t MS/ha et leur hauteur croît jusqu'au moment de leur récolte (octobre) à près de 4 m. Soumis au stress de froid, les miscanthus ne supportent cependant pas des températures au-dessous de 6°C.

Trois nouveaux sites (FR, BE, ZH) ont été plantés de **bois de champs** [30] (mélange équilibré d'arbres et de buissons sur terrain agricole). L'objectif est plutôt la qualité (protection, paysage, variété de la faune) que la quantité (engrais, rendement). Le projet n'a pas observé jusqu'ici de ratés ou de concurrence entre espèces. Une plantation demande entre 0.6 et 0.9 homme-heure/are selon la topographie du site.

Une recherche a évalué les **flux de matière et d'éléments nutritifs de plantes énergétiques** [31] de l'ensemencement jusqu'à la conversion en énergie utile dans une région type du Plateau. Elle les a comparés à ceux d'herbes, de bois de champs, de miscanthus et de forêts traditionnelles dans l'hypothèse où chacune de ces biomasses couvrait 5% des terres agricoles ouvertes.

La **combustion, la gazéification d'herbes ainsi que le couplage chaleur-force par moteur ou turbine à vapeur** [32] ont été étudiés et en partie testés sur des installations existantes. Dans le cas de la combustion, les niveaux d'émissions observés (NO_x: 500 mg/m^3, poussières: 1'500 mg/m^3) et surtout ceux des cendres devront être fortement abaissés. Selon les chercheurs aucun des gazogènes actuels ne peut traiter des herbes en satisfaisant aux conditions de fiabilité et de qualité de gaz (goudrons: jusqu'à 1'000 mg/m^3; requis pour alimentation moteur: 5 à 10 mg/m^3); le Danemark expérimente une gazéification par étage. Les divers couplages chaleur-force n'ont d'avenir qu'à partir de 10 MW_{th}. Seule donc la combustion d'herbes sera retenue pour le pilote en phase II.

La **digestion d'herbes énergétiques** [33] a déjà livré d'intéressantes comparaisons, que ces herbes viennent de pâturages gras ou pauvres, d'exploitations extensives, de 1ère ou 2ème coupes, de fourrages et de foin ou soient préparées en pellets, balles comprimées ou livrées en vrac. C'est ainsi qu'en 45 jours, l'herbe d'un pâturage gras produit 720 litres biogaz/kg MO (MO=matière organique) contre 570 par culture extensive. La production ne diffère pas entre une herbe fraîche, hâchée ou non, ou transformée en fourrage Une digestion à 34 ou 55°C n'influence la production de gaz que dans les 10 à 15 premiers jours.

Le **bilan écologique** [34] des matières a été évalué par trois méthodes et appliqué à des prairies peu intensives, artificielles, surfaces de compensation, joncs chinois et bois de champ. Le bilan englobe les besoins en énergie (7 à 14% de la production brute), émissions, engrais, semences (miscanthus), transport, préparation (pellet) et énergie grise (machines, silos). Les filières digestion avec couplage chaleur-force et combustion sont nettement moins polluantes que les procédés équivalents basés sur les agents fossiles.

Le **bilan économique** [35] de la combustion d'herbes, joncs chinois et bois de champ se base sur diverses hypothèses: herbes et bois plantés sur prairies naturelles, joncs sur terres ouvertes, pousses de jonc à 1'500 Fr./ha, pellet à 100 Fr./t, rendement de respectivement 6 (herbe), 10 (bois) et 18 (jonc) t MS/ha. La plantation revient pour les trois cultures à 2'000 Fr./ha. Par rapport au mazout (3.6 ct/kWh), le coût du combustible oscille, sans *(avec)* paiement direct, entre 8.5 *(4.1)* et 12.6 *(5.9)* ct/kWh, celui de l'énergie entre 13 *(8.5)* et 11 *(7)* ct/kWh. Le prix auquel il faudrait payer le combustible pour qu'il rapporte autant au paysan qu'une culture traditionnelle devrait être de 11.9 à 13.4 ct/kWh.

La **gestion du projet herbes énergétiques/bois de champ** [36] coordonne entre eux les objectifs, travaux et résultats des projets partiels, organise des visites d'installations et de cultures et maintient les contacts avec les autres recherches (Matières premières renouvelables, stations de recherches, IG BIO-ROHSTOFFE SCHWEIZ, HARVE sur le problème des cendres et relations publiques lors de foires et expositions).

SYSTÈMES

La **conversion de biomasses en méthanol (BIOMETH)** [37] a surtout porté sur la technique. Trois types de gazogène à pression atmosphérique ont été retenus: lit fluidisé tourbillonnant (LURGI), TPS (Studsvik) et BCL (BATTELLE). LURGI et TECOVA vont offrir un procédé combiné de référence supprimant l'étape intermédiaire de CO_2. Pour 27.2 millions de francs, BIOMETH produirait 675 kg méthanol/h (4 $MW_{équ}$) et 10.9 MW_{th} ainsi que du courant grâce à la turbine prévue sur le site retenu d'Attisholz. Le bois sèché à 10% d'humidité consommera jusqu'à 4 MW. Des contacts ont été noués avec les transports publics à Baden et Bâle-Ville (bus à méthanol) ainsi qu'avec les distributeurs de carburants pour évaluer le marché d'un méthanol à 500 Fr./t.

RECHERCHES DE SOUTIEN

Un amendement remplaçant la tourbe doit contenir des fibres de bois. Le projet de **défibrillation du bois par traitement biologique** [38] a sélectionné 7 souches de champignons sur les 114 retenues. Il a mesuré leur vitesse d'invasion et la perte de résistance du bois attaqué sur des blocs de 85 cm^3. La cohésion cellulaire est réduite en moins de 6 semaines à 35% de sa valeur initiale à des températures de 15 à 30°C et pour une humidité relative entre 75 et 100%. Le bilan énergétique par rapport à une défibrillation mécanique sera évalué.

Le **pouvoir d'infection de germes pathogènes** [39] a été mesuré en laboratoire et sur l'installation Kompogas [23] avec des virus en suspension, adsorbés ou placés en capsule. Un effet de synergie de la température, de gaz perméables et de divers facteurs d'inactivation a pu être démontré. Cinq virus étudiés perdent leur pouvoir d'infection en moins d'une demi-heure. Le parvovirus résiste pendant 27 h à 50°C et 11 h à 60°C. Il peut donc servir d'indicateur pour apprécier la qualité hygiénique d'un amendement.

3. Collaboration nationale et internationale

La collaboration s'est étendue à pratiquement toutes les stations de recherches agricoles, à des services forestiers et instituts des EPF, au BUWAL, AG NACHWACHSENDE ROHSTOFFE, IG BIO-ROHSTOFFE Schweiz et ASSOCIATION SUISSE DE L'ÉNERGIE DU BOIS. Les fabricants TIBA, SCHMID, MÜLLER, PETRY, HÄFLIGER, HEGNER ET SAURER ont mis à disposition des installations ou des prototypes. Voiries, maraîchers, horticulteurs et même MIGROS (VD) ont livré leurs déchets organiques à des projets de digestion.

Les délégués suisses aux activités combustion, gazéification et digestion du programme *BIOENERGY* de l'AIE ont fait profiter les intéressés des récents développements réalisés à l'étranger. Selon les projets, une collaboration a été établie avec les universités techniques de Graz, Wien et München, la station de Wieselburg (D), le bureau KOCH (Dk), l'Institut indien des sciences ou divers laboratoires en Europe et aux USA.

4. Transfert à la pratique et projets P + D

Outre les publications, de nombreux exposés ont été présentés lors de conférences, visites d'installations ou de foires agricoles. L'importante participation matérielle des fabricants a eu souvent des retombées immédiates sous forme de démonstrations de taille semi-industrielle ou même de petites séries.

Un réglage par **sonde lambda** diminue aux normes souhaitées les émissions dans les chauffages à bûches. L'augmentation de rendement par **condensation des fumées** et la production d'**air chaud** avec rejets à faible température vont être appliquées sur des pilotes. Les **gazogènes** sautent les étapes et visent des puissances de l'ordre de quelques MW. Les techniques **SCR** et **SNCR** (*selective (non) catalytic reduction*) ont prouvé leur possibilité de réduire de façon suffisante les NO_x provenant de bois usagés. La digestion de fumier solide **en canal** et de déchets urbains **en discontinu** ont atteint, voire dépassé le stade pilote. Le traitement des ordures triées par le système **Kompogas** a déjà fait l'objet d'une 2ème installation.

5. Evaluation 1993 et perspectives 1994

Avec 39 projets, dont 2 NEFF, le volume du programme **Biomasse** est resté stable; en revanche les projets P+D passent de 4 à 11. Les prévisions formulées en 1992 se sont réalisées à quelques exceptions près. Deux projets ont dû être arrêtés pour non conformité. Des mandataires buttent quelquefois sur la réalisation mécanique de leur installation. La coordination est excellente tant au niveau des chercheurs et avec ENERGIE 2000, DIANE et PACER qu'entre les firmes et bureaux.

En plus des recherches visant à diminuer les prix, le domaine du **bois énergie** devra en 1994 passer à des chantiers pilotes. Les **gazogènes** devront prouver leurs capacités au niveau de la démonstration. Une installation complète de **digestion** revient semble-t-il plus chère que prévu; la recherche devra donc s'orienter vers des solutions plus simples et adaptées à la fabrication en série. Le défi majeur du multi-projet **Herbes énergétiques/ Bois de champ** sera la construction d'une chaudière pilote répondant aux contraintes de l'environnement.

6. Liste des projets

[1] Ph. Steinmann, XYLON, *Plan-les-Ouates*, ***Mise en valeur du bois énergie***. (RA)

[2] Ph. Steinmann, XYLON, *Plan-les-Ouates*, ***Guide pratique OPair92***. (RA)

[3] B. Bally, AMBIO, *Zürich*, ***Auswertung der Mittelwald-Nutzung aus der Sicht der Energieholz produktion***. (RA)

[4] F. Schnider, AMBIO, *Zürich*, ***Untersuchung über die nachhaltig nutzbare Energieholzmenge, Bewirtschaftungs - und Erntemethoden in Niederwäldern***. (RA)

[5] A. Jenni, IEU, *Liestal*, ***Schadstoffarme, holzbeschickte Kleinfeuerungen***. (RF)

[6] Ch. Gaegauf & M. Scheuble, ÖKOZENTRUM, *Langenbruck*, ***Analyse und Optimierung der Holz-Durchbrandfeuerung***. (RA)

[7] P. Schweizer, PASOL, *Liestal*, ***Wirkungsgrad- und Emissionsverhalten verschiedener Stückholzheizsysteme***. (RF)

[8] Th. Nussbaumer & J. Good, VERENUM, *Zürich*, ***Regelung einer Stückholzfeuerung***. (RA)

[9] P. Siegl & K. Imbach, AG HYPOKAUSTEN-HEIZUNGEN, *Weesen*, ***Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen.*** (RA)

[10] Ch. Gaegauf & B. Salerno, ÖKOZENTRUM, *Langenbruck*, ***Versuchs- und Entwicklungsstätte für Holzenergie.*** (RF)

[11] H. P. Schaffner, SCHMID, *Eschlikon*, ***Warmluftofen mit automatischer Schnitzelfeuerung.*** (RA)

[12] M. Wiget, IEU, *Liestal*, Th. Nussbaumer, VERENUM, *Zürich* & F.Steiger, STEIGER, UMWELTTECHNIK, *Liestal*, ***Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen.*** (RA)

[13] R. Bühler, BUHLER, IEU, VERENUM, *Maschwanden*, ***Altholzfeuerung mit Entstickung.*** (RA)

[14] H. Pauli & F. Kühnis, EICHER & PAULI, *Liestal*, ***Entstickung Holzfeuerung HW Olten.*** (RF)

[15] W. Vock, ABFALL & RECYCLING, *Liestal*, ***Energetische Verwertung von Biomasse aus leichtbelasteten Abfällen.*** (RF)

[16] P. Juch & A. Fürst, HTV, *Gunzgen*, ***Der Juch-Vergaser, die praktische Anwendung der Holzvergasung***

[17] L. Jaccard, ENSOFOR, *Curio*, ***Gazogènes à bois, extension.***

[18] H. Sharan, DASAG, *Seuzach*, ***Testuntersuchungen an einem Holzvergaser des IISc.*** (RA)

[19] U. Baserga, INFOENERGIE, FA-*Tänikon*, ***Semikontinuierliche Vergärung von strohhaltigem Mist.***(RA)

[20] K. Egger & U. Baserga, INFOENERGIE, FA-*Tänikon*, ***Semikontinuierliche Vergärung von strohhaltigem Mist.*** (RF)

[21] Y. Membrez, EREP, *Aclens*, ***Système modulaire de méthanisation en discontinu / Méthanisation en discontinu de déchets ménagers.*** (RA)

[22] K. Egger, INFOENERGIE, FA-*Tänikon*, ***Kleine, schlüsselfertige Biogasanlage, Phase II.*** (RA)

[23] H. Engeli, ENGELI ENGINEERING, *Bülach*, ***Kompogas-Prozess.*** (RA)

[24] K. Egger, INFOENERGIE, FA-*Tänikon*, ***Kompo-Mobil.*** (RA)

[25] W. Edelmann, ARBI, *Maschwanden*, ***Untersuchungen zur Vergärung von festen, biogenen Abfällen in den Faultürmen von kommunalen Kläranlagen.*** (RA)

[26] W. Edelmann, ARBI, *Maschwanden*, ***Wärmerückgewinnung aus der Kompostierung.*** (RF)

[27] M. Gradenecker & W. Edelmann, ARBI, *Maschwanden*, ***Zweistufige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen, Phase III.*** (RA)

[28] J.-L. Hersener, FA-*Tänikon*, ***Energiegras/Feldholz: Logistik.*** (RA)

[29] V. Mediavilla, J. Lehmann & E. Meister, FA-*Reckenholz*, ***Energiegras/Feldholz: Energiegras.*** (RA)

[30] J. Rüegg, FA-*Wädenswil*, ***Energiegras/Feldholz: Feldholz.*** (RA)

[31] P. Baccini, D. Müller, W. Obrist & D. Oehler, EAWAG-*Dübendorf*, ***Energiegras/Feldholz: Regionale Bewirtschaftung von Energiegras und Feldholz.*** (RA)

[32] Th. Nussbaumer, ETH-*Zürich*, ***Energiegras/Feldholz: Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz.*** (RA)

[33] U. Baserga, INFOENERGIE, FA-*Tänikon*, ***Energiegras/Feldholz: Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung.*** (RA)

[34] B. Jans, CARBOTECH, *Zürich*, ***Energiegras/Feldholz: Ökobilanz.*** (RA)

[35] K. Laville-Studer, FA-*Tänikon*, ***Energiegras/Feldholz: Ökonomie.*** (RA)

[36] J.-L. Hersener, FA-*Tänikon*, ***Energiegras/Feldholz: Projektmanagement.*** (RA)

[37] S. Stucki & J. Leuenberger, PSI, *Villigen*, ***Methanol aus Biomasse (BIOMETH).*** (RA)

[38] M. Aragno, Uni-*Neuchâtel*, ***Optimisation énergétique de la défibrillation du bois par un traitement biologique, en vue de la production d'amendements.*** (RA)

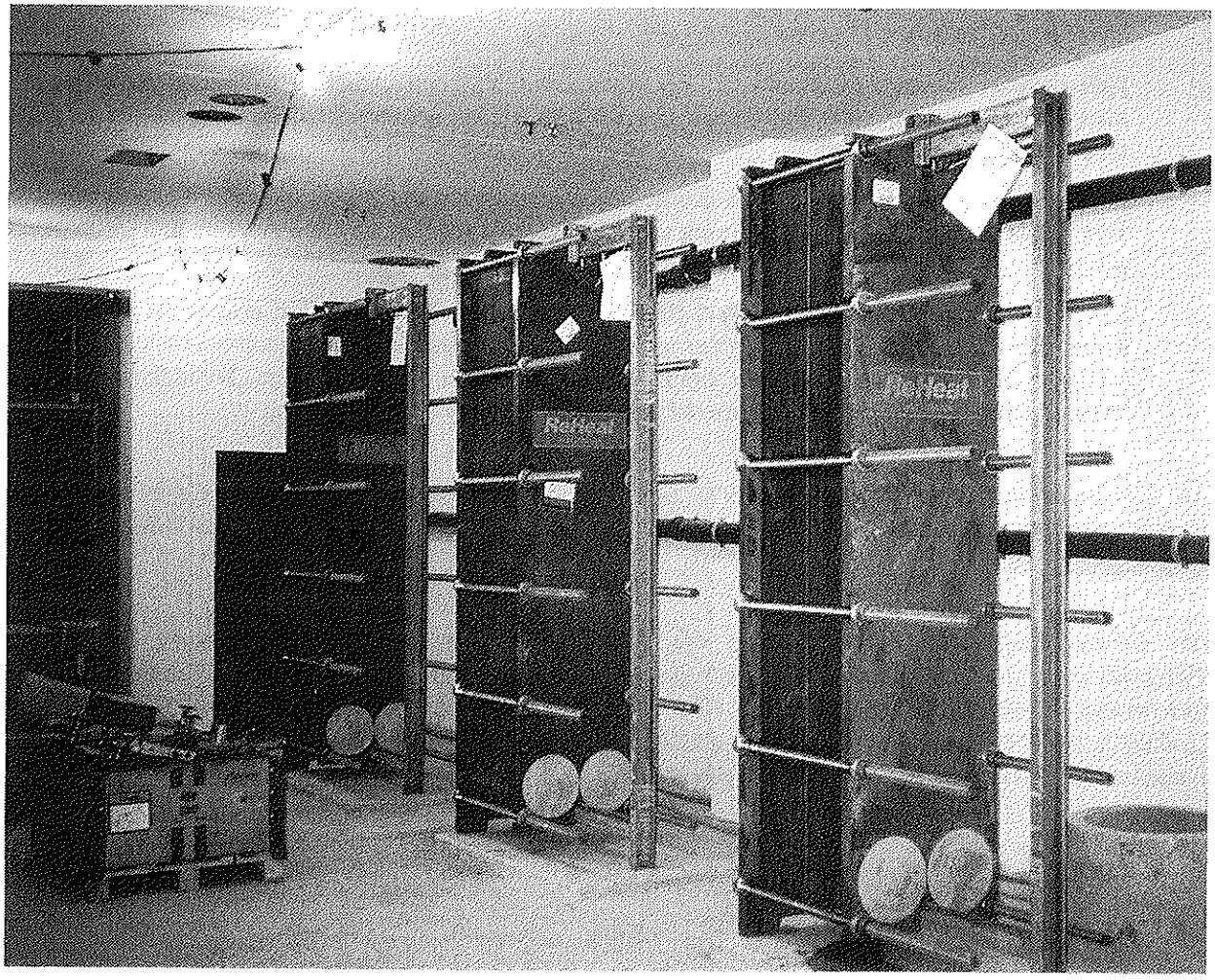
[39] A. Metzler & F. Pesaro, AG für UMWELTHYGIENE, VET.-MEDIZ./ Uni-*Zürich*, ***Human-, tier- und pflanzenpathogene Keime in der Feststoffvergärung.*** (RF)

(RA) Rapport annuel 1993 disponible
(RF) Rapport final disponible

GEOTHERMIE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Harald L. Gorhan



Primär-Wärmetauscher

Die Wärmenutzung von stark mineralisierten Wässern aus grossen Fördertiefen bedingt den Einsatz von Wärmetauschern aus Titan (Wärmeverbund Riehen).

1. Programmübersicht und Schwerpunkte

Die Durchführung des Forschungsprogrammes **Geothermie** wurde ab Mitte 1993 in Angriff genommen. Eine Umfrage betreffend Interesse an geothermischen Projekten hat Ende März dieses Jahres bei sämtlichen Schweizer Hochschulen sowie in der Privatwirtschaft ein breites Echo gefunden. Die eingereichten Forschungsprojekte decken ein weites Feld der im folgenden detaillierten Erdwärme-Nutzungsmethoden ab. Offensichtlich ist demnach ein beträchtliches Forschungsbedürfnis in der Schweiz vorhanden. Dies nicht nur an ausgewiesenen Hochschulinstituten wie in Lausanne, Neuchâtel, Basel, Bern und Zürich sondern auch bei der Privatwirtschaft.

Das Forschungsprogramm **Geothermie** soll im Prinzip die folgenden Technologien der geothermischen Nutzung unterstützen:

Untiefe Geothermie: Erdwärmesonden (EWS) und Erdwärme-Sondenfelder. Als "untief" ist hierbei ein Tiefenbereich zwischen 15 m und ca. 150 m zu verstehen.

Tiefe Erdwärmesonden: Tiefen von ca. 500 m und mehr. Von beträchtlichem wirtschaftlichem Interesse wäre hier die nachträgliche Installation von EWS in bereits bestehende Tiefbohrungen, die zu einem anderen Zweck gebohrt wurden

Direkte Nutzung von warmen Tiefenwässern: Tiefenbereich zwischen 500 m und ca. 3000 m. Im weiteren Sinn würde dazu auch die Wärmenutzung von Alpentunnels gehören, nämlich von Luft und Infiltrationswässern.

***Hot Dry Rock (HDR)* und *Hot Wet Rock (HWR)*-Technologien:** Tiefenbereichen grösser als 3000 m. Aus Kostengründen ist hier die Forschung nur im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit möglich. Als einzige von den bereits erwähnten Erdwärme-Nutzungsmethoden käme diese Technologie auch für Stromproduktion in Frage, weil Energie auf entsprechend hohem Niveau anfällt.

Als Schwerpunkte wurden für das Jahr 1993 eine praxisorientierte Forschung auf dem Gebiet der **untiefen Geothermie**, sowie eine verstärkte internationale Zusammenarbeit im Rahmen der **HDR und HWR-Energienutzung** gesetzt.

Das weitere Vorgehen bei der Förderung von Forschungsvorhaben bezüglich der Nutzung von warmen Tiefenwässern muss vorerst mit der Eidgenössischen Kommission für Geothermie und unterirdische Wärmespeicherung (KGS) abgesprochen werden. Dies unter Berücksichtigung der Risikodeckung des Bundes für geothermische Tiefbohrungen und im Lichte der doch etwas dürftigen Ergebnisse der in letzter Zeit abgeteuften Förderbohrungen (z. B. Genf, Weissbad, St. Moritz).

2. Anvisierte Zielpunkte für 1993

Als erklärtes Ziel der Forschung **Geothermie** gilt es die Wirtschaftlichkeit und Effizienz von EWS-Anlagen zu verbessern, bzw. hochqualifizierte Beiträge bei der Durchführung von internationalen HDR- und HWR-Projekten zu erstellen.

Zentrale Themen bei der direkten Nutzung von warmen Tiefenwässern stellen die Verringerung der Bohrkosten bzw. ganz generell das Vermeiden von "trockenen" Bohrungen dar.

3. 1993 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Ab Mitte 1993 wurden im ganzen sieben Forschungsprojekte [1-7] vom Förderprogramm in das eigentliche Forschungsprogramm Geothermie übernommen bzw. drei Studien neu in Auftrag gegeben. [9-11]. Des weiteren wurde die Förderung eines internationalen Forschungsprojektes [12] an das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft übergeben. Es handelt sich dabei um die Fortsetzung einer ersten, vom Nationalen Energie-Forschungsfonds finanzierten Untersuchungsphase (NEFF-Projekt 359), die sich mit der Verbesserung von Langzeit-Prognosen im Verhalten eines HDR- Systems befasste. Zu diesem Zwecke wurde ein dreidimensionales Finite Element Modell mit dem Titel "*FRACTure*" entwickelt um hydraulisch-thermische und elastische Koppelungen in einem *Hot Dry Rock- Reservoir* zu simulieren.

Da die Studien betreffend der Wärmenutzung mittels **EWS-Anlagen** [9-11] erst kürzlich angelaufen sind, ist mit ersten Ergebnissen ab Ende 1994 zu rechnen.

Das Projekt ***Chemie et microbiologie dans le domaine du stockage de l' énergie en nappe aquifère*** [2] hat zum Ziel die chemischen und mikrobakteriellen Einflüsse hinsichtlich Kolmatierung und Korrosionseffekte beim Betrieb einer unterirdischen Wärmespeicherung zu untersuchen. Als "Versuchsobjekt" dient dabei die bereits seit 1982 im Betrieb befindliche Pilot-Anlage SPEOS in Dorigny, in der Nähe von Lausanne.

Die Forschungsstudien betreffend Nutzung von **warmen Tiefenwässern** [1, 4, 6, 8 und 9] haben wertvolle Ergebnisse erbracht, und zwar in Hinsicht auf

- die Bestimmung des geothermischen Wärmepotentiales des Kantons Wallis. Des weiteren bilden diese Daten eine wichtige Grundlage zur Auswahl und Bewertung der Bohrstandorte in Saillon, Sion bzw. St-Maurice zwecks Abteufung einer geplanten Tiefbohrung. Letztere mit finanzieller Unterstützung und Absicherung durch eine Risikodeckung des Bundes.
- die Beschaffung von notwendigen Beurteilungsgrundlagen bei der geothermischen Wärmenutzung von mehreren Anlagen aus demselben, tiefliegenden Aquifer. Die für eine optimale thermische Bewirtschaftung unumgängliche Modellierung von gekoppelten thermisch-hydraulischen Vorgängen lassen sich nur mit semianalytischen oder - in den angestrebten drei Dimensionen - mit numerischen Methoden vornehmen. Zu letzterem Zwecke wurde das in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie entwickelte und bereits erwähnte *Finite-Element-Software*-packet *FRACTure* erfolgreich angewendet.
- die Erstellung einer nunmehr nötigen geothermischen Datenbank mit wichtigen Angaben aus total ca. 450 Berichten sowie von Konferenzen.
- die mögliche Nutzung von warmen Gebirgswässern aus den beiden Alpentransit Tunnels [8-9], zur Beheizung von Siedlungen in der Nähe von den geplanten (NEAT) Tunnelportalen (d. i. Altdorf und Biasca bzw. Visp, Brig und Naters). Wie die beiden Studien zeigen, lassen sich theoretisch auf Grund der vorhandenen Temperaturen und des zu erwartenden Gebirgswasserandranges, die folgenden geothermischen Wärmepotentiale ableiten:

	min (MWth)	max (MWth)
GOTTHARD:	**47**	**145**
LÖTSCHBERG:	**43**	**79**

Eine derartige Nutzung warmer Tunnelwässer demonstriert im Kleinen bereits die Gomser Gemeinde Oberwald (VS): warmes Wasser aus dem Furka-Tunnel heizt mittels eines "kalten" Fernwärmenetzes und dezentralen Wärmepumpen 60 Wohnungen; reichen würde das Potential sogar für 800 Wohnungen!

4. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das erklärte Ziel des Forschungsprogrammes **Geothermie** ist, mittels gezielter Massnahmen die Wirtschaftlichkeit und Effizienz von EWS-Anlagen zu erhöhen. Dies bedingt einen engen Zusammenschluss von Theorie und Praxis. Tatsächlich hat sich in der Schweiz bereits vielfach eine Kooperation sowohl zwischen privaten Energieberatungs- und Geologiebureaus, als auch HTL-Instituten einerseits mit Bohrfirmen andererseits eingespielt, die sich auf die Erstellung von EWS-Anlagen spezialisiert haben. Dies bei der Auslegung und Projekterstellung sowie der Durchführung von diversen Messprogrammen. Letztere in Hinsicht auf die Sammlung von praktischen Erfahrungen als auch für die Qualitätskontrolle.

An dieser Stelle ist auch auf die erfolgreiche Tätigkeit der **Schweizerischen Vereinigung für Geothermie** hinzuweisen. Die SVG hat gegenwärtig über 300 Mitglieder, gibt regelmässig ein gut redigiertes Informationsbulletin heraus und führt jährlich vielbesuchte technische Tagungen durch. Bei dieser Gelegenheit lädt diese Gesellschaft sehr häufig auch ausländische Referenten ein, womit der Anschluss an internationales Know-how gewährleistet werden soll.

Beispiele einer internationalen Zusammenarbeit sind durch die beiden Studien [2] und [12] gegeben. Erstere erfolgte im Rahmen der IEA, das andere Projekt wird im Zug des nichtnuklearen Energieforschungsprogrammes JOULE II der EU abgewickelt. Das bereits erwähnte, in der Schweiz unter dem NEFF-Projekt 359 entwickelte Rechenmodell *FRACTure*, soll bei der Selektion des am besten geeigneten Standortes für ein europäisches HDR-Pilotprojekt zum Einsatz gelangen.

Des weiteren sei an dieser Stelle erwähnt, dass ein Mitarbeiter des Institutes für Geophysik der ETH-Zürich beim letzten HDR-Forum in Yamagata / Japan einschlägige Erfahrungen sammeln konnte. Anlässlich einer ETHZ-Vortragsreihe wurde über die recht erfolgversprechenden HDR-Untersuchungsergebnisse bereits Bericht erstattet.

5. Transfer in die Praxis

Ergebnisse aus der angewandten Forschung werden speziell bei der Dimensionierung von EWS-Anlagen und bei der Planung von EWS-Feldern berücksichtigt. Dies betrifft sowohl die Sondengeometrie (geeignete Sondenabstände und Sondentiefen) und den Sondentyp als auch die Optimierung der Gesamtanlage zwecks Wärme- oder auch Kälteproduktion für Klimatisierungen. Des weiteren sind Anregungen für die Verwendung von **tieferen aber immer noch preisgünstigen EWS** (Reduktion der Bohrkosten durch Verringerung der Bohrdurchmesser) von der Praxis bereits aufgenommen worden. Theoretisch gilt nämlich die Regel, je tiefer eine EWS installiert wird, desto belastbarer wird sie für die gleiche Quellentemperatur. Je grösser auch das zu beheizende Objekt, desto mehr kann man in die Nutzung der Quelle investieren. Diese Überlegungen führten im übrigen zur Installation einer **"übertiefen"** EWS (bis in eine Tiefe von 2304 m) in Weggis, die zum weitaus grössten Teil von einem Privatinvestor finanziert wurde. Das Messprogramm ist zur Zeit noch im Gange und wird Erkenntnisse für die Wärmenutzung von vorhandenen Tiefbohrungen liefern, die bereits für einen anderen Zweck erstellt wurden und heute nicht mehr gebraucht werden.

Was den praktischen *spin-off* der HDR-Forschung in der Schweiz betrifft, so ist hervorzuheben, dass das Programm *FRACTure* für Planung und Auswertung von NAGRA-Experimenten im Felslabor Grimsel seit 1992 erfolgreich eingesetzt wird. Spezifische Anwendungen im Zusammenhang mit Druckstollenprojekten in komplexer Topographie stellen einen weiteren Anwendungsbereich dar, speziell zur Berechnung von Wasserverlusten. Zusammen mit der Auswertung von diversen Feldversuchen können durch die mechanisch-hydraulischen Kopplunsmöglichkeiten des *FRACTure* Programms wichtige Auskünfte erhalten werden. Zusammenfassend hat das Programmpacket *FRACTure* seinen Nutzen als allgemeines Rechenwerkzeug schon für viele erdwissenschaftliche Projekte weit ausserhalb der HDR-Forschung gezeigt. Dies wird auch auf Grund des zunehmenden

Interesses von in- und ausländischen Forschungsinstitutionen bezeugt. Leicht vereinfachte Software-Versionen wurden bereits an den Universitäten Bern und Kiel installiert.

An Öffentlichkeitsarbeiten sind diverse Vorträge betreffend der HDR-Technologie an der ETH-Zürich bzw. der generellen geothermischen Nutzung erwähnenswert (zum Beispiel in St. Gallen und Verbier). Des weiteren vermittelt eine jüngst erfolgte Veröffentlichung mit dem Titel *"Valorisation de la chaleur terrestre en Suisse"* (*Réseaux et Chaleur* no. 17) einen guten Überblick über die Entwicklung geothermischer Ressourcen sowie über entsprechende Perspektiven in der Schweiz.

6. P + D - Projekte

UNTIEFE GEOTHERMIE

Thermoprogramm Erdsonden. Auf dem Areal der HTL-Burgdorf wurden 13 EWS von 100-200 m Tiefe niedergebracht, deren Wärmeleistung über einige Jahre vermessen werden soll. Diese Messkampagne soll Resultate über das Langzeitverhalten sowie über Vor- und Nachteile von verschiedenen EWS-Typen (geschlossene und offene Systeme) liefern. Diesbezügliche Ergebnisse wurden bereits in der TECHPRESS (Nr. 2/ 93), dem Fachorgan der Ingenieurschule Burgdorf, veröffentlicht.

Energiepfähle: Messungen in Kreuzlingen (Photocalor). Auf Grund der schlechten Fundationsverhältnisse wurden insgesamt 98 Pfähle à 12 m Länge in den Boden gerammt, die bereits werkseitig zusätzlich mit Wärmetauscherrohren ausgestattet worden waren. Die Photocalor benötigt insgesamt ca. 465'000 kWh Heizenergie, davon sollten die Energiepfähle rund 220'000 kWh liefern. Die jährliche Kühlenergie wurde auf 120'000 kWh geschätzt. Es gilt, verschiedene Betriebszustände zu berücksichtigen, um den anfallenden Energiebedarf sowohl für die Beheizung als auch für die Kühlung zu decken. Entsprechend intensive Überwachungsmessungen dieser Anlage sind noch im Gange. Dabei gilt es nachzuprüfen, ob gegenüber herkömmlichen Sondeninstallationen wesentliche Kosteneinsparungen möglich wären und wie wirtschaftlich interessant überhaupt das Anwedungspotential für Energiepfähle in der Schweiz ist.

Geothermische Wärmenutzung durch das Bade- und Kurzentrum in Scuol mittels Erdwärmesonden. Die Wärmeerzeugung erfolgt mittels 38 EWS à 150 m Tiefe unter Verwendung von 5 Wärmepumpen. Mit dieser Anlage soll eine thermische Leistung von 200 kW erreicht werden. Nebst einer bemerkenswert starken Reduzierung des Strombedarfes trägt diese Anlage auch der Luftreinhalteforderung Rechnung. Sie dient somit als Referenz für zukünftige Wärmenutzungen ähnlichen Types.

TIEFE ERDWÄRMESONDEN

Geothermiebohrung in Weggis. Zur Erstellung einer "übertiefen" EWS wurde eine Bohrung bis 2304 m abgeteuft. Die dazugehörige Oberflächenanlage soll nun messtechnisch möglichst intensiv überwacht werden um Erfahrungen für zukünftige Anlagen zu erhalten (siehe Kapitel 5).

NUTZUNG VON WARMEN TIEFENWÄSSERN

L' évaluation du potentiel géothermique des nouveaux tunnels alpins (Alp-Transit). Étude préliminaire (phase I). Mit dieser Studie wurden das ungefähre geothermische Potential , der Heizbedarf von Siedlungen in der Nähe der Tunnelportale, sowie die nötigen Nutzungstechnologien identifiziert und deren Kosten abgeschätzt.

Geothermische Wärmenutzung für Fernwärmeversorgung. In Riehen wurde die erste Geothermie-Pilotanlage in der Schweiz für die Beheizung und Brauchwasserwärmung von Gebäuden erstellt. Die maximale Heizlast beträgt 15 MW. Fast die Hälfte des Wärmebedarfs wird über die Nutzung von warme Tiefenwässer abgedeckt. Dies entspricht einer Heizöleinsparung von 1750 t pro Jahr.

7. Bewertung 1993 & Ausblick für 1994

Die geothermische Forschung in der Schweiz konnte 1993 - nicht zuletzt durch die Institutionalisierung der Projektleitung für geothermische Forschungsaktivitäten - wesentlich gestrafft werden. Dies wurde vor allem durch die Konzentration auf wenige, aussichtsreiche Schwerpunktsgebiete erreicht. In diesem Sinne hat die Eidgenössische Energie-Forschungskommission CORE das Konzept des Forschungsprogrammes **Geothermie** für die Jahre 1993 - 1995 begutachtet und gutgeheissen.

Im Jahre 1994 sollen die Schwerpunkte auf das Gebiet der **"untiefen" Geothermie** bzw. auf eine **internationale Zusammenarbeit im Rahmen der HDR und HWR-Energienutzung** konzentriert werde. Unter anderem wird an der Wärmepumpen-Testanlage in Winterthur/ Töss ein EWS-Forschungsprogramm unter dem Titel **Experimente zur Untersuchung von Hinterfüllungen für EWS** in Angriff genommen (NEFF-Projekt Nr. 627). Des weiteren besteht die Möglichkeit einer schweizerischen Beteiligung an einem EU-Projekt im Rahmen von JOULE II (*Atlas of Geothermal Resources*). Ebenfalls 1994 wird die schon erwähnte Beteiligung der Schweiz am europäischen HDR-Pilotprojekt zum Tragen kommen .

Bezüglich **warmer Tiefenwässer** werden 1994 in erster Linie Forschungsprojekte zur Wärmenutzung von Alpentunnels im Vordergrund stehen.

Ferner gilt es anzustreben, dass die Aufwendungen des Bundes für die Geothermieforschung künftig von forschungsfremden Elementen, wie zum Beispiel die Übernahme von Kosten für die Beurteilung von Risikodeckungs-Gesuchen etc., befreit werden.

8. Liste der Projekte

[1] B. MATTHEY, *Montezillon*: ***Projet GEOTHERMOVAL.*** (JB)

[2] F. MISEREZ, *La Chaux de Fonds*: ***Chimie et microbiologie dans le domaine du stockage de l' énergie en nappe aquifère.*** (SB)

[3] B. MATTHEY, *Montezillon*: ***Documentation SIA D025 - Base de Dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température.*** (JB)

[4] L. Rybach, ETH - *Zürich*: ***Aquifer-Bewirtschaftung für geothermische Wärmenutzung.*** (JB)

[5] A. Fehr, BEW, *Bern*: ***Geologische Bearbeitung von Verträgen und Verfügungen.*** (JB)

[6] A. Fehr, BEW, *Bern*: ***Erstellung einer Datenbank für Geothermie und unterirdische Speicherung.*** (JB)

[7] D. ROUX, *Pressinge*: ***Projet ALP TRANSIT. Etude techno-économique préliminaire. Utilisation de l'eau chaude à la sortie des tunnels.*** (SB)

[8] BEM. ZSCHOKKE, *Lausanne*, & Geophys.Inst / ETH - *Zürich*: ***Utilisation du potentiel géothermique des tunnels de base du Gothard et du Lötschberg du projet ALPTRANSIT. Etude préliminaire.*** (SB)

[9] B. MATTHEY, *Montezillon*: ***Recherche des paramètres d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre verticales.*** (JB)

[10] Ch. Rieben, MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE, *Bienne*: ***Etude pilote. Prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le Jura Central (cantons de Berne et du Jura).***

[11] A. Parriaux, GEOLEP / EPF - *Lausanne*: ***Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques.***

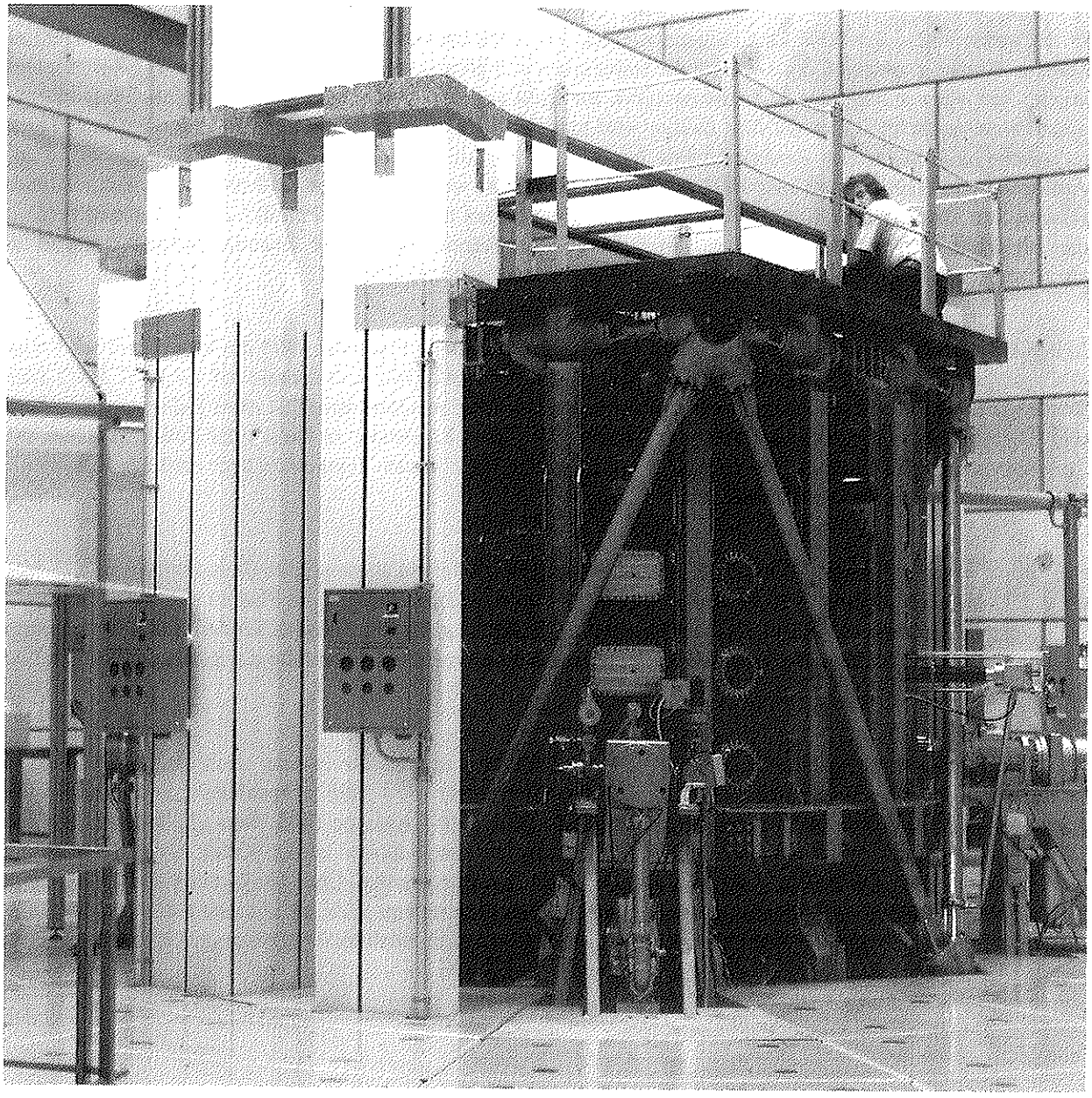
[12] R. Hopkirk, POLYDYNAMICS, *Zürich*: ***Hot Dry Rock Geothermie-Modellierung und Feldversuche im Rahmen des EG-Programmes Joule II.***

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden / (SB) Schlussbericht vorhanden

KONTROLLIERTE KERNFUSION

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Paul-E. Zinsli



Tokamak TCV

Der *Tokamak à Configuration Variable* des CRPP (*Centre de recherche en physique des plasmas)* an der ETH-Lausanne nahm 1993 den Experimentierbetrieb auf.

1. Übersicht und Schwerpunkte

Die **Fusionsforschung** wurde auch 1993 in drei weltweit koordinierten internationalen Zusammenarbeitsprogrammen in Europa, den USA und Japan durchgeführt. Die reduzierte russische Fusionsforschung lieferte Beiträge an das gemeinsame Projekt dieser drei Programme, die ***Engineering Design Phase (EDA)*** des geplanten ***International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)***. Die Schweiz nahm an der internationalen Fusionsforschung - integriert im europäischen Programm als gleichwertiger Partner - aktiv teil. In Europa bestehen keine einigermassen gewichtigen unabhängigen nationalen Fusionsforschungsprogramme im Bereich des magnetischen Einschlusses mehr.

In der **ersten Phase der ITER EDA**, welche vom 21. Juli 1992 bis zum 20. März 1994 dauert, wurde 1993 ein *Outline Design* entwickelt, der kohärent die technischen und programmatischen Vorgaben der ITER-Zusammenarbeit - mit einer genügenden Sicherheitsreserve zur Erfüllung der Ziele - in einem kohärenten Gesamtentwurf umzusetzen versucht. Dieser *Outline Design* wird nun in den beteiligten internationalen Programmen auf seine technische und finanzielle Realisierbarkeit hin geprüft. Er soll die Basis für die nun folgende detaillierte Auslegung von ITER bis zum Jahr 1998 bilden. Die Arbeit wird weiterhin an den Ko-Zentren Garching (D), Naka (J) und San Diego (USA) durch *Teams* von je ca. 50 Personen durchgeführt. Parallel zu den Zentren verfügen die beteiligten Programme auch über sogenannte Home-Teams, welche die Zentren unterstützen und die Umsetzung der ITER-Resultate in den beteiligten Programmen gewährleisten.

In den **USA** wurde - nach JET im Jahr 1992 - am Tokamak TFTR in Princeton 1993 ein Experiment mit Tritium durchgeführt, in dem eine Leistung von ca. 3 MW produziert wurde (JET kam damals auf 1,5 bis 2 MW). Diese Tritium-Experimente dienen nicht primär der Leistungserzeugung, sondern dem Test einer Reihe von Annahmen und Extrapolationen aus Experimenten ohne Tritium. Sie liefern Ergebnisse zu Details der Fusionsreaktion, dem Teilchentransport im Plasma, dem Verhalten der Tritiumsysteme in den Versuchsanlagen und zur Kontaminierung resp. Dekontaminierung der Anlagen.

In **Europa** wurde 1993 der Tokamak JET während des ganzen Jahres so umgebaut (Installation eines *Pumped Divertor*), dass ab Anfang 1994 neuartige Experimente zum Teilchentransport im Plasma und zum Abtransport der erzeugten Fusionsenergie und der Reaktionsasche (Helium) durchgeführt werden können. Ein weiteres kurzes Tritium-Experiment ist für 1994 vorgesehen; ein Tritium-Betrieb von über einem Jahr startet voraussichtlich Ende 1995.

Das europäische Fusionsprogramm befindet sich zur Zeit mitten in einer Evaluation seiner Strategie. Einerseits ist das spezifische Fusionsprogramm für das EG-Rahmenprogramm 1994-1998 zu entwickeln, andererseits ist die mittelfristige Zukunft der bestehenden und zukünftigen (Tokamak-) Anlagen (inkl. dem JET-Projekt, das Ende 1996 abgeschlossen werden soll) und die Rolle der nationalen Assoziationen zu überprüfen. Diese Evaluation ist noch im Gange. Ihre Ergebnisse werden im Frühling 1994 diskutiert werden. Über den Direktor des CRPP, der die Tokamak-Evaluation leitet, Mitglied des wissenschaftlichen Beirats von ITER ist und neu auch zum Vizepräsidenten des JET-Rates gewählt wurde, beteiligt sich die Schweiz aktiv auch an den Planungs-Arbeiten.

2. Forschungsarbeiten in der Schweiz

Die Forschungsarbeiten konzentrierten sich im Jahr 1993 noch stärker als bisher auf das ***Centre de recherche en physique des plasmas der ETH-Lausanne***. Die bisher vom Paul Scherrer Institut geleisteten Fusionstechnologie-Entwicklungen im Bereich der Supraleitung und der Material-Bestrahlung wurden Mitte 1993 ebenfalls in das Programm des CRPP integriert. Eine beschränkte Aktivität im Bereich der Oberflächenschichten in Fusions-

reaktoren wird daneben an der Universität Basel durchgeführt. Auch diese Arbeiten sind mit dem Grundlagenprogramm des CRPP koordiniert.

Die Finanzierung der Forschung erfolgt aus Institutskrediten, aus Krediten des Schweiz. Nationalfonds und dem Rückfluss der Mittel, welche die Schweiz im Rahmen des Assoziationsvertrags über kontrollierte Kernfusion und Plasmaphysik an EURATOM bezahlt. Das BEW/BBW Fusionsforschungsprogramm unterstützt punktuell zwei Technologienentwicklungen. Der weitaus grösste Teil der Arbeiten ist der Grundlagenforschung zuzuordnen.

Über das breite Spektrum der Arbeiten des CRPP resp. der Assoziation Schweiz im EURATOM-Programm geben die halbjährlichen Statusberichte an das Fusionsdirektorat der EG und die Berichte des CRPP Auskunft. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag 1993 bei der Inbetriebnahme und der Ausbauplannung (Zusatzheizung) des neuen Tokamaks TCV, der Ende 1992 eingeweiht worden war.

3. Ziele und Ergebnisse der BEW/BBW - finanzierten Projekte

Projekt: **Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren**

In diesem Projekt werden Methoden entwickelt, um Materialien mit niedriger Kernladungszahl an der Reaktor-Innenwand abzuscheiden, damit die Plasma-Abstrahlungsverluste minimiert werden. Diese Schichten werden in Bezug auf ihren mikroskopischen Aufbau sowie ihre chemischen und physikalischen Eigenschaften untersucht, die einen Einfluss auf das Verhalten des Fusionsplasmas haben.

Die Untersuchungen an Bor-Kohlenwasserstoffsystemen konnten abgeschlossen werden. Die Schichten, die unter verschiedenen Bedingungen abgeschieden wurden, sind charakterisiert und in Bezug auf die Aufnahme von Sauerstoff untersucht.

Unter Verwendung von Lithium und Kohlenstoff, einer Materialkombination, die eine noch weiter reduzierte Kernladungszahl aufweist und damit weiter reduzierte Abstrahlung verspricht, gelang es, Schichten mit einem modifizierten Verfahren abzuscheiden und bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung, den Bindungsverhältnissen und der Reaktivität zu untersuchen.

Projekt: **Construction de gyrotrons de haute puissance destinés au chauffage des plasmas thermonucléaires**

Zwei grundlegende Probleme in der Entwicklung quasi-optischer Gyrotrons wurden behandelt: die Auskopplung der elektromagnetischen Strahlung aus dem Gyrotron und die Verbesserung von dessen bisher geringem Wirkungsgrad. Im Bereich der Auskopplung wurde eine neues Resonatorkonzept getestet und mit theoretischen Vorhersagen verglichen, wobei sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung ergab. Es wurden bei einer Leistung von 150 kW (bei 14 A) mit einem Wirkungsgrad von 15% gut definierte Strahlungsparameter erzielt. Das Problem der Auskopplung ist damit gelöst.

Zur Verbesserung des Wirkungsgrades von nur 15% wurde die mögliche Degradation des Elektronenstrahls bei seinem Durchgang durch die Wechselwirkungszone untersucht und theoretisch modelliert, wobei Diskrepanzen zwischen Experiment und Rechnung auftraten. Bei weiteren Untersuchungen wurden parasitäre Oszillationen beobachtet, die den Wirkungsgrad negativ beeinflussen. Aufgrund dieser Resultate wurden neue Auslegungen für die Führung des Elektronenstrahls in Aussicht genommen, die nun getestet werden sollen.

4. Geplante Arbeiten 1994

Im Rahmen der BEW/ BBW - Projekte an der Uni Basel und dem CRPP sollen die aufgenommenen Arbeiten fortgesetzt werden. Die Abscheidung der Wand-Schichten wird sich auf die vielversprechenden ersten Resultate mit den Lithium-Abscheidungen stützen. Im Bereich der Gyrotron-Entwicklung müssen die Diskrepanzen zwischen den Rechnungen und den Experimenten im Bereich der Eigenschaften des Elektronenstrahls ermittelt und die verschiedenen Hypothesen zur Verbesserung des Wirkungsgrades getestet werden.

