

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

ENET
9018000-50

Recherche énergétique

Energie-Forschung 1994

Rapports de synthèse des chefs de programme
Überblicksberichte der Programmleiter



Zukunftsgestaltung

mit

Solararchitektur

RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE

1994

ENERGIE - FORSCHUNG

Rapport de synthèse des chefs de programme

Überblicksberichte der Programmleiter

Vorwort	3
Avant-propos	4
Fortschritte der Energieforschung 1994	5

Programme de recherche / Forschungsprogramme

Rationelle Energienutzung in Gebäuden	7
Umgebungs- & Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung	15
Rationelle Energienutzung im Verkehr	23
Feuerung & Verbrennung	31
Kerntechnik & nukleare Sicherheit	39
Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK	47
Solaire thermique et stockage de chaleur	55
Solararchitektur	63
Photovoltaik	71
Solarchemie	81
Biomasse	89
Geothermie	97
Fusion nucléaire contrôlée	105
Elektrizität	111
Wasserstoff	119
Elektrochemie	127
Piles à combustible	135
Energiewirtschaftliche Grundlagen	143

Annexe / Anhang

Adresse des chefs de programme / Adressen der Programmleiter	151
--	-----

VORWORT

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem *Konzept der Energieforschung des Bundes*. 1994 betrugen die gesamten Aufwendungen für diese Forschung etwa 230 Mio Franken, wovon rund 35 Mio Franken für Pilot- und Demonstrationsanlagen eingesetzt wurden. Detailliertere statistische Angaben finden sich in *Forschung, Entwicklung und Demonstration im Bereich der Energie in der Schweiz; Liste der Projekte*.

Koordination, Begleitung, Umsetzung und internationale Einbettung der Forschungsarbeiten gehören zum Aufgabengebiet des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW). Es verfügt über eigene Förderungsmittel, die es subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und öffentlichen Forschungsstellen einsetzt. Seitens des BEW wurden 1994 Forschungsaufträge im Umfang von 47 Mio Franken erteilt. Darin eingeschlossen sind 15 Mio Franken für Pilotanlagen. 55 % der BEW-Gelder sind in die Privatwirtschaft geflossen.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der Leiter der 18 Energieforschungsprogramme des Bundes. Er richtet sich an die gesamte interessierte Öffentlichkeit. Beschrieben sind vorwiegend diejenigen Projekte, welche ganz oder teilweise durch das BEW finanziert wurden. Enthalten sind aber auch Angaben über andere mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten. Es sei hier darauf hingewiesen, dass das BEW einen besonderen Jahresbericht über Pilot- und Demonstrationsanlagen veröffentlicht. Zudem informieren die meisten Institute der Hochschulen in ausführlichen Jahresberichten über ihre Forschungsaktivitäten.

Die Übersichtsberichte der Programmleiter dürfen - 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).

28. Februar 1995

BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT

Zur Illustration auf dem Umschlag:

Zukunftsgestaltung mit Solararchitektur. . . Die Nutzung der Sonne - energetisch richtig eingesetzt - steigert den Komfort im Gebäude. Diese Möglichkeit wird schon heute von der Privatwirtschaft - ohne irgendwelche finanzielle Beihilfe durch die öffentliche Hand - wahrgenommen. Die "Doppelhaut" des abgebildeten Gebäudes von FÉLIX CONSTRUCTIONS in Bussigny bietet auch einen hochwertigen Lärmschutz (Siehe Programm Solararchitektur).

AVANT - PROPOS

La recherche énergétique du secteur public en Suisse se conforme au *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération*. Les pouvoirs publics ont dépensé en 1994 quelque 230 millions de francs à ce titre. Cette somme comprend 35 millions pour les installations Pilotes & Démonstration. Des données statistiques plus détaillées se trouvent dans *Recherche, développement et démonstration dans le domaine de l'énergie en Suisse, Liste des projets*.

La coordination, l'accompagnement, le transfert à la pratique et l'insertion dans le cadre international des travaux des recherche relèvent de la compétence de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Il dispose de ses propres moyens de soutien qu'il met en jeu de manière subsidiaire aux efforts des organisations de recherche privées et publiques. Pour sa part l'OFEN a, en 1994, attribué des mandats de recherche pour un montant total d'environ 47 millions de francs. Cette somme comprend 15 millions de francs pour des installations pilotes. 55 % des moyens de l'OFEN ont été attribué au secteur privé.

Le présent recueil contient les rapports de synthèse annuels des chefs des 18 programmes de recherche énergétique de la Confédération. Il s'adresse à l'ensemble du public intéressé. L'attention se porte avant tout sur les projets financés en tout ou en partie par l'OFEN. Des informations sont également données sur les travaux de recherche financés par d'autres sources, publiques et privées. Il faut signaler ici que l'OFEN publie un rapport séparé sur les projets Pilotes et Démonstration. Par ailleurs, la plupart des instituts des Hautes Écoles informent sur leurs activités de recherche par des rapports annuels détaillés.

Les rapports de synthèse des chefs de programme peuvent être reproduits totalement ou en partie, à condition que l'on mentionne la source. Les rapports annuels (RA) ou finaux (RF) cités, relatifs à chaque projet de recherche, peuvent être obtenus soit par ENET, soit par l'intermédiaire du chef de programme concerné (voir la liste d'adresses en annexe).

28 février 1995

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Illustration de la couverture

Façonner l'avenir avec l'architecture solaire... L'utilisation du soleil - lorsque cela se justifie du point de vue énergétique - augmente le confort dans les bâtiments. Aujourd'hui déjà, et sans aucune aide financière des pouvoirs publics, l'économie privée en exploite les possibilités. La "facade double peau" du bâtiment de FÉLIX CONSTRUCTIONS à Bussigny offre en plus une précieuse protection anti-bruit (voir programme Architecture solaire).

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 1994

Gerhard Schriber, Leiter der Sektion Energieforschung; BEW

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Auf diesem Gebiet sind die hervorstechenden Ergebnisse des vergangenen Jahres:

- die *Ökoinventare zur Beurteilung von Energiesystemen*. Energie- und Stoffflüsse sind darin einheitlich erfasst, was quantitative Vergleiche über Umwelteinwirkungen ermöglicht.
- die *Energieperspektiven bis 2030*. Zwei Szenarien über den zukünftigen schweizerischen Energiebedarf und seine Deckung werden vorgestellt.
- die Erfassung der *Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung*. Zur Internalisierung der Kosten sind spezifische Preiszuschläge auf die verschiedenen Energieträger berechnet worden. Es handelt sich allerdings um erste Näherungen, die vertiefter Abklärungen bedürfen.

WÄRMEBEREICH

An mehreren ausgeführten Beispielen konnte gezeigt werden, dass bei *Gebäuden* (Neubauten) - durch konsequente Anwendung bekannter Spartechniken und Einbezug aktiver und passiver Solarnutzung - mühelos 3 bis 4 mal tiefere Heiz-Energiekennzahlen möglich sind als der SIA-Zielwert von 310 MJ/m²a. Dies ohne Komforteinbussen und mit akzeptablen Mehrkosten (wenn überhaupt). Bei gewissen Materialien sind allerdings noch nicht alle ökologischen Fragen geklärt, und neue Konzepte - z.B. transparente Wärmedämmung - erfordern weitere Untersuchungen. Offene Fragen gibt es des weitern bei der wärmetechnischen Sanierung und dem Einsatz erneuerbarer Energien bei Renovationen.

Für die Auslegung und Optimierung von Heizungsanlagen mit *Wärmepumpen* wurde ein Simulationsprogramm fertiggestellt. Als Wärmequellen können Luft, Oberflächengewässer und Erdwärmesonden gewählt werden. Ein Programm wurde auch bereitgestellt für Wärmepumpensysteme mit Holzkesseln zur Spitzendeckung. Damit stehen dem Heizungsplaner zwei weitere praktische Auslegungswerkzeuge zur Verfügung.

Zur Nutzung der *Solarwärme* ist aus der internationalen Zusammenarbeit eine "Standard"-Warmwasseranlage (SOLKIT) entstanden. Die installierten Anlagen erbringen die geplanten Leistungen. Noch lässt das Gebiet aber weitere Neuentwicklungen zu: Messungen an Kollektoren mit transparenter Isolation zeigen beachtenswerte Mehrerträge gegenüber herkömmlichen Kollektoren. Bis zu 20 % Mehrertrag können auch von solaren Heizanlagen erwartet werden, wenn "wettervorherbestimmende" Regulationssysteme eingesetzt werden.

Erste Messungen zeigen, dass mit dem Einbau von "fuzzy-Regelungen" bei *Holzfeuerungen* der Wirkungsgrad erhöht und die Schadstoffabgaben sowie der Bedienungsaufwand reduziert werden können. Umfangreiche Abklärungen im Bereich *Biomasse* befassen sich zur Zeit mit der energetischen Nutzung von Gras, Feldholz und organischen Abfällen.

VERKEHRSBEREICH

Hier erarbeitet die öffentliche Energieforschung schwergewichtig Beiträge zur Entwicklung von *Leichtmobilen*. Eine 1994 abgeschlossene ökologisch-energetische Gesamtbilanz (Produktion bis Entsorgung) von laufenden Modellen und vorhandenen Prototypen zeigt ein insgesamt günstiges Bild für Leichtmobile. Energiemässig schneiden dabei Dieselantriebe - mit 40% geringerem Bruttoenergiebedarf als Elektroantriebe mit Bleibatterien - am besten ab.

Die Forschung für neuartige, preisgünstige *Batteriesysteme* mit grosser Energie- und Leistungsdichte wird aber auch in der Schweiz vorangetrieben. Bei den Zink/Luft-Batterien konnten 450 Zyklen (3000 Betriebsstunden!) mit Energieausbeuten für den Lade- / Entladeprozess von 50 % demonstriert werden. Bei den Nickel-Metallhydrid-Batterien - sie können ohne Schaden zu 100 % entladen werden - sind Prototypen für Elektrofahrräder erfolgreich getestet worden.

ELEKTRIZITÄT

Über 30 Länder arbeiten in der Erforschung der *Kernfusion* zusammen. Die Schweiz lieferte dazu mit ihren einzigartigen Grosseperimentier- und -rechenanlagen (Tokamak TCV, SULTAN, PIREX; CRAY-Rechner) auch 1994 wertvolle Beiträge, insbesondere was das Verhalten des Plasmas betrifft. Bei der *Kernspaltung* ist die öffentliche Forschung vor allem an Fragen der Kraftwerkssicherheit interessiert. Mit realistischen Experimenten - z.B. Schmelzversuchen oder Untersuchungen zum Rissverhalten - wird das Verständnis möglicher Schadensauswirkungen verbessert. Die Ergebnisse finden u.a. Eingang in Simulationsprogramme, welche damit verfeinerte Analysen zulassen.