5. Liste der Projekte

[1] P. Oelhafen, H. Künzli, J.-U. Thiele, INST. F. PHYSIK / Uni - *Basel*: ***Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren.*** (JB)

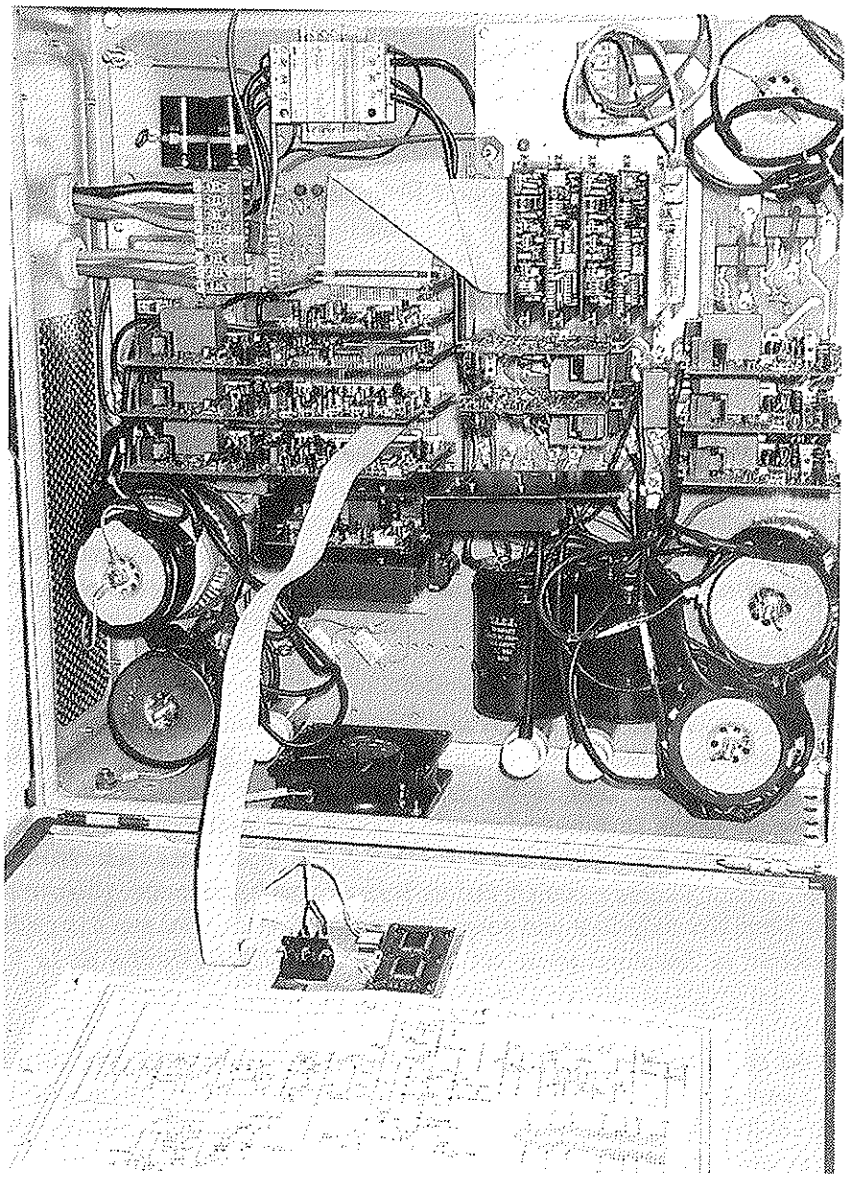
[2] M.Q. Tran, F. Troyon, CRPP / EPF - *Lausanne*: ***Construction de gyrotrons de haute puissance destinés au chauffage des plasmas thermonucléaires.*** (JB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Roland Brüniger



Umrichter-Prototyp mit Maximum Power Tracking

Mit der neuen Umrichtertechnologie soll bei weitem Eingangsspannungsbereich und hohem Wirkungsgrad eine Einspeisung der Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen ins öffentliche Netz erzielt werden.

1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1993

Das Forschungsprogramm **Elektrizität** beschäftigt sich mit der optimierten Nutzung der elektrischen Energie von der Erzeugung über die Verteilung bis zum rationellen Einsatz. Nach wie vor besteht die oberste Zielsetzung des Programms in der Produktionserhöhung, hauptsächlich im Bereich der Wasserkraft, in der Optimierung resp. der Erhöhung der Wirkungsgrade bei der Speicherung und Uebertragung der elektrischen Energie sowie in der Verminderung der elektrischen Verluste beim Verbraucher.

Die wesentlichen Bestrebungen für das Jahr 1993 bestanden - neben dem Betreuen der laufenden Projekte - schwerpunktmässig in folgenden Arbeiten:

- Umsetzung der erarbeiteten Forschungsstossrichtung "elektrische Antriebe" in konkrete Forschungsprojekte.
- Initiieren und gesamtschweizerische Ausrichtung der Aktivitäten im Bereich "Demand Side Management" unter Einbezug der internationalen Aktivitäten.
- Definieren der Forschungstätigkeit im Bereich "Supraleitertechnologie".
- Umsetzung der *Standby*-Forschungsergebnisse unter Einbezug der internationalen Aktivitäten.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ERZEUGUNG

Im **Bereich der Wasserkraft** werden einerseits insbesonders im höheren Leistungebereich vorhandene Erkenntnislücken durch diverse Elektrizitätsunternehmungen - in Zusammenarbeit mit den Hochschulen und der Industrie - bearbeitet, anderseits werden im DIANE-Programm **Kleinwasserkraftwerke** [13] vorzugsweise Problemstellungen im unteren Leistungsbereich angegangen. So erfolgten in einem NEFF-Hochschul-Projekt erste, erfolgreiche Durchflussmessungen mittels der akustischen Messmethode zur Bestimmung der Primärenergie. Die Methode nutzt dabei die Tatsache, dass eine Korrelation zwischen Schallfortpflanzungs-Geschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit besteht.

Im Projekt **Neue Umrichtertechnologien für erneuerbare Energiequellen am Beispiel von Kleinwasserkraftwerken** [1] steht die Entwicklung eines neuartigen Umrichters mit weitem Eingangsspannungsbereich und hohem Wirkungsgrad zur Einspeisung der Energie ins öffentliche Netz im Vordergrund. Der Umrichter soll in Kleinwasserkraftwerken mit hohen Drehzahländerungen, wie sie z.B. beim Ersatz eines Druckreduzierventils in einem Trinkwassernetz auftreten, zum Einsatz kommen. Nachdem in Form einer rückwärtslaufenden Pumpe eine geeignete "Turbine" für diesen Einsatz evaluiert und im Rahmen von bestehenden, photovoltaischen Anlagen je ein 1- und 3-phasiger Umrichter aufgebaut und ausgetestet werden konnte, wird nun das geplante Kleinkraftwerk mit dem neuen Umrichter in Zusammenarbeit mit den *SERVICES INDUSTRIELS de la Ville de Sion* 1994 realisiert.

In der Westschweiz ist die Schaffung eines ***Centre de recherche expérimental pour la réhabilitation de la Mini-hydraulique, Laboratoire de Montcherand*** beabsichtigt. Es soll experimentelle Untersuchungen an Mini-Wasserturbinen durchführen. Diesbezügliche Vorabklärungen, gekoppelt mit der detaillierten Projektdefinition, sind zur Zeit in Bearbeitung.

Das Amt für Bundesbauten (AfB) betreibt eine Vielzahl von **(diesel)motorischen Notstromanlagen**. Eine durch das AfB in Auftrag gegebene Studie fasst die technischen und wirtschaftlichen Grundlagen für die Umrüstung dieser Anlagen zur **elektrischen Spitzenlastdeckung** zusammen. Die Studie geht auf die diversen gesetzlich zu beachtenden Bestimmungen ein und stellt erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dar. Aufgrund einer amtsinternen Strategieabsprache Ökologie/Energie wurde aber im Sinne einer maximalen Umweltschonung auf eine Fortführung dieser Arbeiten verzichtet.

Im Projekt **Thermoelektrische Stromversorgung für Haustechnikkomponenten** [2] wird im Rahmen einer Machbarkeitsstudie untersucht, ob das Temperaturgefälle an einem Heizkörper technisch gesehen mittels thermoelektrischer Generatoren für die *autarke* Stromversorgung eines elektrostatischen Thermostatventils genutzt werden kann. In der Haustechnik gelangen bekanntlich immer mehr dezentrale, intelligente elektrische Komponenten zum Einsatz. Die Stromversorgung dieser Komponenten ist bis heute weitgehend unbefriedigend gelöst. Die ersten Ergebnisse der Studie sind ermutigend. Obwohl der thermoelektrische Wirkunsggrad an und für sich äusserst schlecht ist, genügt die erzeugte Energie. Voraussetzung ist allerdings, dass die Energie gespeichert und ein sparsames Regelkonzept realisiert werden kann.

SPEICHERUNG

Die effiziente und wirtschaftliche Speicherung elektrischer Energie dient hauptsächlich dazu, die zeitlichen und bei mobilen Anwendungen auch die örtlichen Unterschiede zwischen Produktion und Verbrauch auszugleichen.

Im Projekt **Zyklisches Blei-Akku-Ladegerät** [3] steht die Zielsetzung im Vordergrund, ein Ladeverfahren zu entwickeln, welches mehr Energie pro Kilogramm Blei speichert, die Lebensdauer von Bleiakkumulatoren erhöht und mit einer schonenden Ladung erlaubt, die Ladezeit zu verkürzen. Damit soll speziell die Anwendung im Elektrofahrzeugbereich unterstützt werden. Bis zum heutigen Zeitpunkt konnte der Versuchsaufbau weitgehend abgeschlossen werden. Die Entwicklung des Ladekonzepts steht ebenfalls kurz vor Beendigung, sodass im Anschluss daran erste Resultate nach den ersten 120 Lade/Entladezyklen erwartet werden können. Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit mit einem Industriepartner durchgeführt.

Im NEFF-Projekt **Kinetischer Kurzzeit-Energie-Speicher** wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen drei verschiedenen Instituten der ETH-Zürich konzeptionelle Überlegungen zur technischen Realisierung von Schwungradspeichern angestellt. Dabei wurde von einem Energiebedarf von etwa 1 kWh und einer maximalen Leistung von 250 kW ausgegangen. Zur Zeit ist die Entwicklung der einzelnen Systemkomponenten zu einem Gesamtsystem im Sinne eines Prototypen im Gange.

ÜBERTRAGUNG / VERTEILUNG

Forschungsanstrengungen im Bereich **Übertragung** werden besonders durch die UEBERLANDWERKE gemäss ihren Bedürfnissen unterstützt. Im vorliegenden Programm sind zur Zeit keine entsprechenden Projekte vorgesehen.

Im Ende Jahr abgeschlossenen Projekt **Führung des Verteilnetzes und Lastbestimmungsmodell** [4] sind die Grundlagen zur Schätzung des aktuellen Netzzustandes im Verteilnetz mit einem Lastbestimmungsmodell erarbeitet worden. Die Ergebnisse zeigen auf, dass ähnlich wie beim Uebertragungsnetz, aber ohne eine entsprechend ausgedehnte Messinfrastruktur, der Verlauf des Belastungszustands im Verteilnetz in Form von variablen Tagesverlaufkurven für Verteiltransformatoren bestimmt werden kann. Während den Arbeiten konnten für die verschiedenen Bereiche (Haushalte, Gewerbe, Industrie, Dienstleistungen) die relevanten Einflussfaktoren quantifiziert und sogenannte typische Grundkurven ermittelt werden. Das entwickelte Lastbestimmungsmodell gibt dem Anwender die Möglichkeit, aufgrund einer kurzen Messerie oder aufgrund von Schätzungen der erwarteten Last, eine Modellastkurve zu schaffen, welche das Abbild der realen, zeitvariablen Last am Verteiltransformator für einen beliebigen Tag innerhalb des Jahreszyklus darstellt. Damit kann einerseits eine Lastprognose und anderseits eine Online-Schätzung der einzelnen Lasten am Verteiltrafo ermittelt werden. Der aktuelle Stand der Modellentwicklung wurde in eine Prototyp-Software umgesetzt.

Die Ergebnisse des vorgängig erwähnten Projekts dienen als Grundlage für das sich daraus ergebende Folgeprojekt **Lastbestimmungsmodell für Verteiltransformatoren**. Mit diesem Projekt sollen die erarbeiteten Erkenntnisse vertieft und in einer ausgereiften Software umgesetzt werden.

VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

a) Kraft/elektrische Motoren

Basierend auf den durch das BEW initiierten Grundlagenarbeiten haben sich zwei **strategische Forschungs-Stossrichtungen** für eine optimale Effizienzverbesserung im Bereich "elektrische Antriebe" ergeben. Sie umfassen einerseits die Förderung des Integralmotors und anderseits die Erarbeitung eines einfachen, anwendbaren Hilfsmittels für die Auslegung des Antriebsystems im mittleren Leistungsbereich. Letzteres konnte in Angriff genommen werden. Für ersteres (Integralmotor) fehlen noch interessierte Industriepartner.

Im Projekt **Entwicklung eines Programmsystems zur Unterstützung der energieoptimierten, herstellerübergreifenden Auslegung elektrischer Antriebssysteme** [5] wird in enger Zusammenarbeit mit der Industrie und der Hochschule ein neues und benutzerfreundliches Programm entwickelt, welches die optimale Auslegung elektrischer Antriebssysteme ermöglichen soll. Wichtige Auswahlkriterien sollen dabei die Wirtschaftlichkeit und der Energieverbrauch sein. Die Anwendung sollte dabei nicht nur für die Projektierung neuer, sondern auch für die Nachrüstung bestehender Anlagen dienlich sein. Aufgrund des erwarteten Verbesserungspotentials konzentrieren sich die Arbeiten auf Leistungen von 0,12 bis 200 kW.

Nachdem in einer ersten Phase des Projekts **Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad** [6] die Ursachen der schlechten Wirkungsgrade analysiert wurden, zeigte die anschliessende Konzeptphase das Optimierungspotential prioritär in der Entwicklung von Antrieben mit Synchron- bzw. bürstenlosen Permanentmagnet-Motoren auf. Ergänzende Untersuchungen zur Verbesserung des hydraulischen Wirkungsgrads wurden unter Zuhilfenahme des Stereolithographie-Verfahrens vorgenommen. Erste Motoren sollen im Frühjahr 1994 zusammengebaut und ausgetestet werden. Eine Verdoppelung des heutigen Wirkungsgrads scheint grundsätzlich möglich zu sein.

Im Projekt ***Alimentation électrique des Trolleybus, fonctionnement en parallèle des sous-stations, courants vagabonds, économie d'énergie*** [7] wurde nach den theoretischen Berechnungen auch in den praktischen Versuchen nachgewiesen, dass durch eine Verminderung des Spannungsabfalls durch parallele Einbindung der Unterstationen die Energieverluste wesentlich reduziert werden können. Durch geeignete Massnahmen kann zudem die Bildung von vagabundierenden Strömen vollständig vermieden werden. Durch Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften sowie durch Information der verschiedenen Verkehrsbetriebe wird die Umsetzung dieser Ergebnisse angegangen.

b) Büro- und Unterhaltungselektronikgeräte

Wie vorgesehen wurde im Anschluss an die zweijährigen Arbeiten des Projekts **Energieverluste bei Büro- und Unterhaltunsgelektronikgeräten** eine internationale Tagung über diese Thematik durchgeführt. Dieser Informationsaustausch drängte sich auf, um einerseits die erarbeiteten Ergebnisse einem breiten Fachpublikum zu präsentieren und damit die Umsetzung zu beschleunigen, und anderseits, um die in mehreren Ländern ebenfalls laufenden, diesbezüglichen Forschungs- und Umsetzungsprogramme gegenseitig abzusprechen. Über 20 Fachleute aus den USA, Schweden, Frankreich, den Niederlanden und der Schweiz tauschten in diesem **Internationalen *Insider-Meeting*** Fakten und Erfahrungen aus. Das gemeinsame Ziel war dabei, den rationellen Energieeinsatz in der Informationstechnik zu fördern. Neben dem in deutsch und englisch erschienenen Tagungsband ***Miniwatt-Report*** [14] wurde in Ergänzung dazu eine Zusammenfassung der Referate in Form einer vertiefenden Tagungsdokumentation [15] zusammengestellt. Um zudem die an der Tagung gewonnenen Kontakte permanent zu pflegen sowie um einen konstanten internationalen Informationsfluss sicherzustellen, wurde am gleichen Meeting ein elektronisches Informationsnetz etabliert. Für die Schweiz wird diese Stelle durch das Forschungsteam "Energieanalysen" an der ETH Zürich wahrgenommen. Ergänzend wurde das gleiche Team vom BEW beauftragt, **bezüglich dieser Thematik eine Fachstelle** aufzubauen [8].

c) Verbrauchserfassung

Bisher durchgeführte Elektrizitätssparanalysen haben gezeigt, dass der Bearbeitungsaufwand in Bezug zu den erreichten Energieeinsparungen im allgemeinen hoch ist. Im Rahmen des durch mehrere kantonale Energiefachstellen unterstützten Projekts **Methodik der Elektrizitätssparanalyse** [9] wird eine generell gültige Methodik

erarbeitet, welche sich sowohl bei einfachen wie auch komplexen Objekten anwenden lässt und eine starke Reduktion der Kosten anstrebt. Im Verlauf der Vorphase wurde unter Einbezug mehrerer Ingenieurbüros ein Pflichtenheft und eine erste Demoversion der *Software-Tools* erstellt.

d) Demand Side Management (DSM)

National wie auch international sind intensive Aktivitäten auf dem Gebiet DSM auszumachen. So weisen Schätzungen der amerikanischen Elektrizitätswerke jährliche Ausgaben von über 2 Mia. US$ für DSM-Aktivitäten aus. Auch in der Schweiz werden diesbezügliche, Anstrengungen unternommen. Neben internen Aktionen einzelner Elektrizitätswerke führte der Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) mehrere DSM-Informationstagungen für ihre Mitgliederwerke durch.

Aufbauend auf diversen Vorarbeiten des VSE [16] wird unter Teilnahme zweier El.-Werke im kürzlich gestarteten Untersuchungsprojekt **Bestimmung der prioritären Aktionsfelder im DSM** eine Methodik zur Definition der bestgeeigneten DSM-Aktivitäten im jeweils spezifischen Umfeld erarbeitet. Zudem beteiligt sich die Schweiz am fünfjährigen internationalen Programm ***Demand Side Management*** [17] der IEA, welches u.a. die Entwicklung von verbesserten Methoden für die Integration der DSM-Optionen in die Ressourcen-Planung als Inhalt aufweist.

INTERDISZIPLINÄRE PROJEKTE

a) Supraleitung

Das vorliegende Programm umfasst ebenfalls die energierelevante Forschung auf dem Gebiet der Supraleitung. Um die strategische Stossrichtung für die nächsten Jahre festzulegen, wurden im Berichtsjahr intensive Gespräche mit der einschlägigen Industrie und diversen Forschern geführt und die Ergebnisse inkl. verschiedene Szenarien in einem Bericht [18] als Entscheidungsgrundlage zuhanden der Eidg. Energieforschungskommission zusammengefasst. Im Anschluss daran wurde im strategischen Sinne festgehalten, dass der Einsatz der Supraleitung in Transformatoren als nicht energierelevant beurteilt und deshalb nicht unterstützt wird, die Supraleitung in Kabeln hingegen durchaus von Bedeutung sein könnte. Da diese Forschungsaktivitäten aber zur Zeit durch das NFP 30 **Hochtemperatur-Supraleitung** finanziert werden, ist erst beim Auslaufen dieses NFP-Programms eine Umsetzungs-Unterstützung zu prüfen.

Um sich auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Supraleitung weiterhin international auf dem laufenden zu halten, wird die Schweiz für zwei weitere Jahre an den **IEA-Aktivitäten** ***Assessing the Impacts of High Temperatur Superconductivity on the Electric Power Sector*** [10] teilnehmen.

b) Leistungselektronik

Das **Schwerpunktsprogramm LESIT** des Schweizerischen Schulrats beschäftigt sich bereits seit über 2 Jahren in mehreren Modulen mit der Erforschung und Entwicklung von hochleistungsfähigen Komponenten und Systemen der Leistungselektronik [19]. Erste Ergebnisse wurden am zweiten LESIT-Konvent im November 1993 präsentiert.

c) Niederfrequente, elektromagnetische Felder

Auch in diesem Jahr wurden die weltweiten Aktivitäten auf dem Gebiet **Elektromagnetische Felder und deren Einfluss auf den menschlichen Körper** verfolgt. Ein kausaler Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und möglichen Auswirkungen auf den menschlichen Körper sowie plausible Wirkungsmodelle konnten bis heute nicht ermittelt werden. Eine durch das BUWAL ins Leben gerufene Arbeitsgruppe befasste sich ausgiebig mit der ganzen Thematik und fasste ihre Betrachtungen in einem Bericht zusammen. Die INFEL hat ferner ihre Konsumententagung vom November 1993 dieser Thematik gewidmet. Schliesslich sei erwähnt, dass der Bundesrat die Teilnahme am COST Programm 244 **Biomedizinische Effekte elektromagnetischer Felder** beschlossen hat. COST bietet dabei die internationale Koordination von Forschungsaktivitäten zu diesem Thema an.

d) ***Neue, innovative Projektideen***

Im Projekt ***Compresseur hydraulique-isothermique*** [11] steht die Erforschung eines neuartigen Kompressors im Vordergrund. Dank eines isothermischen, hydraulischen Verfahrens wird eine wesentliche Erhöhung des Wirkungsgrades erhofft. Nachdem die theoretischen Grundlagen im Jahr 1993 erarbeitet wurden, ist beabsichtigt, im Jahr 1994 einen Prototyp aufzubauen und unter Miteinbezug der Ingenieurschule Biel auszumessen.

Dem Projekt **Gleichstromversorgung von elektrischen und elektronischen Geräten und Anlagen** [12] stand die Idee Pate, die durch Photovoltaik erzeugte DC-Energie direkt mittels eines DC-Netzes für ausgewählte Verbraucher zu nutzen. Im Vordergrund der Betrachtungen stand die Verwendbarkeit im Dienstleistungsbereich unter Einbezug einer Unterbruchsfreien Stromversorgungs-Anlage (Einspeisung in deren DC-Kreis) für Bürogeräte. Die Studie hat aufgezeigt, dass unter gewissen Bedingungen eine direkte DC-Versorgung sowohl energetisch als auch kostenmässig wesentliche Verbesserungen gegenüber den heutigen Lösungen erbringt. Gleichzeitig konnte aber auch festgestellt werden, dass ähnliche Steigerungen durch ein neues "AC-Konzept" möglich sind. Da im zweiten Fall die technischen Schwierigkeiten weniger problematisch sind, dürfte eine allfällige Weiterbehandlung der Thematik eher in diese Richtung laufen.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

In praktisch allen Forschungsprojekten wird vertraglich die Einbindung der interessierten Industrie sichergestellt. Zudem werden verstärkt Hochschulen und Ingenieurschulen miteinbezogen. Damit wird national eine möglichst breite Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Forschungs- und Ausbildungsstätten sowie der Industrie angestrebt.

International konnten wertvolle Kontakte und ein guter Informationsaustausch durch die Teilnahme an zwei *IEA-Agreements* (*Demand Side Management* und Supraleitung) erreicht werden. Diese Beziehungen werden in Zukunft noch ausgebaut.

Durch die Teilnahme des Programmleiters an der Power Electronic Conference vom IEEE in Vancouver konnten ferner wertvolle Inputs für weitere Forschungsaktivitäten gesammelt werden [20].

4. Umsetzung der Ergebnisse

Die laufenden und geplanten Umsetzungsarbeiten sind bereits bei den Projekten erwähnt worden. Ergänzend sei erwähnt:

Im Rahmen des abgeschlossenen Projekts **Hocheffizienter Netzstromrichter in Hybrid-Struktur** wurde aufgezeigt, dass durch das Hybridkonzept bei diversen Anwendungen Energie eingespart werden kann. Die Grundidee wurde in Form eines konkreten Folgeprojekts durch die Industrie im Bereich der unterbruchsfreien Stromversorgungsanlage aufgegriffen. Daneben ist bei den ABB ein Interesse für eine diesbezügliche Optimierung in Lokomotiven vorhanden.

Eine **amtsübergreifende Arbeitsgruppe** (EDMZ, BUWAL, BEW, AfB, u.a.) unter der Leitung des BEW strebt an, basierend auf den Forschungsergebnissen der *Standby*-Studie [21] einheitliche Vorgehensweisen bei der Beschaffung von Bürogeräten unter starkem Einbezug des energetischen Aspekts auszuarbeiten und bundesweit durchzusetzen. Anlässlich des bereits erwähnten *Insider-Forums* über die *Standby*-Thematik haben zudem diverse Tageszeitungen, das Schweizer Fernsehen und Radio sowie einschlägige Computerzeitschriften dem Thema teilweise namhafte Beiträge gewidmet. Der Schlussbericht **Die heimlichen Stromfresser** fand zudem international ein derartiges Interesse, dass das *US Department of Energy* die Studie vollumfänglich ins Englische übersetzen liess.

5. Pilot- & Demonstrations-Projekte

Das P&D-Programm **Elektrizität** ist noch am Anlaufen. Aufgrund der Tatsache, dass viele Projekte zwar am Rande mit Elektrizität zu tun haben, schwerpunktsmässig aber einem anderen Programm zugeordnet werden, dürfte verständlich werden, dass bis zum heutigen Zeitpunkt zwar mehrere Anfragen, aber lediglich vereinzelt konkrete Projekte bearbeitet werden konnten. Ziel des P&D-Programms ist es nach wie vor, entweder bestehenden Anlagen/Produkten durch Pilot- oder Demonstrationsanlagen zum Durchbruch zu verhelfen, oder diese bei Vorliegen von Forschungsergebnissen zu erproben.