Die schweizerischen Arbeiten zur *photovoltaischen Stromerzeugung* geniessen internationale Anerkennung. Bei der Erforschung der Siliziumtechnologie hat eine erste amorph/mikrokristalline Tandemzelle auf Anhieb 9 % Anfangs-Wirkungsgrad erreicht. Bei der Farbstoff-Solarzelle (*Grätzel*) prüfen zur Zeit mehrere Industrieunternehmen, wie sie diese in den nächsten Jahren zur industriellen Fertigung führen können. Mit einem originellen Konzept eines Funkendetektors kann die Sicherheit von Anlagen verbessert werden. 1994 sind auch weitere neue Integrationsmethoden von Photovoltaikanlagen in den umbauten Raum konkretisiert worden.

Eine Forschungsrichtung im Gebiet *Brennstoffzellen* befasst sich mit einem neuartigen System für den stationären Erdgasbetrieb. Das 1 kW-Funktionsmodell hat 1994 die technischen Hauptschwierigkeiten überwunden, sodass zu Modellen höherer Leistung übergegangen werden kann. Die andere Richtung der Brennstoffzellenforschung entwickelt wasserstoffbetriebene Zellen für den Einsatz in Elektromobilen. Ein signifikanter Fortschritt ist hier bei der Herstellung stabiler, preisgünstiger Leitmembranen zu verzeichnen.

Für die Auslegung und den Einsatz von *Klein-Blockheizkraftwerken* konnten 1994 verbesserte Planungshilfsmittel bereitgestellt werden. Obwohl die Technik auf dem Markt verfügbar ist, besteht weiterer Forschungsbedarf für die Emissionsminderung und Effizienz solcher Anlagen.

Auf der *Verbraucherseite* beschäftigt sich die Forschung mit Möglichkeiten zur Stromeinsparung in der Netzbewirtschaftung, aber auch bei elektrischen Geräten in den verschiedensten Anwendungsbereichen. So wurde z.B. im Berichtsjahr gezeigt, dass mit "selbstlernenden Sparschaltungen" der Energieverbrauch von Kaffeeautomaten halbiert werden kann, oder dass bei Klein-Umwälzpumpen eine Verdreifachung des Wirkungsgrades möglich ist.

ENERGIESPEICHERUNG

Die Erzeugungsmöglichkeiten von *Biogas* aus der in der Biomasse gespeicherten Sonnenenergie sind weitgehend bekannt. Eine Ausnahme bildet die Holzvergasung; hier zeigen Untersuchungen an Testanlagen, dass noch wesentliche Fortschritte erreicht werden können.

Umfangreiche Forschungsarbeiten widmen sich der Nutzung der solaren Strahlungsenergie zur Erzeugung von *Wasserstoff* aus Wasser und daraus *Methanol, Ethanol, Amine* und weiteren Grundchemikalien. Dabei soll auch das unliebsame "Abfallprodukt" Kohlendioxid (Treibhausgas) durch geeignete Prozesse wieder in verwertbare Chemikalien umgewandelt werden. 1994 gab es in diesem Gebiet einige Premieren:

- erstmals ist es gelungen, mit konzentrierter Sonnenenergie aus Wasser Wasserstoff zu erzeugen (PSI),
- erstmals ist in Zeolithen ein durch Licht ausgelöster Ladungstransport nachgewiesen worden (Uni Bern),
- erstmals konnte an einer bestrahlten Titanoberfläche aus Wasserdampf und Kohlendioxid Methan gebildet werden (PSI),
- erstmals konnten leichte und stabile Metallhydrid-Legierungen für die Speicherung von Wasserstoff erzeugt werden (Uni Freiburg)

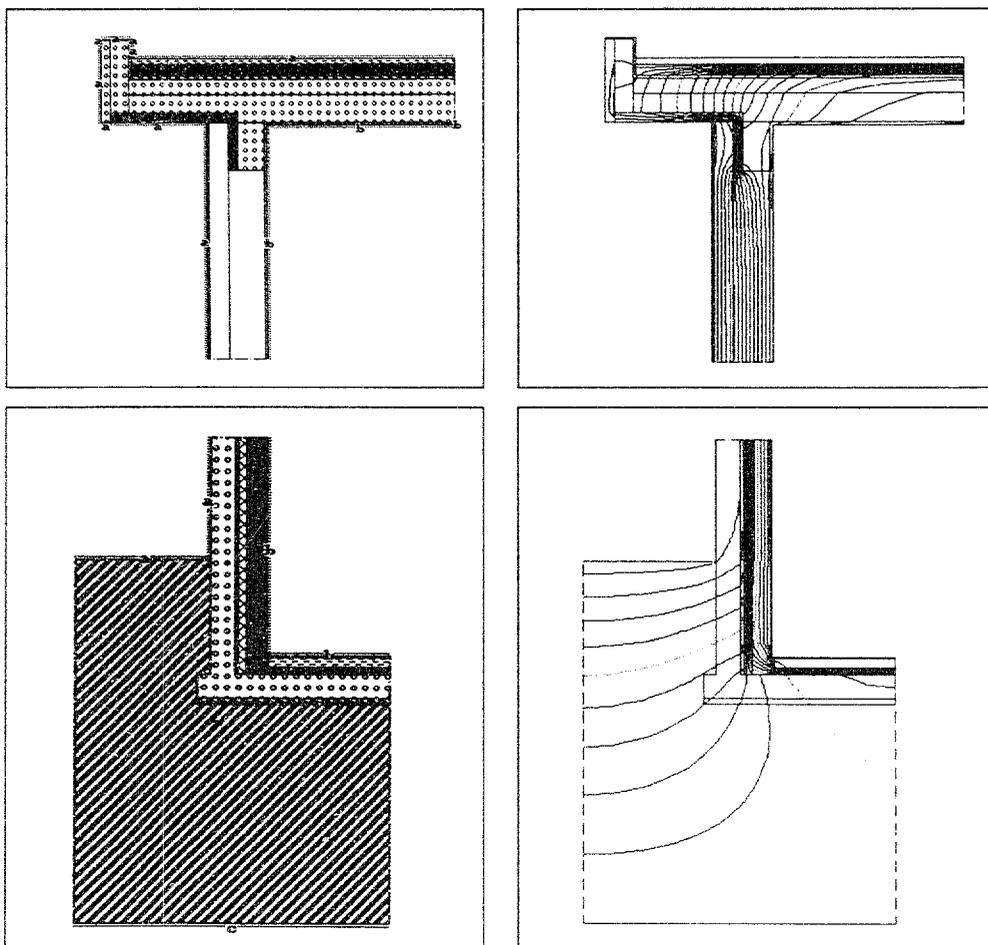
Über viele weitere Resultate und Aktivitäten berichten die folgenden "Überblicke" der Programmleiter. Die wichtigsten Ergebnisse sind auch im vergangenen Jahr in zahlreichen Seminarien und Tagungen sowie in der Fachliteratur den interessierten Anwendern vorgestellt worden. Diese haben auch regen Gebrauch gemacht vom ENET-Service, welcher alle Schweizer Energieforschungspublikationen erfasst und verteilt.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht

Zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Markus Zimmermann



Elektronischer Wärmebrückenatlas

Mit *KOBRA*, dem elektronischen Wärmebrückenatlas, kann der Wärmeverlust durch kritische Konstruktionen sehr einfach berechnet werden. Ca. 600 typische Details, deren Abmessungen und Materialien geändert werden können, stehen zur Verfügung.

1. Anvisierte Ziele 1994

Das Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden" fördert die Ausnützung des grossen Energiesparpotentials im Gebäudebereich, indem es gezielt Wissenslücken schliesst und die Anwendung verschiedenster Energietechniken integral optimiert. Obwohl im Gebäudebereich in den vergangenen 15 Jahren bereits sehr viel erreicht wurde, besteht in der verbreiteten Anwendung der rationellen Energienutzung noch ein grosses Sparpotential. Vor allem muss aber auch dafür gesorgt werden, dass Erreichtes aufgrund tiefer Energiepreise und ermüdendem Energiebewusstsein nicht wieder verloren geht.

Das Jahr 1994 war für das Forschungsprogramm ein Jahr der Übergänge:

- Die Wirtschaftskrise hat sich speziell in der Bauwirtschaft bemerkbar gemacht und ein Umdenken ausgelöst. Das Bestreben in Richtung nachhaltiger Entwicklung hat den Glauben an unbeschränktes Wachstum im Bausektor abgelöst.
- Die anhaltend tiefen Energiepreise haben das Energiebewusstsein der Allgemeinheit geschmälert und gleichzeitig das Kostenbewusstsein gefördert. Die Wirtschaftlichkeit von Energiesparmassnahmen steht wieder stärker im Vordergrund.
- Der Nationale Energie-Forschungs-Fonds, NEFF hat, bevor er sich auflöst, seine letzten Projekte bewilligt. In Zukunft wird diese Förderungsmöglichkeit in der Energieforschung fehlen. Gleichzeitig nimmt die Forschungszusammenarbeit mit den Programmen der Europäischen Union (EU) konkrete Formen an. Diese neue Möglichkeit wird jedoch, ebenso wie die NEFF-Nachfolgeorganisationen PSEL und FOGA, die entstehende Finanzierungslücke vorderhand nicht schliessen können.

Vor diesem Hintergrund verfolgte das Forschungsprogramm folgende Hauptziele:

- **Umsetzung und Verbreitung von Forschungsergebnissen**, vermehrt auch durch P+D-Projekte.
- **Integration von Umweltaspekten** in die Energieoptimierung, Fördern der ganzheitlichen Optimierung energie-relevanter Entscheide,
- Vorbereiten des **Forschungsprogrammes 96 - 99**.
- **Anstrengungen unternehmen um neue Finanzierungsmöglichkeiten** und -beteiligungen für zukünftige Projekte zu erschliessen.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Das Forschungsprogramm umfasste 1994 insgesamt 33 Projekte, von denen im Laufe des Jahres fünf abgeschlossen wurden. Fünf weitere Projekte stehen kurz vor dem Abschluss, die Schlussberichte sind bereits in der Projektliste aufgeführt. 1994 konnte erstmals eine engere Koordination mit dem **Pilot- und Demonstrationsprogramm "Gebäude, Heizung, Klima"** stattfinden, welches momentan 26 laufende Projekt umfasst. Dieses Programm bietet vor allem die Möglichkeit Energietechniken, die genügend erforscht sind, in der Praxis zu testen und zu demonstrieren. Allerdings sind die für P&D-Projekte zur Verfügung stehenden Mittel zu gering, um eine systematische Erprobung und Demonstration von Ergebnissen der Energieforschung zuermöglichen.

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

PLANUNGSHILFSMITTEL

Das Teilprogramm **Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden (ERL)** ist abgeschlossen und die Ergebnisse sind in einer sieben-bändigen Dokumentationsreihe zusammengefasst [16, 38, 39]. Im ersten Quartal 1995 werden die wichtigsten vier Bände der Dokumentationsreihe auch in französischer Sprache erhältlich sein. Ausgewählte ERL-Ergebnisse und die Dokumentationsreihe wurden im Rahmen einer Tagung des Verbandes Schweiz. Heizungs- und Lüftungsfirmen (VSHL) der Branche vorgestellt. Die Tagung stiess auf grosses

Interesse, die Referate wurden Ende Jahr in der Zeitschrift SIA publiziert [36]. Eine vergleichbare Aktion ist für Frühjahr 1995 auch in der Westschweiz geplant.

Die wichtigsten Fortschritte wurden in folgenden drei Bereichen gemacht, für die nun geeignete Planungsmittel bestehen:

- Detaillierte **Simulationsmöglichkeit für Luftströmungen** in Räumen
- **Simulationsmöglichkeit für komplexe Luftaustauschvorgänge** zwischen Räumen, Lüftungsanlage, und der Aussenluft
- **Planungsrichtlinien** für moderne Quell- und Mischluftsysteme

Mit dem ERL-Abschluss sind die energierelevanten Aspekte des Luftaustausches und der Lüftung weitgehend bekannt. Weitergehende Untersuchungen werden nur noch vereinzelt durchgeführt; so z.B. für:

- Planungsgrundlagen für die effiziente Lüftung sehr grosser Räume,
- Verbesserung des Luftaustauschmodelles COMIS.

Beide letztgenannten Bereiche werden im Rahmen von Projekten der Internationalen Energie-Agentur (IEA) durchgeführt [18, 20] und können so auch von ausländischen Erfahrungen profitieren. Weiterhin beteiligt sich die Schweiz am *Air Infiltration and Ventilation Center (AIVC)* der IEA [19], welches vor allem der internationalen Verbreitung von Forschungsergebnissen im Lüftungsbereich dient.

Im Bereich **Wohnungslüftung** sollen in der Schweiz vor allem geeignete P&D - Projekte durchgeführt werden. Damit können - besser als in der Forschung - die praktischen Aspekte angegangen und die Zusammenarbeit mit der Lüftungsbranche intensiviert werden.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt wird mit dem Projekt **Vermeiden von Kühllast - Passive Kühlung** bearbeitet. Ziel dieses Forschungsschwerpunktes ist es, das energetische Verhalten eines Gebäudes über das ganze Jahr - und nicht nur im Winter - zu optimieren. Wenn nicht rechtzeitig etwas unternommen wird, ist zukünftig mit einem stark wachsenden Kühlbedarf zu rechnen. Verschiedene Projekte [2, 3, 22, 24] und NEFF 390, 464, 501, welche zum Teil auch in internationaler Zusammenarbeit mit der IEA [24] und mit einem EU-Forschungsprojekt [3] durchgeführt werden, sollen die notwendigen Grundlagen liefern und 1996 dem Planer in einem **Handbuch der passiven Kühlung** zur Verfügung stehen.

Ein neuer Schwerpunkt besteht in der **gesamtheitlichen Betrachtung von Gebäuden**, welche nicht nur Energie, sondern auch Umweltbelastung bei Erstellung, Betrieb, Erneuerung und Abbruch berücksichtigt. Die verhältnismässig umfangreichen und komplexen Arbeiten werden von einer Koordinationsgruppe des Bundes für Energie- und Ökobilanzen unter der Leitung des Programmleiters koordiniert und auf verschiedene Bundesämter aufgeteilt. 1994 konzentrierten sich die Arbeiten auf drei Bereiche:

- **Datenpflege:** An der ETH-Zürich werden die verfügbaren "Ökodaten" gesammelt, soweit möglich auf ihre Plausibilität geprüft und Forschern und Anwendern zur Verfügung gestellt [30].
- **Bilanzierungsprogramm:** Gemeinsam mit der Privatwirtschaft wird eine Standard-Ökobilanz-Software erstellt, welche den Umgang mit umfangreichen Ökodaten ermöglicht und das Erstellen von Ökobilanzen vereinfacht und standardisiert [31].
- **Umsetzung:** Mit dem Projekt OGIP / DATO [5] soll erreicht werden, dass mit der in der Baubranche bekannten Elementmethode zukünftig nicht nur Kostenschätzungen sondern auch ökologische Bewertungen von Baukonstruktionen und Bauten erstellt werden können. Längerfristig sollte dies sogar mit dem verbreiteten Normpositionenkatalog möglich sein.

Parallel dazu laufen verschiedene Arbeiten, welche diese Bereiche unterstützen sollen. Die **ökologische Beurteilung von Wärmedämmstoffen** konnte abgeschlossen werden [9]. Sie hat gezeigt, dass bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen je nach Material die Umweltbelastung sehr unterschiedlich sein kann. Die Analyse der **ökologischen Risiken durch Wärmeschutzverglasungen** [32] wurde erst begonnen. Andere Projekte versuchen wiederum, das bestehende Wissen auf konkrete Anwendungen - wie ausgewählte Hochbaukonstruktionen [12] oder ganze Gebäude [26] anzuwenden.

Insgesamt haben die bisherigen Untersuchungen klar gemacht, dass die Umweltbelastung durch die Bauwirtschaft recht hoch sein kann. Je nach Wahl der Materialien und Konstruktionen sind jedoch grosse Verbesserungspotentiale vorhanden, was die laufenden Arbeiten rechtfertigt. Trotz allem werden wir jedoch mittelfristigen nicht von einer nachhaltigen, umweltneutralen Bauwirtschaft sprechen können.