6. Bewertung 1993 und Ausblick für 1994

Es war erfreulich, dass betreffend Supraleitungsforschung eine klare, mittelfristige Stossrichtung definiert werden konnte. Ebenfalls war die breit angelegte Umsetzungsarbeit bezüglich dem Standby-Thema auf beeindruckendes nationales und internationales Interesse gestossen. Ferner war das Aufgreifen der DSM-Thematik durch Elektrizitätwerke in einem konkreten Projekt sowie durch die IEA-Teilnahme positiv zu werten. Leider wurde aber die Weiterentwicklung des Integralmotors durch die Industrie nicht im erwarteten Umfange angegangen.

Für das Jahr 1994 steht die **Begleitung der bereits angelaufenen Projekte** im Vordergrund. Daneben werden gewisse Fachgebiete vertieft bearbeitet. So soll dem Gebiet der **elektrischen Übertragung und Verteilung** ein grösseres Gewicht beigemessen werden, da in diesem Bereich noch ungenutztes Potential vermutet wird. Hierzu werden die internationalen Forschungsaktivitäten verstärkt beobachtet, entsprechende Kontakte aufgebaut und intensiviert und unter Einbezug der nationalen Aktivitäten diesbezügliche Forschungsschwerpunkte inkl. konkrete Projekte ausformuliert. Zudem interessiert nach wie vor die Idee, energierelevante Steuerungsprobleme mit ***Fuzzy-Logic*-Technik** genauer zu untersuchen. An der ETH-Zürich laufen z.B. bereits entsprechende Arbeiten im Bereich Liftsteuerung. Daneben soll die Industrie im Rahmen eines Workshops zur Entwicklung des **Integralmotors** angespornt werden.

7. Liste der Projekte

[1] H.P. Biner, HTL - *Sion*: ***Neue Umrichtertechnologien für erneuerbare Energiequellen am Beispiel von Kleinwasserkraftwerken.*** (JB)

[2] M. Zimmermann, EMPA-KWH, *Dübendorf*: ***Thermoelektrische Stromversorgung für Haustechnikkomponenten.*** (JB)

[3] M. Leuenberg, GLUR COMMUNICATIONS-ELECTRONIC, *Münsingen*: ***Zyklisches Blei-Akku-Ladegerät.*** (JB)

[4] D. Brunner, ETH- *Zürich* & G. Schnyder, R. Wettlin, AMSTEIN + WALTHERT, *Zürich*: ***Führung des Verteilnetzes und Lastbestimmungsmodell.*** (SB)

[5] R. Tanner, SEMAFOR, *Basel*: ***Entwicklung eines Programmsystems zur Unterstützung der energieoptimierten, herstellerübergreifenden Auslegung elektrischer Antriebssysteme.*** (JB)

[6] J. Nipkow, ARENA, *Zürich*: ***Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad.*** (JB)

[7] U. Cavalli, ELEC-ENGINEERING, *Nyon*: ***Alimentation électrique des Trolleybus, fonctionnement en parallèle des sous-stations, courants vagabonds, économie d'énergie.*** (SB)

[8] B. Aebischer, ETH - *Zürich*: ***Förderung des rationellen Energieeinsatzes bei Informationstechnologien.*** (JB)

[9] H. Huber, M. Stalder, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, *Liestal*: ***Methodik der Elektrizitätssparanalysen.*** (JB)

[10] G. Vescey, EPF - *Lausanne*: ***Assessing the Impacts of High Temperatur Superconductivity on the Electric Power Sector.*** (JB)

[11] L. Simon, *Genève*: ***Compresseur hydraulique-isothermique.*** (JB)

[12] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, R. Moser, ENERCONOM, F. Jenni, J, Riatsch, R. Schmidt, ETH - *Zürich*: ***Gleichstromversorgung von elektrischen und elektronischen Geräten und Anlagen.*** (SB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

8. Referenzen

[13] Hp. Leutwiler, ITECO, *Affoltern a.A.*; ***DIANE Projekt Kleinwasserkraftwerke 1992 bis 1996***

[14] Chr. Bachmann, B. Aebischer, R. Brüniger; ***Miniwatt-Report*** (deutsch/englisch), Bericht über das internationale Informationsmeeting für Insider vom 19. März 1993 an der ETH - *Zürich*

[15] B. Aebischer, ETH - *Zürich*; ***Zusammenfassung und andere Informationen zu den Referaten***, Tagungsband zum Internationalen Informationsmeeting für Insider.

[16] ***Das Konzept des Nachfrage-Managements*** (VSE-Teilberichte 1, 2 und 3)

[17] R. Brüniger: ***Weltweites Abkommen der Internationalen Energieagentur betreffend Demand Side Management*** (Zusammenfassung)

[18] R. Brüniger: ***Grundsatzüberlegungen und Entscheidungsgrundlagen zur angewandten Supraleitungs-Forschung in der Schweiz***

[19] ***Industry - University Joint Research, Presentation of selected Results*** *2nd annual LESIT-Convention, November* 10, 1993

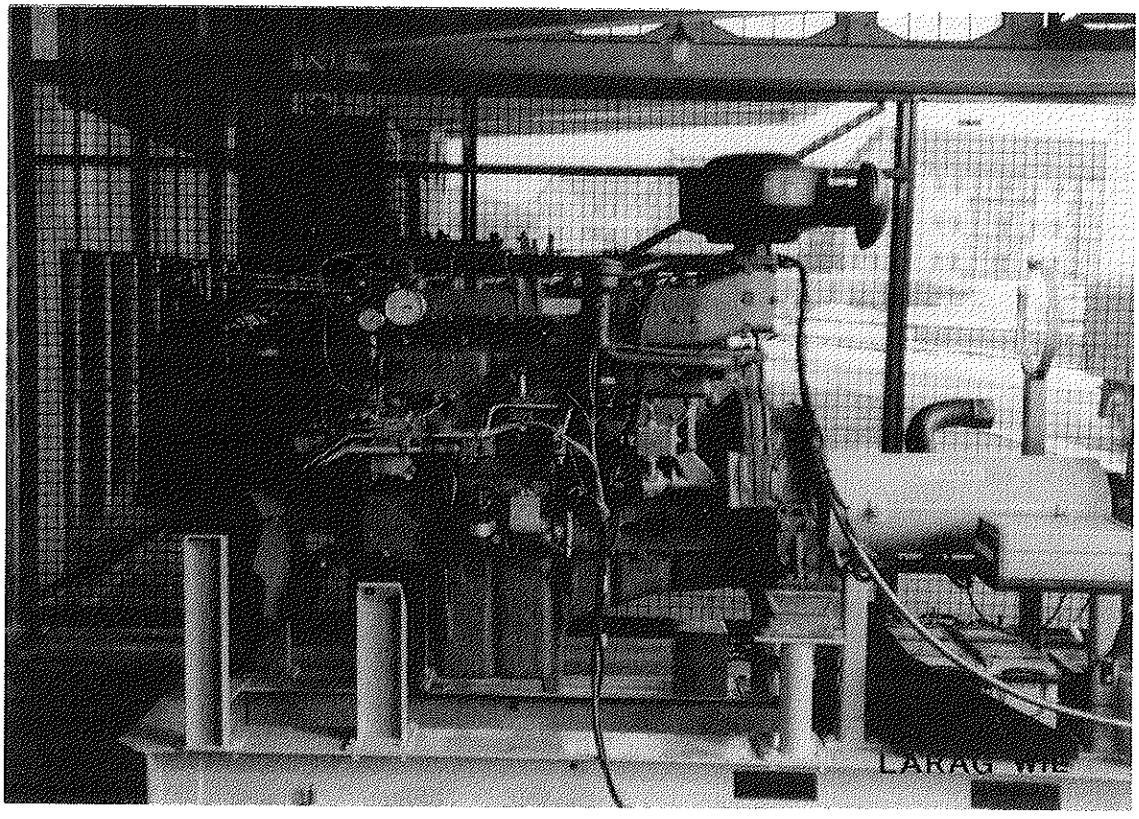
[20] R. Brüniger: ***Reisebericht der Power Electronic Conference des IEEE in Vancouver vom 18. - 22. Juli 1993.***

[21] U. Graune, H. Prechtl, EWI, *Zürich*: ***Die heimlichen Stromfresser.***

WASSERSTOFF

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Thomas H. Schucan



Wasserstoff - Motor

Ein 12 Liter - Dieselmotor mit einer mechanischen Leistung von 100 kW wurde von der Firma LARAG in Wil auf Wasserstoffantrieb umgebaut. Für die Injektion des Wasserstoffs wurde die innere Gemischbildung gewählt, und es wurde ein neues elektrohydraulisches Einblase-System entwickelt.

1. Anvisierte Zielpunkte für 1993

Der Wasserstoff verdankt seine prominente Rolle in der Diskussion über Energieversorgungssysteme der Zukunft vor allem der Tatsache, dass er ein chemischer Sekundärenergieträger ist, welcher einerseits aus praktisch allen bekannten Primärenergieträgern herstellbar und andererseits für eine grosse Vielfalt von Anwendungen nutzbar ist. Die Herstellung, die Nutzung und als Bindeglied die Speicherung (inkl. Transport) sind deshalb die drei Hauptgebiete für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Wasserstofftechnologie. Davon ausgehend wurden für das Forschungsprogramm **Wasserstoff** die folgenden drei Schwerpunkte gesetzt:

- Die Entwicklung von **Druck-Elektrolyseuren** bis zur Demonstrationsreife.

- Die Weiterentwicklung der drei verschiedenen **Speichertechnologien** (Bindung in festen metallischen oder in flüssigen organischen Hydriden, oder Speicherung als tiefgekühlter Flüssigwasserstoff).

- Die Weiterentwicklung von **Gesamtsystemen** (d.h. von Systemen, in welchen Erzeugung, Speicherung und Nutzung aufeinander abgestimmt sind) in Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschulen unter Berücksichtigung der für die Schweiz spezifischen Erfordernisse.

Summarisch wurden für 1993 folgende Ziele für die drei Schwerpunktsbereiche gesetzt:

Im Bereich **Erzeugung von Wasserstoff** sollten die 1989 begonnenen Projektarbeiten zur Entwicklung von Elektrolyseuren (d.h. Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom), bei welchen der Wasserstoff unter einem Druck von 30 bar (oder höher) bzw. auf einem höheren Temperaturniveau (100 bis 150°C) erzeugt wird, durch Einbeziehung neuer Partner näher an die Demonstrationsreife gebracht werden. Der Einfluss der für einen Betrieb mit Sonnenenergie typischen zeitlich unregelmässigen Stromversorgung auf den Betrieb sollte untersucht werden, und die theoretische Modellierung sollte zu praktisch nutzbaren Erkenntnissen führen.

Im Bereich **Speichertechnologien** sollten zwei Projekte zur Speicherung von Wasserstoff in festen metallischen Hydriden (mit dem Ziel, einen höheren volumenbezogenen Wasserstoffgehalt zu erreichen) bzw. in der Form von tiefgekühlter Flüssigkeit (mit dem Ziel, den beträchtlichen, für die Verflüssigung benötigten Energieaufwand besser auszunützen oder zu vermindern) weitergeführt bzw. zum Abschluss gebracht werden, um auf diesen beiden Gebieten den Anschluss an die internationalen Aktivitäten zu gewährleisten.

Das Konzept der Speicherung von Wasserstoff in der Form von flüssigen organischen Hydriden (Methylzyklohexan-Toluol-Zyklus MTH) ist weitgehend in der Schweiz entwickelt worden. Es ist gegenüber den anderen Methoden vor allem für die Langzeit-Speicherung geeignet. Die Weiterentwicklung der entsprechenden Speichertechnik im engeren Sinne war innerhalb dieses Schwerpunktsbereichs vorgesehen, während die Realisierung des Gesamtkonzepts dem folgenden Bereich zuzuordnen ist.

Das Ziel für das Programm 1993 im Bereich **Gesamstsysteme** bestand in der Weiterführung der Arbeiten am 1990 begonnenen, vom PSI gemeinsam mit der Firma DAIMLER-BENZ initiierten Projekt HYPASSE (HYdrogen Powered Applications using Seasonal and weekly Surplus of Electricity). Darin sollen zwei verschiedene Speicherkonzepte und die damit verbundene Nutzung für mobile und stationäre Anwendungen in einem gemeinsamen, energiewirtschaftlich sinnvollen Umfeld weiterentwickelt und realisiert werden.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1993

Im Berichtsjahr wurden sieben Projekte abgeschlossen. An drei Folgeprojekten ist die Arbeit aufgenommen worden, und weitere Vorschläge stehen in der Vorbereitungsphase. Die wichtigsten der 1993 durchgeführten Arbeiten und die erreichten Resultate werden in den folgenden Abschnitten nach Schwerpunkten geordnet zusammengestellt.

ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF

Nach den Arbeiten zur Verbesserung ihrer Elektrolyseure durch die Ausdehnung der Betriebsmöglichkeiten zu höherem Druck (30 bar) und höheren Temperaturen (100 bis 150°C) hat sich die Firma ALYZER SA (früher METKON) im Berichtsjahr vor allem auf die Untersuchung des Einflusses der zeitlich unregelmässigen Stromzufuhr an die Elektrolyseure konzentriert, die für deren Betrieb mit Strom aus Sonnenenergie typisch ist [1]. Aus einer Vielfalt von Möglichkeiten wurden diejenigen Materialien für die beiden Elektroden ausgewählt, deren elektrokatalytische Eigenschaften am besten geeignet sind für den intermittierenden Betrieb. Die besten der gefundenen Elektroden wurden in einen Modell-Elektrolyseur eingebaut und ihr Verhalten unter konstanter Stromzufuhr wurde mit dem Betrieb durch einen den zeitlichen Verlauf der Sonnenenergie simulierenden Generator verglichen. Damit konnten die im Labor gefundenen Resultate bestätigt werden.

Die früher im Rahmen des Programms **Elektrochemie** durchgeführten Arbeiten zur mathematischen Modellierung von Elektrolyse-Zellen wurden zu Beginn des Berichtsjahrs ins Programm **Wasserstoff** übernommen mit dem Ziel, die Resultate in einen direkten Zusammenhang mit den Bedürfnissen des schweizerischen Elektrolyseur-Herstellers zu bringen. Dazu musste die Modellierung einerseits auf 3 Dimensionen erweitert und andererseits auf die konkreten Randbedingungen der ALYZER-Zellen angewendet werden [2]. In Anbetracht der zu langen Rechenzeiten ergab sich die Notwendigkeit, vor dieser Erweiterung die Modellierung der an den Übergängen zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten auftretenden Phänomene neu zu konzipieren.

Im Rahmen des weiter unten erwähnten Demonstrationsprojektes der ATEL in Niedergösgen wird für die Elektrolyse die von BBC 1987 gebaute erste Anlage in MEMBREL-Technik eingesetzt. Nachdem sie 1991 im Rahmen eines vom KWF unterstützten Forschungsprogramms vom PSI revidiert und wieder installiert und in Betrieb genommen wurde, konnte im Sommer 1992 der regelmässige Betrieb aufgenommen werden. Gleichzeitig erfolgt damit die wissenschaftliche Analyse des zeitlichen Verhaltens der 120 Zellen durch das PSI.

Einige Projekte, die sich mit der direkten Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht (mit photochemischen, photokatalytischen oder photobiologischen Methoden) befassen, sind im begleitenden Forschungsprogramm **Photochemie** enthalten. Die Möglichkeit der Erzeugung von Wasserstoff mit hochkonzentrierter Sonnenenergie wird im Rahmen des Programms **Thermochemie** untersucht.

SPEICHERTECHNOLOGIEN

Zwei Gruppen arbeiten in der Schweiz an der Speicherung von Wasserstoff in festen Metallhydriden. Nachdem die Arbeiten an der Entwicklung von Metallhydridelektroden für reversible Batterien im Rahmen des Programms **Elektrochemie** weitergeführt werden, sucht die Gruppe an der Universität Fribourg in einem NEFF-Projekt nach billigen, Wasserstoff speichernden Legierungen für stationäre Anwendungen. Es gelang, sowohl Legierungen aus Eisen und seltenen Erden wie solche aus Magnesium und seltenen Erden mit Wasserstoff zu beladen.

In einem Projekt der Uni Genf [3] wurden 5 weitere neue Metallhydrid-Verbindungen gefunden und hergestellt, die jeweils aus drei oder vier verschiedenen Elementen zusammengesetzt sind. Zum Teil handelt es sich dabei um metallische, zum Teil um komplexe nicht-metallische Hydride. Solche Verbindungen zeichnen sich vor allem aus

durch ihre relativ hohe Wasserstoffdichte (doppelt so hoch wie bei flüssigem Wasserstoff und 9 mal höher als bei gasförmiger Druckspeicherung unter den üblichen 200 bar). Ihre Kristallstruktur wurde mit röntgenkristallographischen Methoden bestimmt. Ziel dieser Untersuchungen an zahlreichen neuen Verbindungen ist es, durch Erkennung, Verständnis und Kombination ihrer Eigenschaften eine Verbindung zu finden, welche sich sowohl durch einen akzeptablen Preis als auch durch eine geringe thermische Stabilität auszeichnet. Während einige der bisher gefundenen 20 Hydride in bezug auf ihre Speicherkapazität oder auf ihre Herstellungskosten recht günstige Eigenschaften aufweisen, ist ihre thermische Stabilität in allen Fällen, in welchen sie bisher gemessen werden konnte, zu hoch.

Wenn in einem System zur energetischen Nutzung von Wasserstoff die Speicherung in Form von Flüssigwasserstoff erfolgt, wird die energetische Gesamteffizienz massgeblich durch den für die Verflüssigung einzusetzenden Energieaufwand beeinflusst (ca. 30-40 % des Energie-Inhalts werden für diesen Zweck zusätzlich benötigt). Detaillierte Erforschung des damit verbundenen Mechanismus der Ortho-Para-Umwandlung ist deshalb von besonderem Interesse. Die Bestätigung der früher erhaltenen Laborresultate mit verschiedenen Katalysatoren durch Messungen an einer im industriellen Betrieb stehenden Wasserstoff-Verflüssigungsanlage (in Kanada) wurde abgeschlossen [4]. Es hat sich dabei gezeigt, dass zwar die Messung der Ortho-Para-Zusammensetzung von Wasserstoff mit Hilfe der Gaschromatographie mit Wärmeleitfähigkeitsdetektor möglich ist, dass die Methode wegen aufwendiger Handhabung jedoch für den industriellen Einsatz nicht geeignet ist.

Im Zusammenhang mit dem vor allem in der Schweiz entwickelten Speicherkonzept (flüssige organische Hydride) wurde in zwei Projekten untersucht, wie eine bessere Wasserstoffausbeute dadurch erreicht werden kann, dass durch Einsatz von Membranen die chemischen Gleichgewichtseinschränkungen überwunden werden. Dazu wurde die Dehydrierung von Methylcyclohexan (d.h. der Vorgang der Freisetzung von Wasserstoff) mit kommerziellen Katalysatoren im Festbettreaktor getestet. Die verwendeten Palladium-Silber-Membranen [5] haben in einigen Fällen zu einer deutlichen Verbesserung (im besten Falle von 40 % auf 85 % bei 340° C, einem Druck von 15 bar und wirtschaftlich sinnvollem Durchsatz (LSHV 3/h)) der Wasserstoffausbeute geführt. Im Folgeprojekt [6] wurde gezeigt, dass mit einer solchen Rohrmembran eine Ausbeute von über 90 % bei der verhältnismässig niederen Temperatur von 370°C und bei 15 bar während mehr als 200 Stunden aufrechterhalten werden kann. Im Rahmen des NEFF-Projekts *Saisonale Speicherung von Elektrizität mit chemisch gebundenem Wasserstoff* wurde am Paul Scherrer Institut eine PC-gesteuerte automatische Labor-Reaktor-Anlage aufgebaut. Darin konnte durch geeignete Wahl der Betriebsbedingungen und der Aktivierungsverfahren die Ausbeute an Toluol auf 98 % erhöht werden. Parallel dazu wurde der Anteil an unerwünschten Nebenprodukten vermindert. Insbesondere gelang es, den Anteil an Benzol auf weniger als 0,2% zu reduzieren.

In einem Ende 1991 begonnenen Projekt [7] wird untersucht, ob Wasserstoff in einem quasi-flüssigen Medium gespeichert werden kann, indem eine Grobsuspension aus metallischem Magnesium und einer wärmeleitenden Flüssigkeit mit Wasserstoff unter Druck und bei erhöhter Temperatur zu Magnesium-Dihydrid umgewandelt wird. Auf diese Weise liesse sich der Wasserstoff leichter als Ersatztreibstoff verwenden, weil der Tankvorgang erheblich erleichtert werden könnte. Nachdem in der im Vorjahr aufgebauten Versuchsapparatur als erstes Beispiel eine Suspension von $LaNi_5$ in n-Undecan bei 50-90° C erfolgreich mit Wasserstoff beladen und wieder entladen worden war, gelang es im Berichtsjahr, mit Polyalphaolefin (PAO 6) eine Trägerflüssigkeit zu finden, die sich bei 300°C gegenüber Wasserstoff und Magnesium inert verhält. Damit wird die Verwendung der wirtschaftlich wesentlich attraktiveren Magnesium-Legierungen ermöglicht. Mit PAO 6 und mit 2 % Nickel angereichertem Magnesium steht damit heute ein quasi-flüssiger Wasserstoffspeicher mit einem Wasserstoffgehalt von 2 Gew.% bei 400 kPa und 330°C zur Verfügung.

Die Hydrierung von Abfall-CO_2 zu Methanol als Wasserstoff speichernde Reaktion und das dazu gehörende Umfeld (z.B. die Bereitstellung von CO_2 in ausreichender Reinheit) wurde im Rahmen des Programms **Thermochemie** und in einem vom NEFF unterstützten Projekt untersucht. Über den Fortschritt dieser Arbeiten wird an anderer Stelle informiert. Vom PSI wurde im Berichtsjahr ein Grossprojekt zur Verwertung von Abfallbiomasse angeregt. Das Ziel des Projekts ist die Umwandlung von Biomasse über die Vergasung mit Sauerstoff und Dampf in den flüssigen Energieträger Methanol. Berührungspunkte mit dem Programm

Wasserstoff ergeben sich durch die längerfristig vorgesehene Koppelung des Prozesses mit Wasserelektrolyse. Über die Konversion zu Methanol könnten in einer Tonne trockener Biomasse (z.B. Holz) bis zu 150 kg Wasserstoff gespeichert werden. Das Ziel des Projekts ist eine Demonstrationsanlage für die Biomasseumwandlung in Methanol bis zum Ende des Jahrzehnts. Mit einer Reihe von externen Partnern hat das PSI 1992 mit der ersten Phase des Projekts (Machbarkeit) angefangen. Über dieses Projekt wird im Überblick des Programms **Biomasse** berichtet.

NUTZUNG UND GESAMTSYSTEME

Im Zentrum der für die Weiterentwicklung des Schweizer Speicherkonzepts notwendigen Arbeiten stand im Berichtsjahr neben den im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Verbesserungen an den katalytischen Eigenschaften der Umbau eines Verbrennungsmotors auf den Betrieb mit Wasserstoff [8]. Dafür wurde die innere Gemischbildung gewählt, bei welcher die Einblasung des Wasserstoffs direkt in den Kompressionstakt erfolgt. Ein 12 l - Dieselmotor wurde mit einem neu entwickelten, elektrohydraulisch gesteuerten Einblase-System ausgerüstet und auf einem für diesen Zweck mobil aufgebauten Prüfstand in Betrieb genommen. Dieses Einblasesystem ermöglicht neben verbrennungstechnischen Vorteilen ein Höchstmass an Flexibilität für die möglichen Anwendungsvarianten und ist insbesondere auch für stationären Betrieb besonders gut geeignet. Bei einem Wasserstoffdruck von 10 bar und einer konstanten Einblasezeit von 5 ms konnte eine mechanische Leistung von 93 kW erreicht werden, und es wurde ein Brennstoffverbrauch von ca. 115 g Wasserstoff pro kWh gemessen. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 26 %. Der Motor wurde bisher während ca. 20 Stunden betrieben, und es wurde noch keine Optimierung der Betriebsparameter durchgeführt.

Bei der Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser wird neben dem Wasserstoff immer auch Sauerstoff freigesetzt. Im Hinblick auf mögliche kombinierte Demonstrationsprojekte wurde deshalb in einer von der Programmleitung veranlassten Studie [9] der Bedarf an Sauerstoff in der Schweiz nach seiner quantitativen und regionalen Aufschlüsselung analysiert.

3. Internationale Zusammenarbeit

In der Internationalen Energie-Agentur (IEA) werden zurzeit im Bereich Wasserstoff zwei Programme durchgeführt. In beiden (Wasserstofferzeugung; Speicherung, Umwandlung und Sicherheit) ist die Schweiz mit Projekten aus den Programmen **Photochemie** und **Wasserstoff** aktiv beteiligt. Insbesondere haben die EWI (Zürich) und die ALYZER (Mendrisio) ihre Teilnahme an der Arbeitsgruppe weitergeführt, in welcher sechs Forschungsgruppen aus Deutschland, Italien, Norwegen und der Schweiz ihre Untersuchungen und Erfahrungen zur Koppelung von Druck-Elektrolyseuren mit Stromerzeugung aus Sonnenenergie zu einem kohärenten Arbeitsprogramm kombinierten. Nachdem die Schweiz im Vorjahr den Vorsitz des *Hydrogen Executive Committee* der IEA übernommen hat, hat sie einen bestimmenden Einfluss auf die Neuformulierung des Forschungsprogramms ausgeübt. Unter Beizug von 30 Experten aus 10 verschiedenen Ländern wurden in drei Workshops in Brunnen die Grundlagen für die neuen Forschungspläne ausgearbeitet.

Die Arbeiten zum oben erwähnten, vom PSI gemeinsam mit DAIMLER-BENZ ins europäische Forschungsprogramm EUREKA eingebrachten Projekt HYPASSE wurden im Berichtsjahr weitergeführt. In diesem Zusammenhang wurde von Daimler-Benz ein neuer Wasserstoffmotor entwickelt und gebaut, der auf dem Prüfstand hervorragende Emissionswerte aufweist. Die in der Schweiz im Rahmen des Projekts HYPASSE durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen sind in den Abschnitten "Speichertechnologien" und "Nutzung und Gesamtsysteme" beschrieben.