GEBÄUDEHÜLLE

Verschiedene Projekte, welche sich mit Energie- und Ökobilanzen von Baustoffen und -konstruktionen befassen, wurden bereits unter "Planungshilfsmittel" erwähnt, da die Untersuchungsergebnisse schlussendlich in praxisnahe Planungshilfsmittel einfließen sollen.

Ein weiterer Forschungsbereich befasst sich mit der direkten Belastung der Raumluft durch ausgasende Materialien. Im Labor wurden etwa 70 gängige Baustoffe bezüglich Ausgasungen untersucht [7] und ein Teil davon den effektiven Belastungen in einem realen Raum gegenübergestellt [8]. Einerseits konnten je nach Baustoff sehr unterschiedliche Werte gemessen werden, andererseits zeigt sich, dass in der realen Anwendung die Schadstoffbelastung wesentlich geringer als in der Testzelle ist. Da jedoch die Klagen über belastete Raumluft häufig sind, müssen neue Techniken gefunden werden, um die Quellen bestimmen und quantifizieren zu können. Eine diesbezüglich interessante Möglichkeit bietet die FLEC-Zelle, die im Bau als Schale direkt auf die Baustoffe aufgebracht wird und die austretenden Gase sammelt. Dadurch wird es möglich Schadstoffemissionen direkt am Bau zu lokalisieren.

Zur Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle werden vor allem noch die Hilfsmittel zur Beurteilung von Wärmebrücken [11] und der kombinierten Wärme-, Feuchte- und Lufttransportmechanismen [6] weiterentwickelt. Beide Projekte werden in internationaler Zusammenarbeit (EU / IEA) durchgeführt. Das Berechnungsprogramm für Wärmebrücken, bei welchem typische Situationen ausgewählt und die geometrischen Abmessungen den effektiven Gegebenheiten angepasst werden können, stösst bereits auf reges Interesse. Ab Frühjahr 95 sollte es erhältlich sein.

Mit der Bauhülle befassen sich auch die Projekte [10, 27].

HAUSTECHNIK

Die Forschungsarbeiten im Haustechnikbereich konzentrieren sich hauptsächlich auf die Optimierung der Systeme als Ganzes.

In einem Projekt der IEA [15] werden Methoden gesucht, um Fehler in Haustechnikanlagen frühzeitig detektieren zu können. Die Arbeiten in der Schweiz konzentrieren sich auf Wärmepumpenanlagen und zentrale Lüftungsanlagen. Ein automatisches Fehlererkennungssystem für Wärmepumpen wurde von der ETH bereits realisiert, dasjenige für Lüftungsanlagen soll 1995 entstehen.

Eine weitere Systemoptimierung wird mit dem Projekt DELTA [25] angestrebt. Das Projekt untersucht die Optimierungsmöglichkeiten für Tageslicht, Kunstlicht, Kühlbedarf und Heizlast mittels einer intelligenten Sonnenschutzsteuerung und der Erfassung der internen Wärmegewinne über den momentanen Stromverbrauch. Das Projekt weist eine starke Beteiligung der Industrie auf, welche entsprechende Regelgeräte auf den Markt bringen will.

Zwei Projekte befassen sich mit Verbesserungen im Heizkesselbereich. In einem ersten Projekt wurden die Grundlagen erarbeitet, die es zukünftig ermöglichen, typegeprüfte Heizkessel nicht nur bezüglich Schadstoffemissionen, sondern auch bezüglich des energetischen Verhaltens zu beurteilen [13]. Das Verfahren ermöglicht ohne umfangreiche Zusatzmessungen Aussagen über den Wirkungsgrad im Teillastbereich. Die Arbeiten werden im Frühjahr 1995 mit der Auswertung weiterer Testkessel abgeschlossen. Beim zweiten Heizkesselprojekt wurden Möglichkeiten gesucht, Ölheizkessel mit einfachen Mitteln gegen Korrosion zu schützen [14]. Es konnte eine sehr geeignete Kunstharzbeschichtung gefunden und ausgetestet werden, die demnächst in Pilotanlagen praktisch eingesetzt werden soll. Ein weiteres Projekt in diesen Bereich ist in [29] beschrieben.

Diverse Projekte befassen sich mit der effizienten Raumlüftung und -kühlung [1, 2, 3, 22, 23, 24]. Sie wurden bereits unter "Planungshilfsmittel" etwas detaillierter erwähnt.

PILOT- UND DEMONSTRATIONSPROJEKTE

1994 konnten trotz knappem Programmbudget zehn zusätzliche Projekte bewilligt werden, vor allem Niedrigenergie-Einfamilienhäuser. Die Energiekennzahlen für Heizung reichen von sehr tiefen 15 MJ/m²a bis 200 MJ/m²a bei einer Sanierung. Die SIA-Zielwerte für Neubauten liegen bei 310 MJ/m²a resp. 400 MJ/m²a bei Sanierung.

Das Programm konzentriert sich auf die gesamtheitlichen Aspekte von Gebäudehülle, Haustechnik und Nutzung erneuerbarer Energien. Der Weg zu einem tiefen Energieverbrauch wird nicht vorgeschrieben. Grundsätzlich werden jedoch Techniken unterstützt, welche ein grosses Marktpotential aufweisen und bei der Markteinführung auf finanzielle Unterstützung angewiesen sind.