Die an der Wasserstoffspeicherung in Metallhydriden arbeitende Gruppe der Universität Fribourg beteiligt sich zusammen mit 7 Instituten aus vier EG-Ländern sowie aus Schweden an dem neuen im Rahmen des EG-

Programms *Human Capital and Mobility* begründeten Netzwerk *Metallic Multilayers and Superlattices, with Special Regard to Hydrogen Interactions.*

Auch im Bereich der Erzeugung von Wasserstoff werden die in der Schweiz stattfindenden Entwicklungen international mit grossem Interesse verfolgt. Die Firma ALYZER hat einige Elektrolyse-Anlagen ins Ausland verkauft, und sie steht in bezug auf ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in engem Kontakt und Erfahrungsaustausch mit anderen führenden europäischen Herstellern.

4. Umsetzung

Beinahe alle im Rahmen des schweizerischen Energieforschungsprogramms **Wasserstoff** unterstützten Projekte werden in enger Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie durchgeführt, um einen gleitenden Übergang in eine spätere rein industrielle Entwicklung sicherzustellen. In zwei Fällen sind die durchführenden Firmen schon heute auf dem internationalen Markt tätig. In beiden Fällen erfolgten 1992 wesentliche Restrukturierungen, um die fachliche Basis zu verbreitern und die wirtschaftlichen Perspektiven besser abzusichern. Es kann zurzeit noch nicht beurteilt werden, wie sich diese Restrukturierungen auf die Tätigkeit der Firmen im Rahmen des Forschungsprogramms **Wasserstoff** auswirkt.

Ein weiterer Schritt zur Umsetzung ist dadurch gegeben, dass in zwei Fällen weitgehend unabhängig von Förderung durch die öffentliche Hand Demonstrationsanlagen in Funktion oder im Bau sind. Insbesondere ist hier das Wohnhaus der Familie Friedli in Zollbrück zu erwähnen, welches besonders auch international viel Beachtung findet. Dort wird Wasserstoff durch Nutzung von Sonnenenergie erzeugt, gespeichert, und für den Hausbetrieb (Kochherd, Waschmaschine) wie für den Antrieb eines Fahrzeugs (Kombiwagen) genutzt. Im Berichtsjahr wurde das gesamte System weiter verbessert. Insbesondere ist es gelungen, mit Hilfe eines an der Ingenieurschule Biel entwickelten DC/DC-Wandlers den Wirkungsgrad der Solar-Wasserstoffanlage zu verbessern. Auf diese Entwicklung wird im Überblicksbericht des Programmleiters **Photovoltaik** eingegangen.

Die Firma ATEL (Aare-Tessin AG für Elektrizität) hat in einer Wasserstoff-Demonstrationsanlage eine vollständige Kette von Erzeugung bis Nutzung implementiert. Neben der mit Hilfe des PSI instandgestellten MEMBREL-Elektrolyse-Anlage (mit einer Produktionsleistung von 100 kW, bzw. 20 Normkubikmeter Wasserstoff pro Stunde), Gasreinigung und -kompression auf 200bar und den entsprechenden Speichertanks sind auch zwei Brennstoffzellen installiert worden, in welchen der Wasserstoff mit einer Leistung von je 3 kW in elektrischen Strom umgesetzt wird. Nachdem der reguläre Betrieb 1992 aufgenommen worden ist, konnten im Laufe des Berichtsjahrs 1200 Betriebsstunden akkumuliert werden.

5. Pilot- und Demonstrations-Projekte

Im Rahmen der Förderung von Pilot- und Demonstrations-Projekten im Energiebereich für Bundesbauten wurde im Berichtsjahr ein konkretes Bauprojekt ausgearbeitet mit der Zielsetzung, den für die Wettersonden-Ballone in Payerne benötigten Wasserstoff mit Hilfe von solar erzeugtem Strom aus Wasser herzustellen, anstatt ihn wie bisher aus Gas-Druckflaschen zu beziehen. Mit dem Bau der von der EWI vorgeschlagenen Anlage mit einer autonomen solaren Erzeugung des Wasserstoffs ist 1993 begonnen worden. Das Solarzellenfeld und das Bedienungsgebäude sind erstellt, und die Lieferung der wasserstoffspezifischen Komponenten (Elektrolyseure und Lagertanks) ist anfangs 1994 vorgesehen. Im Frühling soll die gesamte Anlage in Betrieb genommen werden. Der Betrieb soll in den beiden ersten Jahren im Rahmen eines NEFF-Projekts messtechnisch begleitet werden.

6. Geplante Forschungsarbeiten 1994

Im Herbst 1992 wurde der Forschungsrahmen für die Jahre 1992-1995 von der CORE genehmigt. In Übereinstimmung damit werden in allen drei Schwerpunktsbereichen 1993 abgeschlossene Projekte durch Folgeprojekte weitergeführt. Deren genaue Zielsetzungen sind zum Teil bereits festgelegt, zum Teil wird darüber nach Vorliegen der Schlussberichte und Folgeanträge entschieden werden. Insbesondere sollen auch die beiden Industrieprojekte wieder aufgenommen werden, deren Beginn durch die Restrukturierung der beteiligten Firmen verzögert worden ist. Im Rahmen von Studien werden von der Programmleitung aus neue Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten ausgelotet.

Drei Projekte ([5], [6] und [8]) stehen in direktem Zusammenhang mit dem EUREKA-Projekt HYPASSE, und die entsprechenden Arbeiten werden ins Gesamtprojekt eingegliedert. Für die Realisierung des ganzen Schweizer Anteils an diesem Projekt ist zusätzlich ab Frühling 1992 eine wesentliche Unterstützung durch den NEFF bewilligt worden. In diesem Zusammenhang wird auch die für die Elektrizitätswirtschaft interessante Frage weiter untersucht werden, inwiefern sich die in der Schweiz entwickelte Methode der Speicherung in organischen Hydriden für stationäre Sommer-Winter-Speicherung und Wiederverstromung eignet.

7. Liste der Projekte

[1] G.C. Sioli, METKON, *Mendrisio:* ***Sunlyzer (Phasen 1 bis 3)***. (SB)

[2] H. Froidevaux, EPF - *Lausanne:* ***Modélisation de réacteurs de type Alyzer par la méthode des éléments finis***. (JB)

[3] K. Yvon, Uni - *Genève:* ***Synthèse et caractérisation de nouveaux hydrures métalliques ternaires et quaternaires***. (SB Phase 1, JB)

[4] B. Ziegler, SULZER, *Winterthur:* ***H2 Ortho-Para-Konversion***. (SB)

[5] D.W.T. Rippin, ETH - *Zürich:* ***Experimental Investigation of Multimetallic Catalysts for Hydrogen Storage Reactions including Membrane Reactors to reduce Equilibrium Restrictions***. (SB)

[6] D.W.T. Rippin, ETH - *Zürich:* ***Application of Tube and Foil Membranes for Catalytic Dehydrogenation Reactions***. (JB)

[7] K. Marti, HTL - *Burgdorf:* ***Quasi-flüssige Metallhydride als Wasserstoffträger für Automobile***. (SB+JB)

[8] J.Jäger, LARAG, *Wil:* ***Weiterentwicklung des Wasserstoff-Motors für das MTH-System***. (SB)

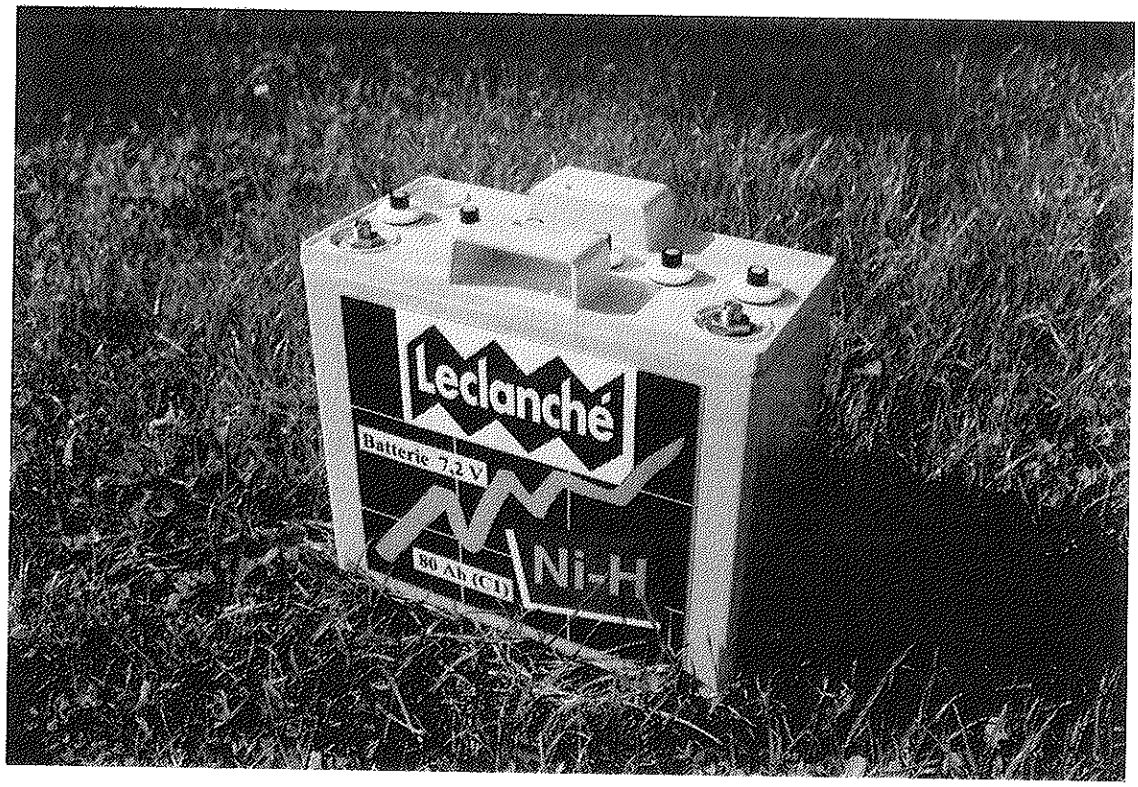
[9] H.Hofer, HTH Verfahrenstechnik, *Winterthur:* ***Abklärung von Einsatzmöglichkeiten des bei der Wasserstoffherstellung anfallenden Sauerstoffs***. (SB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

ELEKTROCHEMIE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: Otto Haas



Nickel-Metallhydrid-Akkumulator für das Elektromobil

Diese 7.2 Volt-Batterie der Firma LECLANCHÉ hat eine Kapazität von 80Wh bei 1-stündiger Entladung. Sie besteht aus 6 Einzelzellen mit Nickel- und Metallhydrid-Elektroden. Die Energiedichte dieser Batterie beträgt bei 5-stündiger Entladung 47 Wh/kg und bei 1-stündiger Entladung 40 Wh/kg.

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1993

Ziel des Programms ist die Entwicklung **elektrochemischer Energiespeichersysteme** mit grosser Energie- und Leistungsdichte für das Elektromobil, die Solarstromspeicherung und den Spitzenstromausgleich. Die thematischen Forschungschwerpunkte wurden bereits im letzten Jahresbericht ausführlich dargestellt. Als Überblick sollen hier nun die im Programm bearbeiteten Batteriesysteme, um die sich die einzelnen Forschungsprojekte gruppieren, aufgelistet werden.

Batterie-System	Motivation	Ziele
Metall/Luft-Batterie	Hohe Energiedichte Billig	Bifunktionelle O_2-Elektrode, Lebensdauer >1000 h Bipolare Zn/O_2-Batterie
Ionentransfer-Batterie	Reine Festkörperbatterie Nächste Batterie-Generation	Kationen-Einlagerung in Metalloxide & elektroaktive Polymere Neue Elektrolytsysteme Raumtemperatur Li -Batterie
Ni/Metallhydrid	Ersatz für Ni/Cd Zusammenarbeit mit der Industrie	50 Ah-Batterie Herabsetzung der Selbstentladung Neue MH_x-Elektroden
Bipolarer Bleiakku	Hohe Leistungsdichte Zusammenarbeit mit der Industrie	Neues Zellkonzept Bipolare Pb / PbO_2-Elektrode

2. 1993 durchgeführte Arbeiten

METALL / LUFT-BATTERIEN

Die Arbeiten zur **Al/Luft-Batterie** konnten im vergangenen Jahr mit der Dissertation M. Rota [18] an der ETH-Lausanne abgeschlossen werden. Am PSI und an der ETH-Lausanne wird nun an der für praktische Anwendungen aussichtsreicheren elektrisch wiederaufladbaren **Zn/Luft-Batterie** [4] geforscht. Bei der Entwicklung der bifunktionellen Sauerstoff-Elektrode konnte bereits ein angestrebtes Ziel (Lebensdauer >1000 h) erreicht werden. Mit zwei am PSI hergestellten porösen Gasdiffusionselektroden konnten in einer Testzelle während ca. 1300 Stunden 130 Zyklen (je 5 Stunden Sauerstoffreduktion und 5 Stunden Sauerstoffentwicklung) durchgeführt werden. Dabei hat sich der zusammen mit dem *Lawrence Berkeley Laboratory* entwickelte platinfreie Perovskit-Katalysator ($La_{0.6}Ca_{0.4}O_3$) recht gut bewährt. Durch Optimierung des Elektrolyten konnten auch Zink-Pasten-Elektroden mit einer Lebensdauer von mehr als 600 Stunden hergestellt werden. Die getesteten Einzelkomponenten wurden bereits in komplette Zn/Luft-Zellen mit einer Elektrodenfläche von 50cm2 eingesetzt. Ein Lebensdauertest dieser Zellen ist im Gang.

Im Zusammenhang mit den Metall/Luft-Batterien sind auch **Simulationsrechnungen** über die elektrochemische Metallabscheidung und -auflösung sowie über die Formänderungen der Elektrode infolge Stromdichte- und Reaktionsverteilungsproblemen von Interesse. An der ETH-Lausanne wurde zu diesem Thema ein *Boundary-Element*-Programm zur Berechnung der Stromdichteverteilung in elektrochemischen Systemen entwickelt und experimentell, unter anderem auch an Hand von Zinkabscheidungen, verifiziert. Dabei wurde löblicherweise auch eine ausführliche Dokumentation für den Gebrauch dieses Programms erstellt, sodass andere Projektleiter dieses Programm auch benützen können [11].

IONENTRANSFER-BATTERIE

Als Grundlage zur Entwicklung von Ionentransfer-Batterien wurden verschiedene Ioneninsertions-Materialien (Metalloxide und elektroaktive Polymere) und die elektrochemische Abscheidung und Auflösung von Magnesium und Alkalimetallen sowie der Ionentransport in **organischen**, zum Teil **polymeren Lösungsmitteln** [3] untersucht. Die Mg^{2+}-Einlagerung in Vanadiumoxid (V_2O_5) und Vanadiumoxidbronzen (z.B. NaV_3O_8) wurde im Hinblick auf die Entwicklung einer **wiederaufladbaren Mg-Batterie** [14] sehr detailliert untersucht. Die reversible Einlagerung von Mg^{2+}-Ionen in diese Oxide ist vor allem bei wasserhaltigen Elektrolyten oder bei Metalloxiden mit etwas Kristallwasser möglich. Dabei können Ladungsdichten von bis zu 380 Ah/kg erreicht werden. In ganz wasserfreien Elektrolyten bestehend aus $MgCl_2/AlCl_3$ in Äthylmethylimidazoliumchlorid-Schmelzen sind in Vanadiumoxid-Bronzen und MoS_2 auch ansprechende Ladungsdichten erreicht worden, wobei diese jedoch mit der Zyklenzahl stark abnehmen und nach etwa 10 Zyklen auf etwa 80 Ah/kg abfallen. Ähnliche Ladungsdichte-Verluste stellt man auch bei der Einlagerung von Alkalimetallen in organische Disulfide fest [3].

Der zweite wichtige Schritt für eine Mg^{2+}-Ionentransfer-Batterie ist die **elektrochemische Magnesiumabscheidung und -auflösung** [10]. Die experimentellen Untersuchungen dazu wurden mit unveränderter Intensität weitergeführt und auf Ende des Berichtsjahres am anorganischen Institut der Universität Fribourg zum Abschluss gebracht. Die sehr umfangreichen Untersuchungen über Löslichkeit, Leitfähigkeit und elektrochemische Eigenschaften von Magnesiumsalzen in verschiedenen organischen, wasserfreien Lösungsmitteln und Elektrolyten ergaben einige interessante Resultate. Es konnten Lösungsmittel und Lösungsmittelkombinationen gefunden werden, in welchen Magnesiumsalze gut löslich und genügend dissoziiert sind, sodass damit Elektrolyte mit einer genügenden Ionenleitfähigkeit hergestellt werden können (z.B. Magnesiumtrifluormethansulfonat oder Mg-Bromid in Dimethylformamid (DMF) und Dimethylacetamid (DMA). In einigen dieser Elektrolyte konnte Magnesium auch elektrochemisch aufgelöst werden. Bei der elektrochemischen Abscheidung des Magnesiums traten aber sehr grosse Schwierigkeiten auf. Zwar konnten in einigen Fällen die Salze elektrochemisch reduziert werden, eine kompakte Magnesium-Abscheidung auf der Elektrode wurde aber in keinem Fall erreicht. Leider sind die Elektrolyte, die normalerweise für die elektrochemische Abscheidung gebraucht werden, nicht verwendbar, weil in diesen reduzierenden Elektrolyten die Gegenelektrode nicht beständig ist. Damit sind im Moment nur die Voraussetzungen für eine primäre Magnesium-Batterie gegeben. Für eine wiederaufladbare Magnesium-Batterie sind die Resultate aber eher entmutigend. Die Projektleitung ist deshalb der Meinung, dass in Zukunft als Anodenmaterial bei Ionentransfer-Batterien Lithium- und Natrium-Elektroden untersucht werden sollten.

Zum Projekt Ionentransfer-Batterien gehören auch die Arbeiten über leitende Polymere und Redoxpolymere. Besonders interessant sind dabei kationentauschende Polymere, weil damit in Kombination mit Li-, Na- und Mg-Elektroden Ionentransfer-Batterien mit sehr kleinem Elektrolytvolumen und deshalb mit hohen Energiedichten gebaut werden können. Im vergangenen Jahr wurden solche Polymere an der Universität Bern [1,2] mit dem **Rastertunnelmikroskop (STM), dem Rasterkraftmikroskop** und mit **Impedanzspektroskopie** weiter untersucht. An Polyanilin konnte in situ die Volumenveränderung der Polymerschicht beim elektrochemischen Redox-Prozess verfolgt werden. Die Resultate zeigen an dünnen, wenig porösen Filmen beim elektrochemischen Redox-Prozess erstaunlich grosse Volumenveränderungen (~30%). Die Struktur und die Ladungsbeweglichkeit von Poly 1-Hydroxyphenazin-Filmen wurden ebenfalls mit STM, *Atomic Force* (AFM) und mit Impedanzspektroskopie charakterisiert. Es zeigte sich, dass durch die elektrochemische Präparationsmethode (zyklische Polarisation oder rein anodische Polarisation) die Struktur und Ladungsbeweglichkeit im Film stark beeinflusst

werden kann [3]. Impedanzmessungen an Polyvinylferrocen-Filmen und deren numerische Simulation erlaubte am PSI die Bestimmung der Elektronendiffusions-Konstante ($1.7 \cdot 10^{-9} cm^2/s$) dieses Polymers. An kationentauschendem sulfoniertem Polyanilin konnten mit der Probe-Beam-Deflection-Methode eindeutig die Kationentauscher- Eigenschaften nachgewiesen werden und mit der Quarzmikrowaage die Ladungsdichte (etwas enttäuschende 80 Ah/kg) experimentell bestimmt werden. An der ETH-Lausanne [6] konnten die bereits in früheren Jahresberichten erwähnten Arbeiten über die **elektrochemische Polymerisation von Polyanilin** in Form einer Dissertation (2) abgeschlossen werden. Die Abklärung der Nukleationsmechanismen und die Möglichkeit der Verdichtung der Polymerstruktur mit Polymerisationsadditiven sind die Highlights dieser Arbeit. Aus der Arbeit geht aber auch deutlich hervor, dass unmodifiziertes (anionentauschendes) Polyanilin für Batterieanwendungen nicht sehr attraktiv ist. In einer Arbeit an der Universität Fribourg [7] konnten durch Polykondensation von 4,4'-Bipyridin und Dibromalkanen interessante **Polymere mit zwei reversiblen Redox-Reaktionen** hergestellt werden, welche in perchlorathaltigen Elektrolyten Kationentauscher-Eigenschaften aufweisen. Die Perchlorationen bilden scheinbar mit dem Polymer ein schlecht dissoziiertes Ionenpaar, für das der Ladungsausgleich besser mit einem Kation erfolgt als mit dem Perchloratanion. Diese Resultate sollen demnächst am PSI mit der Beam-Deflection-Spektroskopie bestätigt werden. Obwohl auch bei diesem Polymer die Ladungsdichte noch nicht umwerfend hoch ist (theoretisch etwa 130 Ah/kg), zeigt diese Untersuchung, dass elektrochemisch aktive Polymere bereits durch die Wahl des Elektrolyten ihre Ionentauscher-Eigenschaften verändern können. Die Literaturstudie über **Redoxpolymere und leitende Polymere mit hoher Energiedichte** [8] konnte abgeschlossen und ein Teil dieser Studie in einem in Bearbeitung stehenden Übersichtsartikel verwendet werden. Erste experimentelle **Prospektivstudien mit schwefelhaltigen Polymeren** wurden am PSI [17] durchgeführt, die von de Jongh so gross angepriesenen Disulfide haben aber nur im ersten Zyklus ansprechende Ladungsdichten ergeben. Die Arbeiten sind noch nicht sehr weit gediehen und können deshalb noch nicht abschliessend beurteilt werden.

Für die Auslegung einer Batterie mit elektroaktiven Polymer-Elektroden sind Simulationsrechnungen der in der Elektrode ablaufenden raum- und zeitabhängigen Vorgänge sehr nützlich. An der Universität Fribourg wurde deshalb ein Computercode für diesen Zweck entwickelt und für eine symmetrische Dünnschichtzelle mit zwei Polymerelektroden und einer ionenleitenden Membrane als Separator getestet [13]. Das Rechenprogramm rechnet die Zeitabhängigkeit des Stroms und der in den Elektroden sich entwickelnden Konzentrations- und Potentialprofile. Die Simulationsrechnungen erlauben eine Vorhersage der erreichbaren Stromdichten für vorgegebene Schichtdicken und Diffusionsparameter. Für Ionentransfer-Batterien ist auch die Forschung auf dem Gebiet der Polyelektrolyte sehr wichtig. Die am PSI durch eine Strahlenpfropftechnik hergestellten protonenleitenden Membranen wurden in Einzelzellen auf das Leistungsverhalten und auf die Lebensdauer getestet. Das Projekt wird nun innerhalb des Programms Brennstoffzellen weiter gefördert. Die Ergebnisse dieses sehr erfolgreichen Projekts sind deshalb im Programm Brennstoffzellen beschrieben. In Zusammenarbeit mit R.W.Murray, *University of North Carolina* [17] wurden **Diffusionsmessungen von Polymermolekülen** (Polyäthylenglykol) in einer Polymerschmelze durchgeführt und die Ionenbeweglichkeiten von darin gelösten Ionen in Abhängigkeit von der Polymerkettenlänge gemessen. Diese Arbeit ergab neue Erkenntnisse über die Vernetzung der Polymerketten durch die im Polymer gelösten Elektrolytsalze. Die Abhängigkeit der Ionenleitfähigkeit von der Polymerkettenlänge zeigt, dass für praktische Anwendungen vorteilhafterweise kurze Polymerketten in einem langkettigen Polymernetzwerk gelöst werden. In diesem System dient das kurzkettige Polymer, welches recht ungehindert zusammen mit koordinierten Ionen durch das grossmaschige Polymernetzwerk diffundieren kann, als effizientes Ionenvehikel.

3. P & D - Projekte

NICKEL / METALLHYDRID-BATTERIEN

Ein Bild und einige Daten der bei der Firma LECLANCHÉ entwickelten **Nickel/Metallhydrid-Batterie** [15] werden auf dem Titelblatt dieses Berichtes präsentiert. Nachdem bereits letztes Jahr mit Einzelelementen hervorragende Zyklenzahlen demonstriert werden konnten, wurde in diesem Jahr eine Batterie mit 80Ah Ladungsinhalt gebaut. Die Batterie besteht aus 6 prismatischen Einzelzellen mit konventionellen Nickel- und Metallhydrid-Elektroden. Erfreulich an den Daten ist vor allem die Tatsache, dass die Energiedichte bei

einstündiger Entladung noch mehr als 80% der Energiedichte fünfstündiger Entladung ausmacht. Dies ist eine Eigenschaft, welche für das **Elektromobil** von grosser Wichtigkeit ist. Der Elektromobiltest im Frühling wird zeigen, was für Schwierigkeiten bei der Serienschaltung von 23 Batterien auftreten werden. Jedenfalls ist es sehr erstaunlich, wie weit das Projekt in so kurzer Zeit bereits gediehen ist.

Das Projekt wird unterstützt von den in Fribourg [16] laufenden Forschungsarbeiten zur Entwicklung von kostengüstigeren und **korrosionsstabileren Legierungen mit grosser Ladungsdichte**. Dieses Projekt ist allerdings kurz vor dem Abschluss, und es stellt sich die Frage, ob ein Folgeprojekt zur Entwicklung von Metallhydriden mit höheren Ladungsdichten >400 Ah/kg in Angriff genommen werden sollte. Mit neuen AB_2-Verbindungen vom Typ $ZrNi_{2-x}V_x$ konnten bereits reversible Kapazitäten von 350-375 Ah/kg erreicht werden. Es konnten auch die ersten in Fribourg hergestellten kobaltfreien AB_5-Legierungen von der Industrie getestet werden. Seit Mitte 1993 werden am PSI auch Arbeiten über den **Selbstentlademechanismus an der Nickeloxidelektrode** dieser Batterie durchgeführt [12]. Dazu wurde ein Messstand mit vier thermostatisierbaren elektrochemischen Zellen mit entsprechender Datenerfassung aufgebaut und erste Selbstentladekurven von elektrochemisch ausgefällten Nickeloxidschichten auf einer Nickelelektrode untersucht. Die aktive Schicht solcher Elektroden sowie von Elektroden, die wir von der Firma LECLANCHÉ erhielten, wurde auch mit *Fourrier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR), Ellipsometrie, Photoelektronenspektroskopie (XPS) und *Probe-Beam-Deflection* (PBD) charakterisiert. Es zeigte sich, dass diese Methoden geeignet sind, um das elektrochemische Verhalten der Aktivschicht detaillierter zu interpretieren. So konnten zum Beispiel mit FTIR α und β $Ni(OH)_2$ unterschieden werden, auf reflektierender Unterlage mit Ellipsometrie die optischen Eigenschaften des ganzen Films und seine Dimensionsänderung untersucht werden und mit photothermischer PBD die optischen Eigenschaften der Filmoberfläche in situ während der elektrochemischen Reaktion oder der Selbstentladungsreaktion verfolgt werden.

BIPOLARER BLEIAKKU

Am BATTELLE in Genf wurde ein **Prototyp eines bipolaren Bleiakkus** mit festgelegtem Elektrolyt gebaut [9]. Dazu wurde eine korrosionsbeständige PbCaSn-Legierung als Trägermaterial verwendet. Die Elektrode wurde dann mit einer von der Firma ELEKTRONA gelieferten Aktivmasse pastiert, nachdem zur besseren Haftung und Kontaktierung beidseitig ein Gitter in das Trägermaterial geprägt wurde. Diese bipolaren Elektroden wurden schliesslich in einer gasdichten Zelle getestet. Mit der Studie konnte die Machbarkeit eines bipolaren Bleiakkus demonstriert werden. Die Batterie ergab die erwartete Spannung und die Kapazität der Summe der Einzelelemente. Enttäuschend war die damit erreichte Leistungsdichte, die in dieser Prototyp-Batterie wesentlich kleiner war als bei einem normalen Bleiakku. Grund für die kleine Leistungsdichte ist ein zu grosser Elektrodenabstand und eine zu dicke Aktivmasse sowie eine nicht optimale Elektrodenstruktur. Zur Erhöhung der Leistungsdichte müsste auch das Gewicht der Trägerstruktur drastisch verringert werden. Das Projekt zeigte, dass im Moment vor allem materialtechnologische Aspekte zu lösen sind. Ein Folgeprojekt müsste von der Industrie definiert werden, da sonst die Gefahr besteht, dass an den praktischen Problemen vorbei geforscht wird.

4. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit ergibt sich automatisch über die verschiedenen Projekte innerhalb des Programms. Es ergeben sich aber auch immer wieder Kontakte zu anderen Programmen, die eine gewisse thematische Überlappung mit dem Programm **Elektrochemie** haben, z.B. Programm **Wasserstoff, Brennstoffzellen, Thermochemie, Photovoltaik, Elektrizität** und **rationelle Energienutzung im Verkehr**. Bei den Arbeiten über Zn/Luft, Membranen für Brennstoffzellen und über Li-Batterien (Ionentransfer-Batterien) bahnen sich auch nationale und internationale Zusammenarbeiten mit der Industrie an. Im vergangenen Jahr konnten mehrere Gespräche mit interessierten Industriellen geführt werden, über die wahrscheinlich im nächsten Jahr berichtet

werden kann. Zur Entwicklung einer effizienten porösen Sauerstoffelektrode und der Zn/Luft-Batterie besteht eine Zusammenarbeit mit dem *Lawrence Berkeley Laboratory* in Kalifornien. Es wurden auch gemeinsame Arbeiten über Polyäthylenglykol mit der *University of North Carolina* durchgeführt. Die europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der elektrochemischen Energiespeicherung wird ferner durch die Beteiligung an der "*Working Party on Electrochemistry*" der "*Federation of European Chemical Societies*" zu fördern versucht. Ferner wurde der Programmleiter Ende Jahr als *Co-chairperson* der *Division Elektrochemical Energy Conversion* gewählt und hat deshalb in Zukunft noch besseren Kontakt zur internationalen Fachwelt. Es besteht auch ein guter persönlicher Kontakt mit regem Informationsaustausch zu den Programmleitern des "*Technology Base Research Project*" des elektrochemischen Forschungsprogramms, welches vom *U.S. Department of Energy* unterstützt wird. Da relativ viele der in den Projekten eingestellten Post-Doktoranden aus dem Ausland rekrutiert werden, ergeben sich auch dadurch neue Kontakte zu ausländischen Instituten.

5. Transfer in die Praxis

Der Transfer in die Praxis ist naturgemäss mit den P&D-Projekten (Metallhydrid/Nickel und bipolarer Bleiakku) am ehesten gegeben. Hier werden gewisse Arbeiten direkt in der Industrie oder mit deren Infrastruktur durchgeführt. Die mehr grundlagenorientierten Arbeiten werden in Form von Publikationen und durch die Organisation von Workshops verwertet. Am 23. September 1993 wurde am PSI das 9. Minisymposium "Elektrochemische Energiespeicherung" durchgeführt.

6. Ausblick für die nächsten drei Jahre

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Ionentransfer-Batterien sollen im nächsten Jahr, wenn möglich mit Industriebeteiligung, in Richtung Li-Batterien, ev. Na-Batterien vorangetrieben werden. Dazu und für die Entwicklung neuer Metallhydrid-Elektroden für die Nickel/Metallhydrid-Batterie sind bereits Forschungsgesuche eingegangen und im Gespräch. Die bei der Firma LECLANCHÉ entwickelte Nickel/Metallhydrid-Batterie wird wahrscheinlich bis Ende 1994 zum Abschluss gebracht. Es ist zu hoffen, dass aufgrund der durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bald eine für das Elektromobil taugliche Batterie auf den Markt gebracht wird.

Die **Polyelektrolytforschung** beschränkt sich zur Zeit auf Untersuchungen von strahlengepfropften und sulfonierten FEP-Folien sowie auf Untersuchungen an Polyäthylenoxid und Polyimiden. Diese Untersuchungen werden am PSI [19] und an der Universität Fribourg [7] durchgeführt.

Die Arbeiten zum **Zellengineering und Modelling** kommen im Verlaufe von 1994 zum Abschluss. Folgeprojekte sind speziell im Rahmen der P&D-Projekte denkbar. Die rein akademischen Vorarbeiten brauchen aber nicht unbedingt weitergeführt zu werden. Im Rahmen des Projektes Zn/Luft-Batterie und der Untersuchung des Selbstentlade-Mechanismus an der Nickelelektrode sind auch Arbeiten auf dem Gebiet der **Katalysenforschung** nötig, welche zur Zeit vorwiegend am PSI [4] durchgeführt werden.

Neue Projekte ausserhalb des erwähnten Rahmens haben des knappen Geldes wegen nur eine Chance aufgenommen zu werden, wenn sie ausgesprochen originell sind und eine sehr gute Erfolgsaussicht haben.

7. Liste der 1993 gelaufenen Projekte

[1] E. Schmidt, Uni - *Bern*: ***Elektrochemische Impedanz-Spektroskopie an stromleitenden und Redox-Polymeren.*** (JB)

[2] H. Siegenthaler, Uni - *Bern*: ***In-situ* Rastertunnelmikroskopie an nichtmetallischen Elektrodensubstraten.** (JB)

[3] O. Haas, R. Kötz, PSI - *Villigen*: NF 20.32504.91: ***Charakterisierung von leitenden Polymeren und Redoxpolymeren".*** (SB)

[4] S. Müller, PSI - *Villigen*: ***Wiederaufladbare Zn/Luft-Batterie.*** PSI-Projekt. (JB)

[5] W. Bührer, ETH - *Zürich*: NEFF478: ***Ionen-Beweglichkeit in Festkörpern und Super-Ionen-leitfähigkeit: Neutronen-Streu-Untersuchungen zum mikroskopischen Verständnis.*** (SB)

[6] M. Grätzel, EPF - *Lausanne*: ***Conductive polymers for rechargeable batteries.*** (JB)

[7] C.W. Schläpfer, Uni - *Fribourg*: ***Anwendung von Polymeren in elektrochemischen Zellen.*** (JB)

[8] K. Müller, BATTELLE - *Genf*: ***Literaturrecherche und Analyse über schwefelhaltige Polymere und Polymere mit kleiner Aequivalentmasse.*** (SB)

[9] R. Schmitt, BATTELLE - *Genf*: ***Bipolare Batterien.*** (JB)

[10] F.P. Emmenegger, Uni - *Fribourg*: ***Elektrochemische Abscheidung von Magnesium aus Raum-temperatur-Schmelzen.*** (JB)

[11] D. Landolt, EPF - *Lausanne*: ***Modellierung von elektrochemischen Systemen angewandt auf die Abscheidung und Auflösung von Metallen.*** (JB)

[12] R. Kötz, PSI - *Villigen*: ***Selbstentladung von Nickel / Metallhydrid-Batterien.*** (JB)

[13] C. Daul, Uni - *Fribourg* & E. Deiss, PSI - *Villigen*: ***Simulation einer Dünnschichtzelle bestehend aus zwei Polymerelektroden.*** (JB)

[14] P. Novák, PSI, *Villigen:* ***Einlagerung von Mg^{2+} aus nichtwässerigen Medien in Metalloxide.*** (JB)

[15] J. Desilvestro, P. Ruetschi, LECHLANCHÉ - *Yverdon*: ***Nickel-Hydrid-Akkumulator.*** (JB)

[16] L. Schlapbach, Uni - *Fribourg*: ***Metallhydride als Elektroden in Batterien.*** (JB)

[17] O. Haas, PSI - *Villigen*: ***Programmleitung Elektrochemie.*** (JB)

[18] M. Rota, PSI - *Villigen* & EPF- *Lausanne* : Dissertation ***Bipolare Al / Luft-Batterie.*** (SB)

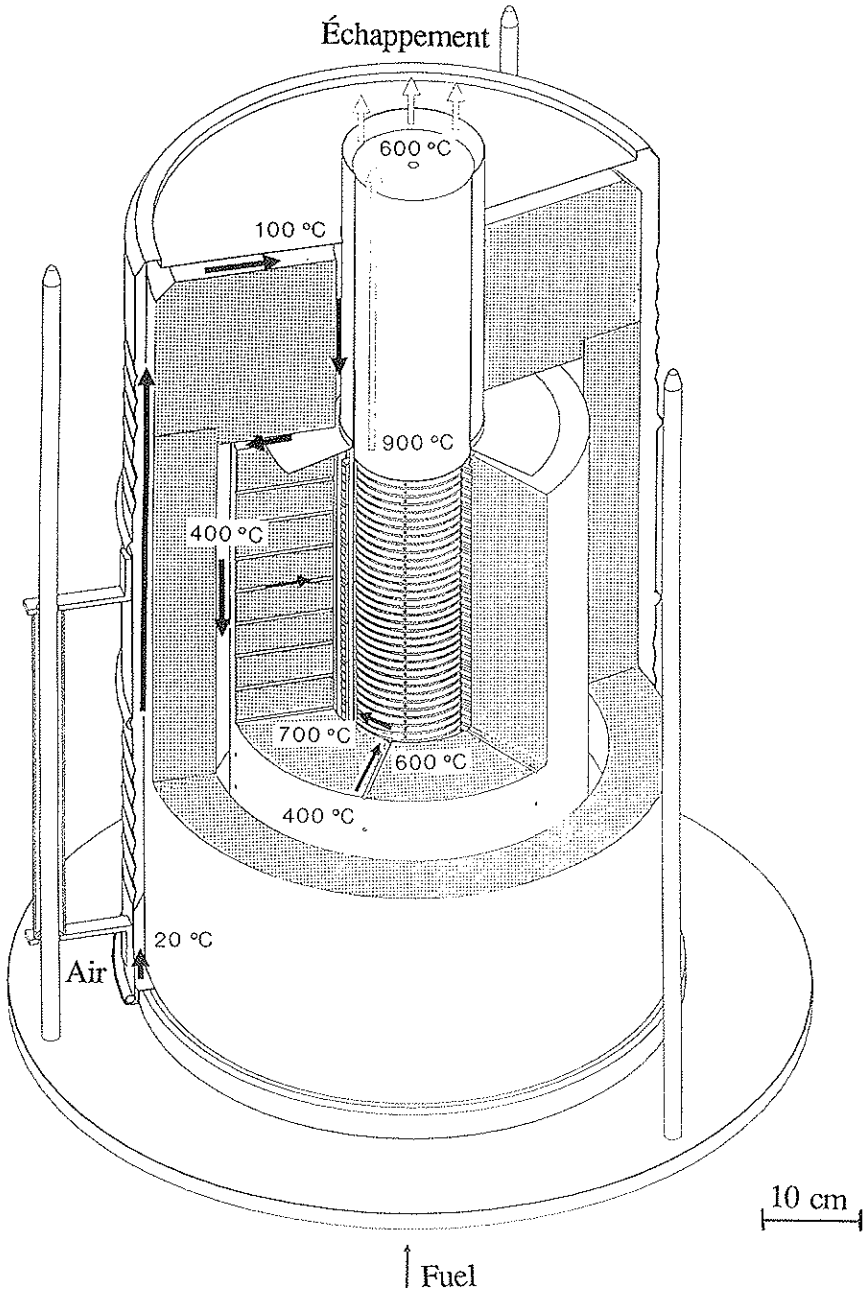
[19] G. G. Scherer, PSI - *Villigen* : ***Material- & Strukturaspekte von Membran-Brennstoffzellen.*** (JB)

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussebricht vorhanden

PILES À COMBUSTIBLE

Rapport de synthèse
sur les activités 1993 du programme de recherche

Chef de programme : Léo Dubal



Le système HEXIS*TM*

Le premier *modèle fonctionnel* de la pile HEXIS *(Heat Exchanger Integrated Stack)* de SULZER Innotec, à Winterthur, a délivré 120 W.

1. Introduction

Une pile à combustible est un appareil transformant par voie électrochimique du fuel (gaz naturel ou méthanol) en électricité, sans émission de NO_x et sans les limitations thermodynamiques propres aux moteurs thermiques (cycle de Carnot). En Suisse, les applications visées sont les installations chaleur-force décentralisées et l'alimentation des véhicules électriques.

La partie active d'une pile à combustible est divisée en un côté "air" et un côté "combustible", séparés par une membrane étanche aux gaz. Lorsque cette membrane est en **céramique-zircone** ou en **polymère**, elle joue le rôle d'un électrolyte: isolant pour les électrons et conducteur pour certains ions (par ex.: O^{--} pour l'électrolyte zircone ou H^+ pour l'électrolyte polymère). L'électrolyte est pris en sandwich entre deux électrodes, la cathode - positive - côté air et l'anode - négative - côté combustible, d'où le nom **PEN** (positif-électrolyte-négatif). Les électrodes sont, elles, interconnectées à des collecteurs de courant délimitant les deux enceintes d'alimentation en gaz. La structure modulaire ainsi constituée délivre, en opération, une tension de l'ordre de 0,5 volt. Par em*pile*ment en batterie (on dira aussi en *stack*), on obtient la tension d'utilisation souhaitée. Notons qu'aucune PEN n'est encore offerte sur le marché qui pourrait servir de référence pour les tests.

Le programme de recherche **Piles à combustible** a fêté cette année ses 5 ans. Dans les activités sur les piles "céramiques" (SOFC, *Solid Oxide Fuel Cell*), il faut se féliciter de l'excellente collaboration avec l'industrie: le projet **HEXIS**^{TM} (*Heat EXchanger Integrated Stack*) de SULZER Innotec, à Winterthur qui vise à la réalisation d'un modèle fonctionnel de pile au gaz naturel de 1 kW joue un rôle pilote. L'ensemble des activités se devant d'être "HEXIS-compatible", le piège des recherches académiques est ainsi clairement évité. L'évènement principal pour 1993 est sans conteste la mise en marche du premier modèle fonctionnel d'un système HEXIS complet. Les activités sur les piles "polymères", à défaut de partenaires industriels, sont solidement ancrées dans les programmes de collaboration internationale.

Le programme P+D (Pilotes et Démonstration) **Piles à combustible** a démarré avec son premier projet: l'installation chaleur-force GAZEL des Services Industriels de Genève. Il s'agit d'une pile à électrolyte liquide (acide phosphorique). Fabriquée par la maison américaine ONSI, elle est alimentée au gaz naturel et sa puissance est de 0,2 MW_{el}. Elle a été mise en opération au printemps. En 6705 heures de fonctionnement en 1993, elle a produit - avec un taux de disponibilité de 92% - un total de 1,3 million de kWh. Le rendement de conversion du gaz en électricité calculé sur le pouvoir calorifique inférieur a été de 41%. Les rejets thermiques ont été partiellement récupérés pour le chauffage d'un bâtiment administratif, ce qui donne un rendement total de 52%. Une utilisation industrielle des rejets de chaleur de la pile est à l'étude (le réchauffement du gaz naturel après le poste de décompression).

2. Objectifs 1993 et accomplissements

Côté **piles céramiques**, il s'agissait en 1993:

- pour le projet **HEXIS**, d'améliorer la technique de contactage entre drains de courant et électrodes afin de permettre la réalisation d'un premier modèle fonctionnel d'une puissance de l'ordre de 400 W: *un modèle fonctionnel équipé d'un stack de 43 éléments (12 cm Ø) - alimenté une partie du temps en méthane reformé - a fonctionné pendant plus de 150 heures en autarcie thermique. Une puissance de pointe de 120 W a été atteinte. Un sous-ensemble de 13 éléments peut être crédité de ce succès. En extrapolant le résultat de ce sous-ensemble l'objectif des 400 W aurait été atteint.*

- pour le projet **Réalisation de PEN HEXIS - compatibles**, de dépasser pendant au moins 200 heures le seuil des 250 mW/cm² à une température maximum de 900 °C. *Cette performance n'a été atteinte qu'avec un échantillon d'une taille encore 100 fois trop petite. Les mécanismes de dégradation commencent cependant*

à être compris et les "remèdes" à être identifiés. Dans ce sens 1993 a été une année extrêmement riche en enseignement: l'efficacité des interfaces de la cathode (côté électrolyte et côté drains de courant) dépend de nombreux paramètres y compris de leur morphologie. Signalons encore qu'il a été possible de fritter des électrolytes de 18 cm Ø et, par ailleurs, de démontrer la faisabilité d'éléments de 12 cm Ø avec la technique VPS, sans interruption du vide.

Côté **piles polymères**, les objectifs étaient:

- développer une membrane par greffe radiative permettant d'obtenir 350 mW/cm² sur une PEN de 6 cm Ø (en opérant sous H_2 /Air à 2-4 bar, T <100°C) ainsi qu'une structure performante pour la plaque bipolaire. *Ces performances ont étés atteintes et dépassées.*

- développer une anode (en polypyrrole) pour l'oxydation directe du méthanol permettant d'obtenir 50 mW/cm² (en opérant sous méthanol+eau / Air à 1 bar, T < 85°C). En outre l'anode devait contenir < 250 µg/cm² de métaux nobles. *Les performances obtenues sont bien inférieures (3* mW/cm²*). Il faudra bien analyser l'échec de cette recherche exploratoire avant de pouvoir définir une nouvelle direction de recherche.*

3. Collaboration internationale

Sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le projet de collaboration dans la recherche sur les **piles céramiques** que la Suisse a lancé est maintenant entré dans sa Phase II. Celle-ci est coordonnée par l'Allemagne. La transition s'est faite sans heurts: l'ancien Agent exécutif, A. McEvoy, a activement soutenu par ses conseils la préparation du 5ème Workshop [9]. Dans la Phase II, la Suisse conduit l'activité sur le diagnostic qui est le pivot de l'ensemble du projet. Un premier atelier sur le développement d'outils pour le diagnostic des *stacks* a été organisé [10]. Une série de mesures effectuées sur un stack HEXIS constitue la première contribution suisse à ce projet [15].

Dans le domaine des **piles polymères** la collaboration internationale sous l'égide de l'AIE a démarré. Le projet AIE permet d'intégrer dans un ensemble cohérent les activités suisses: procédés de fabrication innovatifs pour la membrane et l'anode, structures pour les plaques bipolaires, modélisation des interfaces et techniques de caractérisation. L'Institut Paul-Scherrer (PSI), à Villigen, assume le rôle de *Lead-country* pour les activités AIE concernant les membranes avancées.

Dans le cadre du programme JOULE II des Communautés européennes, les contacts se sont renforcés dans le domaine des piles polymères [7] et aussi celui des piles céramiques [3].

4. Travaux effectués et résultats obtenus en 1993

PILES CÉRAMIQUES

a) Micromodélisation

À l'EPF-Lausanne, la poursuite des travaux exploratoires sur l'effet catalytique de divers métaux déposés par voie chimique à l'interface de l'électrolyte (décapée à l'acide fluorhydrique) et des deux électrodes s'est révélée fructueuse: une température d'environ 850°C semble suffisante pour l'obtention d'une puissance acceptable, supérieure à 250 mW/cm².

La thèse de doctorat [12] sur les mécanismes de réduction de l'oxygène à la cathode des piles céramiques a été défendue avec succès. Bien que qualitatives, ses conclusions éclairent plusieurs aspects mal compris précédemment et constituent une base solide pour les développements futurs. Il ressort en particulier que la morphologie de l'interface électrolyte-cathode joue un rôle important dans la "chimie" à l'interface (processus de catalyse mais aussi d'inhibition dans le cas de formation de phases de mauvaise conductivité).

À l'EPF-Zürich, la thèse de doctorat[13] sur les matériaux à conduction mixte pour piles céramiques a également été défendue avec succès. Des diverses morphologies étudiées, il ressort que la cathode "multi-couche" donne les meilleurs résultats. Elle allie une couche de bonne activité catalytique et de haute conductivité électrique (par ex.: LaSrMnCo) à une couche (par ex.: LaSrMn) dont la compatibilité thermomécanique avec l'électrolyte est satisfaisante.

Dans le cadre de l'évaluation, chez SULZER Innotec, des collecteurs de courant pour le côté air, un modèle a été développé montrant que le champs électrique en condition d'opération accélère la corrosion du collecteur [14]. Ainsi les possibilités toutes nouvelles qu'offre l'alliage DUCROLLOY($Cr_5Fe_1Y_2O_3$) de METALLWERK PLANSEE, Reutte (A), dont le coefficient de dilatation est ajusté à celui de la zircone, sont conditionnées par la capacité de prévenir la formation d'une couche isolante d'oxyde de chrome à l'interface avec l'électrode.

Pour permettre de faire le point du savoir-faire en matière d'anode, un atelier sur ce thème a été organisé au niveau suisse à l'EPFL[11]. Il ressort que l'intimité du contact (le "mouillage") entre le nickel et la zircone est une condition essentielle. Il est suggéré que, dans le procédé *Vacuum Plasma Spray*, c'est l'évaporation du nickel qui produise le bon mouillage.

b) Projet HEXIS

Avec 120W à 960°C, l'objectif de SULZER Innotec [1] de réaliser à fin 1993 un modèle fonctionnel de 400 W a été en grande partie atteint. Ce premier test *électrochimique* au niveau système a été précédé de 3 tests *thermiques*, 40 tests de *stacks*, 120 tests de *PEN*, et 400 tests de *contacts métal-céramique*. Les quarante-trois éléments de 12 cm Ø du *stack* du premier modèle fonctionnel n'ont certes fourni qu'une puissance équivalente à celle de 13 éléments, cependant il a été mesuré que seul un sous-ensemble de 13 éléments a fonctionné comme attendu et que les autres n'ont non seulement rien produit mais encore consommé. Il faut relever que le problème est au niveau des collecteurs de courant: le sous-ensemble opératif avait des collecteurs de courant du même type (MIC = interconnexion métallique, en alliage HAYNES-230). La dégradation des performances au cours des 80 premières heures de fonctionnement a été importante (près des 2/3), ce qui démontre que les MIC doivent encore être améliorés. Les 50 heures d'opération stable à 1% de conversion (puissance électrique de 19 W, pour une puissance d'entrée de méthane reformé de 2200W) démontre l'autarcie thermique du système, malgré le flux d'air important (10 stoïchs) nécessaire au refroidissement. L'essai a été interrompu pour une cause externe au système (disjonction intempestive de l'alimentation du pré-reformeur).

c) Procédés de fabrication

- ***Coulage de bande***

La recherche sur les cathodes à conduction mixte à l'EPF-Zürich a abouti à la fabrication d'une PEN de 1 cm^2 produisant 350 mW/cm^2 à 950°C, avec une cathode bi-couche de 10µm chacune [4]. Il reste à parvenir à reproduire cette PEN pour tester de manière indépendante ses performances.

À l'EPF-Lausanne, des essais sont en cours pour parvenir à fritter des électrodes fonctionnelles sur les électrolytes - *domaine* (avec dépôts catalytiques) développées l'an dernier[3]. Un échantillon de 1,1 cm^2 avec une cathode standard a fourni 500 mW/cm^2 à 840°C. Ce résultat est le meilleur obtenu dans le cadre de ce programme. Cependant après 240 heures de fonctionnement, la dégradation progressive de la cathode avait déjà fait chuter la puissance à 206 mW/cm^2. Il s'agit maintenant de démontrer que l'on peut obtenir les mêmes performances sur un échantillon 100 fois plus grand.

À l'EMPA-Dübendorf, les essais de frittage de bandes vertes en forme de disque HEXIS-compatible ont été couronnés de succès jusqu'à un diamètre de 17,5 cm [6].