Folgende Techniken besitzen hohe Priorität:

- hochwärmedämmende Gebäudehülle inkl. neuartiger Fenster- und Fassadensysteme,
- Nutzung erneuerbarer Energiequellen,
- Raumkühlung mit passiven Mitteln,
- ökologisch und ökonomisch optimierte Bausysteme.

Die vor 1994 bewilligten Projekte sind grösstenteils realisiert. Die Messungen und Auswertungen (meist über zwei Jahre) sind noch im Gange. Erste Abschlüsse stehen unmittelbar bevor, so dass ab 1995 mit ersten grösseren Umsetzungsaktivitäten gerechnet werden kann.

3. Zusammenarbeit, internationale Kontakte

1994 konnten die internationalen Kontakte ausgeweitet werden. Ein besonderes Interesse besteht momentan an einer Beteiligung an Projekten der EU. Im Moment ist das Forschungsprogramm an drei EU-Projekten beteiligt:

- PASCOOL (passive Kühlung von Gebäuden) [3],
- IAQ Audit (Luftqualitätsüberwachung in Bürogebäuden) [21],
- KOBRA (Wärmebrückenatlas) [11].

Verschiedene neue Projektbeteiligungen sind im 4. Rahmenprogramm der EU geplant.

Traditionell intensiv ist die **Zusammenarbeit mit der IEA**, bei welcher die Schweiz, im Gegensatz zu den Programmen der EU, volles Mitbestimmungsrecht hat. Im Rahmen des Forschungsprogrammes *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* war die Schweiz an folgenden Projekten beteiligt:

- *Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)* [19], laufend,
- *Calculation of Energy & Environmental Performance in Buildings (Thermal Modelling)* [1], international abgeschlossen, nationaler Abschluss Frühjahr 95,
- *Multizone Air Flow Modelling* [18], laufend,
- *Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE)* [6], Abschluss Mitte 94,
- *Real Time Simulation in HVAC Systems* (Fehlererkennung in Haustechnikanlagen) [15], laufend,
- *Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures* [20], laufend,
- *Low Energy Cooling* [24], laufend.

4. Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Die Umsetzung hat im Forschungsprogramm seit jeher einen hohen Stellenwert. Auch 1994 konnte diesbezüglich wieder einiges erreicht werden:

- Am 8. **Status-Seminar der Energieforschung im Hochbau** [34], welches am 15./16. September an der ETH durchgeführt wurde, konnte in über 50 Referaten der Stand der Energieforschung einem breiten Interessentenkreis vorgestellt werden. Auf besonderes Interesse stiess die Demonstration von neuen *Softwareentwicklungen* im Energiebereich, die inzwischen an Praxisnähe gewonnen haben und einfacher zu benutzen sind.
- Bei den Publikationen steht die Herausgabe der 7-bändigen **ERL Dokumentationsreihe für die Praxis** im Vordergrund. Mit dieser steht dem Lüftungsspezialisten nun ein gutes Grundlagenwerk zur Verfügung [38]. Weitere Berichte [17, 35, 37, 40] sind speziell für die Praxis erarbeitet worden.
- Generell haben die Projekte an Praxisnähe gewonnen, sei es, indem die Ergebnisse zu neuen Planungshilfsmitteln führen oder weil sich die Industrie an den Projekten beteiligt. Besonders erwähnenswert sind hier folgende **Industrieprojekte**, welche schlussendlich zu Produkten führen sollen und bei denen erste **Prototypen** untersucht werden:
 - Organische Beschichtungen als Korrosionsschutz in Niedertemperaturheizkesseln [14],
 - Fehlererkennung in HLK-Anlagen [15],
 - DELTA, Contrôle optimum des stores [25],
 - Hochwärmedämmendes Verbandmauerwerk [33].

5. Ausblick

1995 steht die Ausarbeitung des Forschungsprogrammes 1996 - 1999 im Vordergrund. Folgende Programmschwerpunkte sind vorgesehen:

- Der Bereich **Planungshilfsmittel** wird nach wie vor ein zentrales Thema bleiben, da auf diesem Gebiet weitere Fortschritte erwartet werden und da dieser Bereich für viele Anwendungen eine Schlüsselstellung einnimmt. Besonderes Gewicht sollen dabei folgende zwei Teilbereiche einnehmen:
 - Integrale Planungshilfsmittel, welche die interdisziplinäre Optimierung von Energiesystemen ermöglichen [28],
 - Abnahme- und Diagnosehilfsmittel, zur raschen Überprüfung energierelevanter Planungswerte und des energetischen Zustandes.
- Auch der Bereich **Bauökologie** behält seine Bedeutung. Er wird mit zunehmendem Wissen immer mehr zum entscheidenden Kriterium für die Beurteilung energetischer Systeme, siehe auch [4]. Im Vordergrund stehen:
 - die gesamtheitliche Betrachtung energetischer, insbesondere auch haustechnischer Systeme,
 - die Verbesserung der dazu notwendigen Bewertungsmethoden und Datengrundlagen,
 - die Untersuchung der Rückbaubarkeit (Rückbau, Recycling, Entsorgung) energetischer Systeme,
 - die energetische Optimierung umweltschonender Bautechniken.
- Ein neuer Schwerpunkt soll die **Gebäudesanierung** darstellen. Die Gebäudesanierung und damit auch die energetische Sanierung ist energie- und umweltpolitisch von grösster Bedeutung. Die Thematik ist zwar an sich nicht neu, im Rahmen des Forschungsprogrammes sollen jedoch neue Strategien für dauerhafte Sanierungen untersucht und entwickelt werden. Massnahmen sollen untersucht werden, die eine Sanierung der Bauhülle für mindesten 50 Jahre und der Haustechnik für mindesten 30 Jahre sicherstellen. Deshalb sollen Projekte in folgenden Bereichen speziell gefördert werden:
 - Dauerhafte energetische Sanierungen (bezüglich Ziel und Technik),