- ***Projection sous vide au chalumeau à plasma (VPS, Vacuum Plasma Spray)***

A l'aide du procédé *VPS*, MEDICOAT, à Niederrohrdorf [2], est parvenue, en utilisant de la zircone de plus haute pureté que précédemment, à réaliser des éléments autoportants "HEXIS-compatibles" de 12 cm Ø. Ces éléments sont fabriqués à partir d'un disque de feutre métallique découpé au laser qui est recouvert par VPS d'électrodes et d'un électrolyte, sans interruption du vide. Concernant la puissance, un petit échantillon a donné 230 mW/cm^2 à 910°C et concernant la durée de vie un échantillon de 4,5 cm^2 testé sur le banc d'essai chez SULZER-Innotec, délivrait encore 90 mW/cm^2 après 500 heures d'opération à 920°C. Il a aussi été possible de déposer un collecteur de courant métallique sur un échantillon de 3 cm Ø, mais un alliage approprié doit encore être identifié pour cette technique d'intégration du collecteur. La première tentative de fabriquer un échantillon de 12 cm Ø a été couronnée de succès: bien que la puissance spécifique soit encore faible (60 mW/cm^2), la stabilité est très prometteuse.

- ***Cathode par évaporation cathodique (EBE, Electron Beam Evaporation)***

BATTELLE-Genève [5], sur la base du savoir-faire acquis il y a une quinzaine d'années en matière de cathode, a tenté de réaliser par *EBE* des dépôts de couches catalytiques et de cathode à conduction mixte de $(In_2O_3)_{0,96}(SnO_2)_{0,04}$ sur des électrolytes commerciaux pré-frittés. L'objectif minimum de 200 mW/cm^2 (à 900°C, avec anode de platine) avait pu être atteint l'an dernier, en l'absence de couches catalytiques. L'addition d'une sous-couche soit de cérine, de rutile ou d'oxyde de praséodyme n'a apporté aucune amélioration. Cette étude exploratoire se conclut donc par un échec.

d) Caractérisation électrochimique des structures PEN

Les deux bancs d'essai de l'EPFL ont permis de caractériser les performances électrochimiques de nombreux échantillons, et de participer aux activités de standardisation (*Round Robin Test*) dans le cadre AIE [3].

e) Caractérisation structurelle

L'EMPA a effectué diverses analyses structurelles d'électrolytes de géométrie HEXIS [6]. La production d'électrolytes déjà mentionnée permet de disposer d'un nombre d'échantillons suffisant pour développer une méthode fiable de caractérisation thermo-mécanique, l'une des activités du projet AIE. Des quatre méthodes comparées, celle utilisant des anneaux concentriques (*ring-ring*) donne les résultats les plus compatibles avec une distribution de Weibull. L'étude fractographique montre qu'en répartissant les contraintes mécaniques sur un plus grand volume, la méthode *ring-ring* est la moins sensible aux variations locales des défauts. Elle livre donc la résistance à la rupture la plus faible. La soumission des échantillons à 30 cycles thermiques n'a pas généré d'effets décelables.

PILES POLYMÈRES

a) Procédé de fabrication des membranes

L'électrolyte greffé du PSI, une fois montée entre deux électrodes commerciales donne de meilleurs résultats que le NAFION®. La puissance obtenue à ce stade des travaux pour une PEN de 6 cm Ø alimentée sous 3 bar avec de l'hydrogène et de l'oxygène à 60°C est de 690 mW/cm^2 [7]. L'effet de contamination de l'hydrogène en CO devra être évalué, la charge de platine devra être réduite à 800 µg/cm^2 (5 fois plus actuellement), la taille passer à 20 cm^2 et la durée de vie dépasser 300 heures.

b) Caractérisation électrochimique des structures PEN

Le banc d'essai du PSI est polyvalent et permet d'effectuer toutes les caractérisations nécessaires au succès des recherches prévues [7]. Une asymétrie des membranes DOW a pu être mise en évidence. Son effet suspecté sur le "choix anode ou cathode" reste à établir.

c) Procédé de fabrication des anodes à conversion directe

Les Universités de Genève et Neuchâtel [8] ont conjugué leur savoir-faire pour tenter de développer une anode en polypyrrole pour l'oxydation directe du méthanol. Cette anode contient, en dispersion extrêmement fine, un mélange ruthénium-platine. Avec moins de 250 $\mu g/cm^2$ de métaux nobles, le but qui était d'obtenir une PEN de 6 cm Ø, alimentée avec un mélange méthanol / eau à 70-85 °C, délivrant 50 mW/cm^2, n'a cependant pas pu être atteint. Les progrès enregistrés dans la dispersion de très fines particules (~50 nm) de platine, même s'ils ne devaient pas être suffisants pour permettre la conversion directe, pourraient cependant profiter à la conversion indirecte.

5. Activités pour 1994

a) Opération au gaz naturel

En 1993, SULZER Innotec a utilisé, pour alimenter son premier modèle fonctionnel, un préreformage de méthane. Il s'agira de passer au gaz naturel et d'atteindre la puissance de 1 kW. Par ailleurs, il s'agira d'intégrer le préreformage à l'enceinte thermique des modèles fonctionnels de la classe de 7 kW.

b) Diagnostic in situ

Les activités qui viennent de commencer sur les outils pour le diagnostic devront être adaptées pour intégrer ces outils aux stacks qui seront construits.

c) Nouveaux procédés

Pour les collecteurs de courant, les possibilités d'utilisation du nouvel alliage DUCROLLOY devront être étudiées plus en détail (en autre pour le procédé VPS) afin d'évaluer le coût-bénéfice effectif de cette invention. Dans cette perspective, le problème à résoudre est d'incorporer une barrière de diffusion au chrome pour prolonger la durée de vie des PEN.

Des structures innovatives pour les cathodes devront être développées, aux EPF, pour augmenter la compatibilité avec les collecteurs de courant. Les essais chez SULZER Innotec de développement d'interconnexions métalliques "MIC" en DUCROLLOY de géométrie optimisée devront être conduits à maturité. Par ailleurs, un collecteur de courant métallique devrait être intégré d'ici fin 1994 à la cathode des éléments de pile à support poreux que tente de développer l'EPF-Z.

d) Piles polymères

Les activités prévues au PSI jusqu'à l'été sont le développement d'une PEN de 100 cm^2 donnant 350 mW/cm^2 (H_2/air, 5 bar), après réduction de la charge de platine des électrode à 1 mg/cm^2, et l'étude exploratoire de l'effet de la contamination du fuel en CO. Pour faire le point sur les priorités à donner à l'avenir, un atelier sera organisé en mars 1994.

6. Information

Le groupe de travail **Piles à combustible** fonctionne depuis bientôt 6 ans. Il permet la confrontation fertile d'expertise et de savoir-faire pour l'avancement accéléré des travaux, et joue un rôle de diffusion rapide et continue de l'information des milieux concernés. Il est ouvert aux personnes prêtes à partager leur expertise dans un climat de confiance mutuelle. À l'avenir, pour alléger les séances du groupe de travail et promouvoir la meilleure participation possible de chacun, il est considéré d'organiser des sous-groupes de travail *adhoc*. Par ailleurs, en plus de la tenue annuelle d'un atelier AIE, un atelier "suisse" est organisé sur un thème spécifique.

7. Liste des projets en cours en 1993

[1] R. Diethelm, SULZER Innotec, *Winterthur:* ***SULZER-HEXIS SOFC SYSTEM.*** (RA+[14, 15])

[2] H. Gruner, MEDICOAT, *Niederrohrdorf:* ***HEXIS-kompatible PEN Strukturen durch VPS.*** (RA)

[3] A. McEvoy et al., ICPII / EPF - *Lausanne:* ***Piles céramiques avancées.*** (RA +[12])

[4] K. Sasaki et al., NMW / ETH - *Zürich:* ***Mixed-conducting Cathode Materials for SOFC.*** (RA +[13])

[5] J.-P. Issartel, BATTELLE, *Genève:* ***Cathode EBE à conduction mixte.*** (RA +RF)

[6] B. Gut et al., EMPA, *Dübendorf:* ***Charakterisierung der strukturellen Stabilität von PEN.*** (RA)

[7] G. Scherer, PSI, *Villigen:* ***Material- und Strukturaspekte von Membran-Brennstoffzellen.*** (RA)

[8] J. Augustynski, Uni - *Genève:* ***Anodes pour l'oxydation directe du méthanol dans une PEFC.*** (RA)

(RA) rapport annuel 1993 disponible
(RF) rapport final disponible

8. Références

[9] ***SOFC Materials, Process Engineering and Electrochemistry,*** Proceedings of the 5th IEA SOFC Workshop, March 2-4, 1993, *Jülich* (D), ed. KFA Jülich 1993.

[10] ***Instrumentation & In-situ Diagnostics,*** Proceedings of the IEA SOFC activity meeting, June 16-17,1993, *Chexbres* (CH), ed. KFA Jülich 1993.

[11] ***SOFC Anode for the future,*** Workshop, February 3rd, 1993, *Lausanne,* ed. EPFL 1993.

[12] J. Van herle, EPF - *Lausanne*: ***Oxygen Reduction Reaction Mechanisms at SOFC Cathodes,*** Dissertation EPFL N°1187, 1993

[13] K. Sasaki, ETH - *Zürich*: ***Phase Equilibria, Electrical Conductivity and Electrochemical Properties of ZrO_2-In_2O_3***, Dissertation ETHZ N°10331, 1993

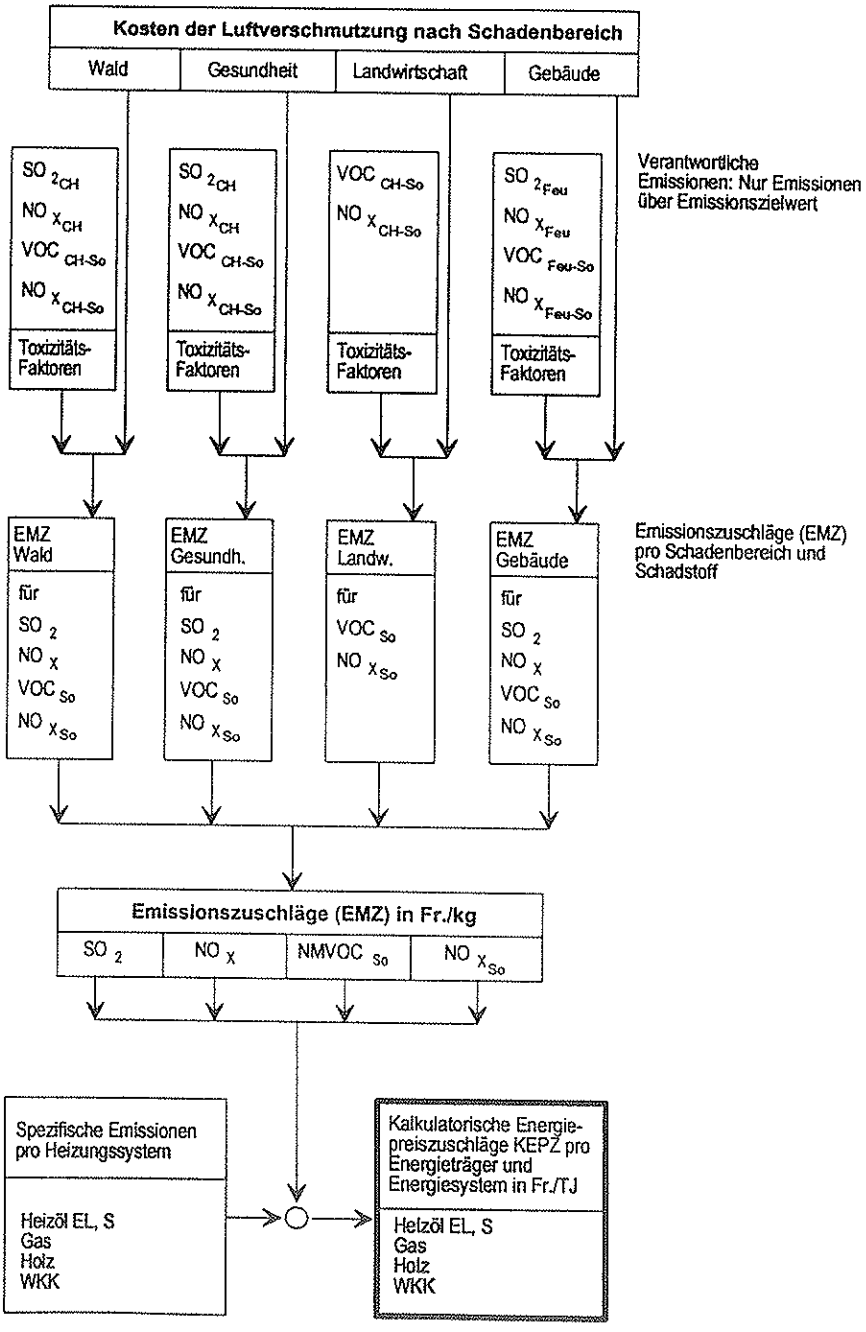
[14] E. Batawi, K. Honneger, R. Diethelm, SULZER Innotec: ***Factors Influencing the Degradation Performance of High Temperatures SOFC Contacted with Metallic Bipolar Plates*** (Contribution to the 6th IEA SOFC Workshop, Febr. 22-24, 1994, *Roma).*

[15] R. Haag, K. Honneger, SULZER Innotec: ***HEXIS-in-situ Diagnostics of Stack Tests*** (Contribution to the 6th IEA SOFC Workshop, Febr. 22-24, 1994, *Roma).*

SOZIOÖKOMIE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1993

Programmleiter: W. Baumgartner



Energiepreiszuschläge

Die Figur zeigt das Vorgehen zur Ermittlung von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen für verschiedene Heizsysteme. *Es bedeuten*: CH: *Gesamtemissionen Schweiz*, Feu: *Feuerungsemissionen Schweiz*, So: *nur Sommeremissionen*.

1. Programmübersicht

Das Thema der **sozio-ökonomischen** Energieforschung überdeckt ein weites Feld: Neben sozio-ökonomischen Fragestellungen im engeren Sinn werden auch psychologische, statistische, ökologische und technisch-ökonomische Fragen einzeln oder in wechselnden Kombinationen untersucht. Das sozio-ökonomische Energieforschungsprogramm des BEW dient zudem als Plattform für jene Themen, die in andern BEW-Programmen kein geeignetes Gefäss finden. Im Rahmen der sozio-ökonomischen Energieforschung werden neben aktuellen energiepolitischen Problemen auch Fragen angegangen, die über die unmittelbare Aktualität hinausweisen. Idealerweise stehen Forschungsresultate zu bestimmten Themen dann zur Verfügung, wenn sie von der Politik oder - im weitesten Sinne - von der Gesellschaft "gebraucht" werden und nicht erst geraume Zeit später. Selbstverständlich wird sich die energiepolitische Aktualität der Planung (vergl. das Konzept der sozio-ökonomischen Energieforschung [28]) immer wieder entziehen.

Die vorliegenden Ausführungen streben - schon aus Platzgründen - keinen Ueberblick über die gesamte sozio-ökonomische Energieforschung in der Schweiz an. Sie beschränken sich auf jene Bereiche und Projekte, mit denen der Programmleiter direkt oder indirekt zu tun hat.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1993

Im Berichtsjahr hat sich die Forschung hauptsächlich zwei Schwerpunkten gewidmet. Zum einen wurden in einer breitangelegten Untersuchung die externen Kosten im Strom- und Wärmebereich ermittelt und im Sinne von kalkulatorischen Energiepreiszuschlägen auf die Energiepreise umgelegt. Der andere Schwerpunkt betrifft die Arbeiten im Zusammenhang mit der Modellierung der Energienachfrage. Bis Mitte 1994 sollen darauf basierend neue Energie- und CO2-Perspektiven erarbeitet werden.

Weitere wichtige Arbeiten betreffen die Erarbeitung von Oekoinventaren für die End- und Nutzenergiebereitstellung sowie die Quantifizierung von Energie- und Stoffflüssen für Bauteile und Gebäude. Gesamthaft wurden - von Kleinaufträgen abgesehen - elf neue Studienaufträge erteilt.

Es folgt eine knappe Übersicht über die durchgeführten Arbeiten und die im Berichtsjahr erreichten Ergebnisse. Die thematische Gliederung folgt derjenigen des Konzeptes der sozio-ökonomischen Energieforschung.

DATEN

Die Verfügbarkeit von guten Grundlagen-Daten ist für viele Themen der sozio-ökonomischen Forschung zentral. Solange es sich um "klassische" Statistik-Daten (Wohnbevölkerung, Bruttoinlandprodukt, Gesamtenergieabsatz, etc.) handelt, ist die Situation in der Schweiz recht komfortabel; ansonsten ist die Datenlage - vor allem bei Energieverbrauchsdaten - eher schlecht.

In einem ersten, im Berichtsjahr abgeschlossenen Projekt [1] ging es denn auch um die Analyse des **Heizölpanels**. Das Heizölpanel umfasst etwa 500 repräsentativ ausgewählte Heizölverbraucher, aus welchen über eine Hochrechnung auf den gesamtschweizerischen Jahresverbrauch geschlossen wird. Der Schlussbericht enthält die Darstellung des Panels, eine kritische Analyse der angewandten Hochrechnungsprozeduren, mögliche Verbesserungen sowie Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

Ein anderes Projekt des gleichen Studiennehmers [2] hatte zum Ziel, die **Entwicklung des Stromverbrauchs 1975 - 1992 im Dienstleistungssektor der Stadt Zürich** zu analysieren und die Möglichkeiten der modellmässigen Erfassung zu klären. Ausgehend von den Verbrauchsdaten des städtischen Elektrizitätswerkes wurden hierzu - unter Wahrung der Anonymität auf Firmenebene - die Branchen bzw. Branchengruppen **Banken, Versicherungen/Büros, Handel, Schulen und Gesundheitswesen** im Detail untersucht. Mit Blick auf die Modellierung des Dienstleistungssektors zeigte sich unter anderem, dass die bisher in der Schweiz übliche enge Verbindung der

Elektrizitätskennzahl mit dem Bau- und Renovationsjahr der Gebäude für die jüngste Entwicklung des Stromverbrauchs nicht mehr genügt. Es wird deshalb eine Elektrizitätskennzahl vorgeschlagen, die sich aus zwei Teilen zusammensetzt: Der erste Teil ist mit dem Gebäude verbunden, der zweite Teil berücksichtigt den Benutzereinfluss, die Regulierung der Hausinstallationen und die Veränderung im Gerätebestand.

In ökologischen Bilanzbetrachtungen spielt die Umweltbelastung durch die Energiebereitstellung und den Energieverbrauch eine zentrale Rolle. Bisher gab es für die wichtigsten Energieketten und -prozesse keine auf die schweizerischen Verhältnisse zugeschnittene, nach einheitlichen Kriterien erarbeitete Datenbasis. Im Rahmen eines mehrjährigen Projekts **Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung** [3] wurden die in Boden, Wasser und Luft emittierten Schadstoffmengen sowie weitere Umweltfaktoren pro Einheit Energie ermittelt. Der umfangreiche Schlussbericht (1800 Seiten) wird in Kürze unter dem Titel **Ökoinventare für Energiesysteme** veröffentlicht. Alle Daten werden auch auf Diskette verfügbar sein. Im Rahmen eines Nachfolgeprojektes wird die erarbeitete Datenbasis fortlaufend aktualisiert und ergänzt. Zudem soll an der ETH-Zürich auf Anregung der **Koordinationsgruppe des Bundes für Energie- und Ökobilanzen** eine Anlaufstelle für Fragen im Bereich der Energie- und Stoffflussanalysen geschaffen werden. Einige wichtige Lücken im Ökoinventar, so etwa im Transport- und Entsorgungsbereich, werden durch neue Projekte im Rahmen des **SPP Umwelt** geschlossen.

Das Paul Scherrer Institut ist zur Zeit mit dem Grossprojekt **Ganzheitliche Erfassung von Energiesystemen** (GaBE) befasst. Ein Teil dieser Aktivitäten betrifft die **vergleichende Untersuchung von Grossunfällen im Energiebereich** [4]. Das anfangs 1993 gestartete Projekt bezweckt u. a. die Errichtung einer Datenbank über schwere Unfälle im Energiebereich. Im Berichtsjahr wurde ein Prototyp der Datenbank geschaffen, welcher bereits etwa 2300 Ereignisse enthält. Darüber hinaus sind verschiedene probabilistische Methoden auf schwere Kernenergieunfälle angewendet worden. Ein Ziel hierbei ist es, ausgehend von sogenannten *Level-III-PSA's* die den schweren Unfällen anzulastenden externen Kosten zu schätzen.

Energie- und Stoffbilanzen von Bauteilen und Gebäuden sind das Thema einer weiteren Studie im Energie- und Ökobilanzbereich [5]. Ausgehend von Arbeiten über den Energieaufwand und die Umweltbelastung von Niedrigenergiehäusern werden die Energie- und Stoffflüsse von Bauteilen und Gebäuden während ihrer gesamten Lebensdauer (von der Produktion bis zur Entsorgung) ermittelt. Bereits im Vorjahr wurden der Leitfaden mit **Regeln zur Datenerfassung für Energie- und Stoffflussanalysen** sowie das Handbuch über **Methodische Grundlagen für Energie und Stoffflussanalysen** überarbeitet und publiziert. Im Berichtsjahr wurde an einem Workshop ein darauf basierendes EDV-Hilfsmittel zur Erstellung von Energie- und Stoffbilanzen vorgestellt. Das Programm beinhaltet einen Standarddatensatz für die wichtigsten Baumaterialien. Letztlich ist es das Ziel des Projektes, Energie- und Stoffdaten in die Elementgliederung des CRB zu integrieren. Der Schlussbericht, der etwa 400 CRB-Elemente enthält, soll in Kürze veröffentlicht werden. Im Rahmen eines Nachfolgeprojektes ist geplant, mit Unterstützung des Amtes für Bundesbauten binnen Jahresfrist ein allgemein anwendbares Planungsinstrumentarium zu schaffen, mit dessen Hilfe Kosten sowie ökologische und energetische Aspekte simultan optimiert werden können.

In Ergänzung zu dieser EDV-basierten Integration von ökologischen Erkenntnissen in den Bauprozess soll 1994 im Rahmen eines weiteren, breit abgestützten Projektes ein Handbuch geschaffen werden, welches dem Praktiker erlauben soll, bei der Auswahl von Hochbaukonstruktionen auf einfache Weise auch ökologische Gesichtspunkte einfliessen zu lassen.

Schliesslich beteiligt sich das BEW an einem mehrjährigen Projekt zur Untersuchung des **Zusammenhangs zwischen Treibhausgasen und Klima** mittels Analysen von grönländischen Eiskernen [6]. Als bisher grösste Überraschung muss die Erkenntnis gelten, dass die letzte Zwischeneiszeit offenbar von mehreren katastrophalen Kaltphasen unterbrochen war. Daraus scheint sich die Folgerung zu ergeben, dass das in der gegenwärtigen Warmperiode bereits seit 8000 Jahren währende stabile Klima eher die Ausnahme darstellen könnte und dramatische Klimaschwankungen auch bei warmem Klima möglich, vielleicht sogar die Regel sein könnten. Offen ist, was dies für die Auswirkungen des Treibhauseffektes bedeutet. Das Projekt soll Ende 1994 abgeschlossen werden.

MODELLE UND PERSPEKTIVRECHNUNGEN

Die im Berichtsjahr durchgeführten Modellarbeiten kreisen um zwei Schwerpunkte: Einerseits geht es um die Modellierung der Energienachfrage in Abhängigkeit von bestimmten sozio-ökonomischen Rahmendaten (Energiemodelle), andererseits geht es um die volkswirtschaftlichen Auswirkungen von energiepolitischen Massnahmen (Gleichgewichtsmodelle).

Für die (neue) **Modellierung der Energienachfrage** wurden verschiedene Ausschreibungsrunden durchgeführt. Zunächst ging es darum, die Managementgruppe zu bestimmen, welche für die Gesamtkoordination der Arbeiten verantwortlich zeichnet [7]. Dann folgten für die Verbrauchssektoren Industrie, Haushalte, Dienstleistungen und Verkehr weitere Ausschreibungsrunden. Die schliesslich ausgewählten Studiennehmer ([8], [9], [10] und [11]) haben alle mit ihren Arbeiten begonnen, so dass die neuen Perspektiven plangemäss Ende Juni 1994 vorliegen sollten. Zusätzlich zu den bereits genannten Studiennehmern sind für die Bereitstellung von gebäudebezogenen Inputdaten und von volkswirtschaftlichen Rahmendaten weitere Aufträge erteilt worden ([12] und [13]). Für die Modellierung wird in allen Verbrauchssektoren ein Bottom-up-Ansatz verfolgt, d. h. man geht grundsätzlich von den einzelnen energieverbrauchenden Geräten, Motoren, Fahrzeugen, Anlagen etc. aus und rechnet hoch auf die gesamte Schweiz. Dadurch wird es u. a. möglich, die Wirkung technisch orientierter Massnahmen (etwa Vorschriften zum spezifischen Energieverbrauch) abzubilden.

Die Modellierungs- und Perspektivarbeiten werden in enger Abstimmung mit dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und dem Stab für Gesamtverkehrsfragen (GVF) durchgeführt. Die Begleitung obliegt einer **Arbeitsgruppe Energieperspektiven**; Mitglieder sind neben Vertretern des BEW, des BUWAL und des GVF auch unabhängige Experten.

Im übrigen wurde intensiv an zwei Projekten über den **Einsatz und die Weiterentwicklung von (berechenbaren) Gleichgewichtsmodellen** gearbeitet ([14] und [15]). Gleichgewichtsmodelle dienen unter anderem dazu, die volkswirtschaftlichen Auswirkungen bestimmter Massnahmen und Veränderungen (z. B. Steuern, Abgaben, Wechselkurse) vorherzusagen. Sie zeigen etwa die Veränderungen in den Wachstumsraten einzelner Branchen, ermitteln die Einnahmen des Staates und der Haushalte oder zeigen Verteilungseffekte auf. Darüber hinaus können Gleichgewichtsmodelle auch für Konsistenzchecks der Resultate von Energienachfragemodellen eingesetzt werden. Während das erste Projekt den Schwerpunkt auf die volkswirtschaftlichen Wirkungen von Energie- oder CO_2-Abgaben legt, thematisiert das zweite Projekt vor allem die Verteilungswirkungen. Im Berichtsjahr wurde im übrigen eine für 1990 gültige *Input-Output*-Tabelle erstellt. Diese Tabelle zeigt in Form einer Matrix die gegenseitigen Verflechtungen der 42 unterschiedenen Produktionssektoren. Beide Projekte sollen bis Mitte 1994 abgeschlossen werden.

KOSTEN- UND WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSEN

Das Auftreten von Externalitäten gehört zu den wichtigsten Beweggründen für staatliche Eingriffe im Energiebereich. Insofern diese Externalitäten als Emissionen in Erscheinung treten, werden sie im Rahmen der Energieforschung des BEW durch Projekte im Energie- und Ökobilanzbereich abgedeckt (vergl. die Projekte [3] und [5]). Über die mit diesen Emissionen verbundenen Kosten (etwa durch die damit verursachten Schäden) wird aber nichts ausgesagt. Diese Lücke wird durch die zusammen mit dem AfB und dem BfK finanzierten Studie **Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung** [16] geschlossen: Ermittelt wurden die externen Kosten der Luftverschmutzung (Waldschäden, landwirtschaftliche Produktionsausfälle, Gesundheitsschäden, Gebäudeschäden), die externen Kosten der ölbedingten Meeres- und Bodenverschmutzung, die Kosten des Treibhauseffektes (primär über einen Vermeidungskostenansatz) sowie die externen Kosten der Elektrizitätsproduktion und -verteilung (Beeinträchtigung von Gewässern und der Landschaft, Grossrisiken bei Kernkraftwerken und Staudämmen). Differenziert nach Energieträger und nach Energiessystemen werden daraus kalkulatorische Energiepreiszuschläge in Rp./kWh berechnet, welche den monetarisierten externen Kosten entsprechen. Da in die Quantifizierung der externen Kosten viele Unsicherheiten eingehen, werden für die resultierenden Energiepreiszuschläge nicht einzelne Werte, sondern Bandbreiten angegeben. Die Zuschläge, die sich aus den Risiken eines Kernkraftwerkunfalls oder eines Staudammbruches ableiten, werden separat ausgewiesen. Die in der

Studie ermittelten Zuschläge können - mit bestimmten Einschränkungen - für eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendet werden, um die externen Kosten bei Investitionsentscheiden zu berücksichtigen. Die Veröffentlichung der Studie (Synthesebericht und Arbeitsdokumente) ist auf Frühling 1994 vorgesehen. Zusätzlich ist geplant, eine Populärfassung zu erstellen (Zeithorizont: Ende 1994).

MASSNAHMEN

Bei der Untersuchung von energiepolitischen Massnahmen stehen folgende Fragen im Vordergrund: Wie sehen die Massnahmen konkret aus? Wie sollen sie eingeführt werden? Mit welchen Wirkungen und Nebenwirkungen ist zu rechnen?

Die neue SIA-Empfehlung 380/4 "Elektrische Energie im Hochbau" befindet sich zur Zeit in Erprobung. Sie sieht vor allem für hochtechnisierte Gebäude im Dienstleistungssektor energetische Anforderungen vor. Mit einer seit 1992 laufenden Untersuchung [17] sollen u. a. die gesamtschweizerisch zu erwartenden **Elektrizitätseinsparungen abgeschätzt** werden. Darüber hinaus werden Hinweise darauf erwartet, inwieweit im Dienstleistungssektor die Energiebezugsfläche als Hochrechnungsparameter für die Energiemodellierung geeignet ist. Nach einer ersten statischen Abschätzung der gesamtschweizerisch zu erwartenden Elektrizitätseinsparungen hat sich gezeigt, dass der Geltungsbereich der Empfehlung sinnvollerweise auf andere Gebäudekategorien ausgedehnt werden sollte. Der zuständigen SIA-Kommission wurden entsprechende Vorschläge gemacht. Das Projekt wurde in der Folge zeitlich so verlängert, dass auch die überarbeitete Empfehlung auf ihre Wirkungen untersucht werden kann.

In einer weiteren Studie geht es um die mutmasslichen **Wirkungen einer ökologischen Steuerreform** [18]. Zu beantworten sind die folgenden Fragen: Wie wirkt sich eine dynamische, d. h. eine schrittweise sich bis auf das Mehrfache des heutigen Energiepreises erhöhende Energiesteuer auf die internationale Wettbewerbsfähigkeit der schweizerischen Wirtschaft aus? Welche Optionen bestehen, um allfällige negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Branchen zu kompensieren, wenn die Schweiz eine solche Steuer im Alleingang einführt? Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zunächst die Determinanten der Wettbewerbsfähigkeit von Branchen und Unternehmen definiert. In einem zweiten Schritt ging es darum, die wettbewerbssensitiven Branchen zu identifizieren. Im letzten noch bevorstehenden Schritt werden nun alternative Vollzugsmodelle entwickelt, um eine Reduzierung oder Neutralisierung der wettbewerbsverzerrenden Einflüsse der Energiesteuer auf diese Branchen zu erreichen.

In einer auch von der Stadt Schaffhausen unterstützten Serie von Studien ([19], [20], [21] und [22]) ging es darum, für das städtische **Elektrizitätswerk** die Möglichkeiten auszuleuchten, wie sich dieses am Markt als ein **Energie-Dienstleistungsunternehmen** positionieren könnte. Ausgangspunkt der Untersuchung war die Idee, dass mit der Anwendung des sogenannten Least-Cost-Planning bei gleicher Energiedienstleistung gesamthaft geringere Kosten resultieren könnten. Ob dies tatsächlich möglich ist, sollte anhand der konkreten wirtschaftlichen und politischen Gegebenheiten in der Stadt Schaffhausen geprüft werden. Die bereits abgeschlossene Untersuchung kam zum Schluss, dass im Vergleich zu den Beschaffungskosten von zusätzlicher Elektrizität eine ganze Reihe von Massnahmen ("Energiedienstleistungen") als wirtschaftlich anzusehen sind. Der ausführliche Schlussbericht ist in Kürze verfügbar.

INTERDEPENDENZEN

In diesem Themenbereich geht es um "systemübergreifende Fragen", wie etwa die Einbettung der Schweiz in einen internationalen Kontext, die Folgen heutiger Entscheidungen für künftige Generationen (Technikfolgenabschätzung) oder die Bewertung von Risiken.

Im Rahmen des Polyprojektes **Risiko und Sicherheit technischer Systeme** unterstützt das BEW ein Teilprojekt zur Risikobewertung [23]: Gemäss der neuen Störfallverordnung (StFV) müssen die dieser Verordnung unterstellten Betriebe die Vollzugsbehörde über die von ihnen ausgehenden Risiken informieren. Das Vorgehen zur Beurteilung dieser Informationen (Was ist ein tragbares Risiko? Was ist kein tragbares Risiko?) ist noch offen. Umso mehr interessiert, inwieweit der im Handbuch I zur StFV enthaltene Beurteilungsvorschlag auch auf die

Energiewirtschaft übertragen werden könnte; denn das Projekt über die externen Kosten der Wärme- und Stromversorgung (vergl. [16]) war gerade bei der Bewertung von sehr schweren und gleichzeitig sehr unwahrscheinlichen Unfällen auf schwierige methodische Probleme gestossen. Angesichts der Vielschichtigkeit der Fragestellung wurde ein unorthodoxes Vorgehen gewählt. Zunächst wurde ein interdisziplinäres Projektteam zusammengestellt. Vertreten sind die Fächer Soziologie, Ökonomie, Rechtswissenschaften, Umweltwissenschaften und Ethik. Ausgehend von einer Liste mit konkreten Einzelfragen hatte jede beteiligte Disziplin eine erste Stellungnahme zu formulieren. Diese Texte wurden dann intern und extern ausgiebig diskutiert und anschliessend bereinigt. Als nächste Aufgabe steht die Synthese dieser Texte an. Sie soll im Herbst 1994 vorliegen.

PILOT- UND FELDVERSUCHE

In diesem Themenbereich werden Projekte zusammengefasst, die als Umfragen, Erhebungen, Bereitstellung von Beratungsinstrumenten etc. viele aktiv Beteiligte betreffen.

Im Gegensatz zur monetären Bewertung des Treibhauseffektes über den Vermeidungskostenansatz (vergl. [16]) wurde mit einer grossangelegten Umfrage der Ansatz über die **Erfassung von Zahlungsbereitschaften** gewählt [24]: Im Sommer 1993 wurden 689 Haushalte in der Deutschschweiz und 203 Haushalte in der Romandie zu ihrem Kenntnisstand, zu ihrer Betroffenheit und zu ihrer Zahlungsbereitschaft bezüglich der Treibhaus-, Ozon- und Luftverschmutzungsproblematik befragt. Zusätzlich wurde die Akzeptanz verschiedener Umweltschutzmassnahmen - insbesondere einer CO_2-Abgabe mit Rückerstattung - ermittelt. In einer Kontrollfrage wurde die geäusserte Zahlungsbereitschaft mit den resultierenden Einkommenseinbussen verkoppelt. Die bislang ausgeführten Auswertungen zeigen, dass nur etwa 40 % der Haushalte überhaupt eine Zahlungsbereitschaft äussern. Im Durchschnitt aller befragten Haushalte liegt sie pro Umweltbereich in der Grössenordnung von 13 - 15 Franken pro Monat. Werden nur die zahlungsbereiten Haushalte betrachtet, liegen die Werte im Bereich von 21 - 24 Franken pro Monat für die halbe Lösung, bzw. 52 - 58 Franken pro Monat für die ganze Lösung. Der Schlussbericht soll bis Mitte 1994 veröffentlicht werden.

ERFOLGSKONTROLLE

Mit der Einführung einer (energiepolitischen) Massnahme wird die "Erfolgskontrolle" zum Thema. Inhaltlich können dabei etwas vereinfacht vier Problemkreise unterschieden werden: (a) Wird die Massnahme überhaupt durchgeführt (Vollzugsevaluation)? (b) Welche Wirkungen und Nebenwirkungen sind zu beobachten (Wirkungsevaluation)? (c) Werden die Ziele erreicht (Zielerreichungsevaluation)? (d) In welchem Verhältnis steht der Aufwand zum Ertrag (Effizienzevaluation)?

Schon seit 1991 läuft ein Projekt, das die Wirkung einer energiepolitischen Massnahme evaluieren soll. Es geht um die **Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage** in der Stadt Zürich [25]. Im Vordergrund steht die Untersuchung der kurz- und mittelfristigen Reaktionen der Haushalte. Hierzu werden in den drei Städten Zürich, Bern und Basel Tarif-, Verbrauchs- und Klimadaten sowie weitere sozio-ökonomische Bestimmungsgrössen, wie Haushaltsausgaben, Gerätebestände, Grösse des Haushaltes, Wohnfläche etc. auf der Ebene einzelner Haushalte zusammengeführt und analysiert. Ausgehend von den Daten von 44 Schweizer Städten konnten im Berichtsjahr für die gesamte Elektrizitätsnachfrage sowie separat für die Hochtarif- und die Niedertarifnachfrage neue Preis- und Einkommenselastizitäten ermittelt werden. So betragen die Preiselastizitäten etwa -0.2 für die gesamte Nachfrage bei einer Variation beider Tarife (d. h. eine Erhöhung der Elektrizitätstarife um 10 % bringt einen Nachfragerückgang von 2 % mit sich), -0,4 bei einer Variation nur des Hochtarifs und -1.6 bei einer Variation nur des Niedrigtarifes. Das Projekt läuft noch bis Ende 1995.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit im sozio-ökonomischen Bereich wird über zwei Pfade gesichert: Zum einen werden grössere Projekte in aller Regel auf verschiedene Studiennehmer aufgeteilt, zum andern wird die Finanzierung eines grösseren Projektes meist von zwei oder mehreren Institutionen getragen.

Die internationale Einbindung der sozio-ökonomischen Arbeiten versteht sich von selbst: Die Aufarbeitung der internationalen Erkenntnisse steht fast immer am Anfang einer Studienbearbeitung. Ein Paradebeispiel bilden die Untersuchungen zu den Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung, wo der Transfer und die Anpassung ausländischen *Know-hows* in verschiedenen Bereichen die einzige Möglichkeit darstellt, bei eher bescheidenen Budgets neue Erkenntnisse für die Schweiz zu gewinnen. Zudem wird der Einbezug ausländischer Institute und Beratungsfirmen nach Möglichkeit gefördert. Im übrigen können verschiedene Projekte nur dank ihrer internationalen Einbettung durchgeführt werden; das wichtigste Projekt in diesem Zusammenhang ist sicher die Untersuchung des Grönlandeises (vergl. [6]).

4. Umsetzung

In vielen Fällen ist die Umsetzung der sozio-ökonomischen Forschungsergebnisse durch den Auftragszusammenhang von vornherein sichergestellt, etwa bei den Projekten im Zusammenhang mit den Energieperspektiven. Darüber hinaus sind zur Umsetzung der Erkenntnisse eigenständige Aktivitäten nötig wie Seminarien, Workshops, Unterstützung von Publikationen usw. Im Berichtsjahr wurden verschiedene solcher Aktivitäten durchgeführt; die Anstrengungen sind aber noch zu verstärken. Im übrigen wurde im Rahmen eines eigenständigen Projektes im Bereich Energie- und Ökobilanzen ein Umsetzungskonzept erarbeitet [26]. Dieses im Entwurf vorliegende Konzept soll die Richtschnur bilden für die Arbeiten der schon erwähnten Koordinationsgruppe des Bundes.

5. P + D - Projekte

Es fällt nicht leicht, Projekte mit Pilot- und Demonstrationscharakter im sozio-ökonomischen Bereich zu definieren. Denn es ist ja in aller Regel nicht das Ziel, mit der Erforschung von sozio-ökonomischen Fragestellungen ein marktgängiges Produkt zu entwickeln, bei dem nach einer Forschungsphase eine Pilot- oder Demonstrationsphase folgen müsste. Entsprechend wurde das P+D-Programm **Sozioökonomie** als ein "reaktives" Programm definiert; d. h. Projekte sollen nur als Reaktion auf eingehende Gesuche verwirklicht werden.

Im Berichtsjahr wurde die Unterstützung eines einzigen Projektes beschlossen, nämlich die forschungsmässige Begleitung (*Monitoring*) eines **Drittinvestorprojektes** [27]. Beim Drittinvestor geht es um folgendes: Die Realisierung von wirtschaftlichen Energiesparmassnahmen scheitert oft daran, dass Energiesparinvestitionen in Konkurrenz zu andern Investitionen stehen, dass am technischen Erfolg der vorgeschlagenen Sparmassnahmen gezweifelt wird, dass das Investitionsrisiko für Sparmassnahmen dem Anlagenbetreiber zu hoch oder dass die Erfolgskontrolle für ihn zu aufwendig ist. Mit dem Einbezug eines Drittinvestor können die aufgezählten Hinderungsgründe zu einem grossen Teil ausgeschaltet werden: Der Drittinvestors übernimmt Planung, Finanzierung und Realisierung des Projektes sowie die Erfolgskontrolle.

6. Bewertung 1993 und Ausblick 1994

Das sozio-ökonomische Energieforschungsprogramm hat sich im Berichtsjahr gegenüber der technisch-orientierten Energieforschung weiter emanzipiert. Angesichts der grossen Bedeutung sozio-ökonomischer Fragestellungen sind die ihr zur Verfügung stehenden Mittel aber immer noch bescheiden. Im übrigen konnten die im letzten Jahresbericht genannten Zielpunkte - trotz der schwierigen Budgetsituation - weitgehend erreicht werden. Verschiedene Projekte dürften auch das Interesse eines grösseren Publikums finden, im Vordergrund steht hierbei sicher die Ermittlung der externen Kosten im Wärme- und Strombereich.

Im Jahr 1994 wird ein wesentlicher Schwerpunkt die Energiemodellierung und die Erarbeitung neuer Energieperspektiven sein. Darüber hinaus zeichnen sich wichtige Aktivitäten im Bereich der Energie- und Ökobilanzierung ab, insbesondere was die Anwendung dieser Erkenntnisse betrifft (Schaffung einer Anlaufstelle für energiebezogene Ökodaten, Planungshilfsmittel für energetisch und ökologisch abgestütztes Bauen).

7. Liste der Projekte

[1] B. Aebischer, Forschungsgruppe Energieanalysen / ETH - *Zürich*: ***Heizölpanel.*** (SB)

[2] B. Aebischer, ETH - *Zürich*: ***Entwicklung des Elektrizitätsverbrauchs im Dienstleistungssektor einer grösseren Stadt.*** (SB)

[3] P. Suter, LES / ETH - *Zürich*: ***Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung.*** (SB)

[4] G. Hirschberg, PSI, *Villigen*: ***Vergleichende Untersuchung von Grossunfällen im Energiebereich.*** (JB)

[5] N. Kohler, Uni - *Karlsruhe*: ***Energie- und Stoffbilanzen von Bauteilen und Gebäuden.*** (SB)

[6] B. Stauffer, Klima & Umweltphysik / Uni - *Bern*: ***Treibhausgase und Klima.*** (JB)

[7] K.P. Masuhr, PROGNOS, *Basel*: ***Koordination der Modellierungs- und Perspektivarbeiten.***

[8] W. Baumgartner, IBFG, *Zürich*: ***Perspektiven des Energieverbrauchs in der Industrie.*** (JB)

[9] P. Hofer, PROGNOS, *Basel*: ***Perspektiven des Energieverbrauchs in den Haushalten.*** (JB)

[10] D. Spreng, ETH - *Zürich*: ***Perspektiven des Energieverbrauchs im Dienstleistungssektor.*** (JB)

[11] M. Keller, INFRAS, *Bern*: ***Perspektiven des Energieverbrauchs im Verkehr.***

[12] H. WÜEST, *Zürich*: ***Gebäudeperspektiven.***

[13] H. G. Graf, SGZZ, *St. Gallen*: ***Rahmendaten.***

[14] F. Carlevaro, CUEPE, *Genf*: ***Evaluation en équilibre général des mesures de politique énergétique en Suisse.*** (JB)

[15] R. van Nieuwkoop, ECOPLAN, *Bern*: ***Allgemeine Gleichgewichtsmodelle - Verteilungseffekte.*** (JB)

[16] W. Ott, INFRAS, Zürich und K. Masuhr, PROGNOS, *Basel*: ***Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung.*** (SB)

[17] E. A. Müller, C.U.BRUNNER, *Zürich*: ***Quantifizierung der Elektrizitätseinsparung als Folge der neuen SIA-Empfehlung 380/4.*** (JB)

[18] S. Mauch, INFRAS, *Zürich*: ***Oekologische Steuerreform & internationale Wettbewerbsfähigkeit.***(JB)

[19] C. Brandes, C.U.BRUNNER, *Zürich*: ***Energie-Dienstleistungsunternehmen für die Stadt Schaffhausen, Projektleitung.*** (SB)

[20] R. Horbaty, ENERGIEPLANUNG, *Langenbruck* & E. O. Graf, INSTITUTIONSBERATUNG, *Basel*: ***Energie-Dienstleistungsunternehmen für die Stadt Schaffhausen, Teilprojekt "Neue Dienstleistungen".***

[21] H. F. Vögeli, VONTOBEL EC CONSULTING, *Zürich*: ***Energie-Dienstleistungsunternehmen für die Stadt Schaffhausen, Teilprojekt "Finanzierungsmodelle - Organisationsstruktur".***

[22] U. Ilgenmann, ÖKO-INSTITUT, *Freiburg* (D): ***Energie-Dienstleistungsunternehmen für die Stadt Schaffhausen, Teilprojekt "Neue Dienstleistungkonzepte".***

[23] G. Erdmann, Inst.f. Wirtschaftswissenschaften, ETH - *Zürich*: ***Risikobewertung im Energiebereich.*** (JB)

[24] W. Ott, INFRAS, *Zürich* & M. Peters, IPSO, *Zürich*: ***Monetäre Bewertung des Treibhauseffektes mittels der Erfassung von Zahlungsbereitschaften.*** (JB)

[25] P. Zweifel, Uni - *Zürich*: ***Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage.*** (JB)

[26] H. P. Kocher, BASLER & HOFMANN, *Zürich*: ***Energie- und Ökobilanzen: Erarbeitung eines Umsetzungskonzeptes.*** (SB)

[27] G. Grünstein, SUTER + SUTER, *Basel*: ***Drittinvestor.***

(JB) Jahresbericht 1993 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

8. Referenzen

[28] W. Baumgartner, IBFG, *Zürich*: ***Sozio-ökonomische Energieforschung SöEF, BEW-Forschungsprogramm 92 - 95***, Dezember 1991.

ADRESSES DES CHEFS DE PROGRAMME
ADRESSEN DER PROGRAMMLEITER

Utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments
Rationelle Energienutzung in Gebäuden
Markus ZIMMERMANN, dipl. Arch. ETH, KWH / EMPA, 8600 Dübendorf
Tel 01 / 823 41 78 Fax 01 / 821 62 44

Utilisation rationnelle de l'énergie dans les transports
Rationelle Energienutzung im Verkehr
Bruno ALBRECHT, dipl. Bau-Ing. ETH, ALBRECHT+PARTNER AG, Waldstätterstrasse 9, 6003 Luzern
Tel 041 / 23 90 92 Fax 041 / 23 05 71

Valorisation de la chaleur ambiante, rejets thermiques et installations chaleur-force
Umgebungs- & Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung
Martin ZOGG, Prof., Dr. sc. techn. ETH, Kirchstutz 3, 3414 Oberburg
Tel+Fax 034 / 22 07 85

Combustion
Feuerung & Verbrennung
Alphons HINTERMANN, Dr. dipl. Phys. ETH, BEW, 3003 Bern
Tel 031 /322 56 54 Fax 031 / 382 44 03

Technique atomique et sécurité nucléaire
Kerntechnik und nukleare Sicherheit
Wolfgang KRÖGER, Prof., Dr. Ing., PSI, 5232 Villigen
Tel 056 / 99 27 42 Fax 056 / 98 23 27

Recherches réglementaires de la DSN en matière de sécurité
Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK
Sabyasachi CHAKRABORTY, dipl. Phys., HSK, 5232 Villigen
Tel 056 / 99 39 36 Fax 056 / 99 39 95

Solaire thermique et stockage de chaleur
Aktive Solarnutzung & Wärmespeicherung
Pierre BREMER, dipl. ing. méc. EPF, SEDE S. A., Rue du Midi 33, 1800 Vevey
Tél 021 / 921 05 15 Fax 021 / 921 95 57

Architecture solaire
Solararchitektur
Robert HASTINGS, Arch., M. Sc., HBT / ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich
Tel 01 / 633 29 88 Fax 01 / 633 55 48

Photovoltaïque
Photovoltaik
Stefan NOWAK, Dr, Phys., POLYGON, Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg
Tel 037 / 82 65 71 Fax 037 / 82 65 80

Thermochimie
Thermochemie
Armin RELLER, Prof., Dr., Chem., A.C.I., Winterthurerstr.190, 8057 Zürich
Tel 01 /257 46 17 oder 0049 40 / 41 23 31 03 Fax 0049 40 / 41 23 28 93

Photochimie
Photochemie
Jean-Claude COURVOISIER, Dr, phys., 20 av. Adrien Jeandin, 1226 Thônex
Tél 022 / 349 38 49

Biomasse
Biomasse
Martin HINDERLING, dipl. Ing., BEW, 3003 Berne
Tél 031 / 322 56 24 Fax 031 / 382 44 03

Géothermie
Geothermie
Harald L. GORHAN, Dr., Geol., EWI, Bellerivestr. 36, Postfach, 8034 Zürich
Tél 01 / 385 27 33 Fax 01 / 385 26 54

Fusion nucléaire contrôlée
Kontrollierte Kernfusion
Paul ZINSLI, Dr., Phys., BBW, 3003 Bern
Tel 031 / 322 96 53 Fax 031 / 322 78 54

Électricité
Elektrizität
Roland BRÜNIGER, dipl. El.-Ing. ETH/BWI, Isenbergstr. 30, 8913 Ottenbach
Tel 01 / 760 00 66 Fax 01 / 760 00 68

Hydrogène
Wasserstoff
Thomas SCHUCAN, PD., Dr., Phys., PSI, 5232 Villigen PSI
Tel 056 / 99 27 43 Fax 056 / 98 23 27

Électrochimie
Elektrochemie
Otto HAAS, Dr., Chem., PSI, 5232 Villigen PSI
Tel 056 / 99 24 72 Fax 056 / 98 23 27

Piles à combustible
Brennstoffzellen
Léo DUBAL, Dr, phys., OFEN, 3003 Berne
Tél 031 / 322 56 44 Fax 031 / 382 44 03

Socioéconomie
Sozioökonomie
bis 30.6.1994 :
Walter BAUMGARTNER, Dr., sc. nat., IBFG AG, Postfach 176, 8035 Zürich
Tel 01 / 362 99 00 Fax 01 / 363 22 87
ab 1.7.1994
Ruedi MEIER, Dr. oec.publ. Raumplaner ETH, Bolligerstr. 14b, 3006 Bern
Tel 031 / 332 4910 oder 633 3622 Fax 01 / 363 22 87

Renseignements généraux sur la recherche énergétique
Allgemeine Auskünfte über die Energieforschung
Gerhard SCHRIBER, Dr., Phys., BEW, 3003 Bern
Tel 031 / 322 56 58 Fax 031 / 382 44 03

Centre de distribution pour les rapports annuels et finaux de recherche énergétique
Bezugsort für Jahres- und Schlussberichte aus der Energieforschung
ENET, c/o OFEN, 3003 Berne
Tél 031 / 352 19 00 Fax 031 / 352 77 56

Éditeur / Redaktor : Léo Dubal, OFEN, 3003 Berne
Distribution / Bezugsquelle : ENET, c/o OFEN, 3003 Berne