- Konzepte für Absenkpfade des Energieverbrauchs bestehender Bauten, Untersuchung der Massnahmen und Prioritäten,
 - Gesamtkonzepte zur dauerhaften Sanierung von Hochkonjunkturbauten, insbesondere von Bürobauten.
- Zunehmende Bedeutung sollen auch die **Pilot- und Demonstrationsprojekte** erhalten. Ein besonderes Interesse besteht, wenn damit Forschungsergebnisse in die Praxis umgesetzt und so erprobt und weiterentwickelt werden können. Folgende Bereiche sind dazu prädestiniert:
- Projekte im Lüftungsbereich (Umsetzung ERL),
 - Gebäudesanierungen (Gesamtsanierungen und interessante Einzelmassnahmen),
 - Zusammenarbeit mit kommunalen Projekten.

Im Programm soll auch die Behandlung von Problembauten wie Kunsteisbahnen und Restaurationsgebäude, die 1994 noch nicht angegangen werden konnten, integriert werden. Dagegen musste das Projekt "Effiziente Energienutzung in Kirchen" fallengelassen werden. Einerseits sind in den letzten zwei Jahren gute neue Unterlagen zum energiegerechten Betrieb von Kirchen erschienen, andererseits sind die beiden Landeskirchen offenbar nicht interessiert, sich an weitergehenden Untersuchungen zu beteiligen.

6. Projektliste

- [1] G. Zweifel, EMPA, Dübendorf & P. Jaboyedoff, SORANE, Lausanne : *Thermische Simulation von Gebäuden.* (SB)
- [2] C. Roulet, EPF - Lausanne : *Refroidissement passif de bâtiments par ventilation naturelle.* (SB)
- [3] C. Roulet, EPF - Lausanne : *Participation de la Suisse au projet Européen Joule II PASCOOL.* (JB)
- [4] N. Kohler, IFIB / UNI - Karlsruhe : *Energie- und Stoffflussbilanzen von Gebäuden während ihrer Lebensdauer.* (SB)
- [5] N. Kohler, IFIB / UNI - Karlsruhe : *Optimierung von Gesamtenergieverbrauch, Umweltbelastung und Baukosten (OGIP / DATO).* (JB)
- [6] P. Steiner, EMPA, Dübendorf : *Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Insulated Envelope Parts, HAMIE (IEA / ECB # 24).* (JB)
- [7] R. Gehrig, C. Zellweger, EMPA, Dübendorf : *Schadstoffemissionsverhalten von Baustoffen.* (JB)
- [8] G. Meier, Ch. Schlatter, INST. TOXIKOLOGIE, Schwerzenbach : *Schadstoffimmissionen in renovierten, bewohnten Räumen.* (SB)
- [9] M. Fischer, K. Richter, EMPA, Dübendorf : *Energie- und Stoffbilanzen bei der Herstellung von Wärmedämmstoffen.* (SB)
- [10] C. Roulet, EPF - Lausanne : *Programme LESOKAI 2.0.* (JB)
- [11] T. Frank, EMPA, Dübendorf : *KOBRA (PC-Wärmebrückenatlas).* (JB)
- [12] R. Stulz, INTEP, Zürich : *Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten.* (SB)
- [13] T. Cerkez, EMPA, Dübendorf : *Energierrelevante Typenprüfungen für Öl- und Gasheizkessel mit Gebläsebrennern.* (JB)
- [14] M. Falier, EMPA, Dübendorf : *Organische Beschichtungen als Korrosionsschutz in Nieder-temperatur-Heizkesseln.* (SB)
- [15] J. Tödtli, LANDIS&GYR, Zug : *Fehlererkennung in HLK Anlagen (IEA / ECB # 25).* (JB)
- [16] U. STEINEMANN, Wollerau : *ERL-Publikationsreihe.* (SB)
- [17] C. Filleux, BASLER&HOFMANN, Zürich : *Handbuch neuer Lüftungssysteme.* (SB)

- [18] C. Roulet, EPF - Lausanne : *Multizone Air Flow Modelling (IEA / ECB # 23)*. (JB)
- [19] V. Dorer, EMPA, Dübendorf : *Air Infiltration and Ventilation Centre, AIVC (IEA / ECB # 5)*. (JB)
- [20] A. Moser, ETH - Zürich : *Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures (IEA / ECB # 26)*. (JB)
- [21] C. Roulet, EPF - Lausanne : *European Audit Project to Optimise Indoor Air Quality and Energy Consumption of Office Buildings (IAQ Audit)*. (JB)
- [22] H. P. Krüttli, AIR COMFORT, Winterthur : *Einsparung von elektrischer Energie in lufttechnischen Anlagen durch adiabatische Kühlung*. (JB)
- [23] C. Roulet, EPF - Lausanne : *Courant d'air dans les hangars*. (JB)
- [24] M. Zimmermann, EMPA, Dübendorf : *Low Energy Cooling (IEA / IECB # 28)*. (JB)
- [25] N. Morel, EPF - Lausanne : *DELTA, Contrôle optimum des stores*. (JB)
- [26] W. Hässig, BASLER & HOFMANN, Zürich : *Erfolgskontrolle an Öko-Bürohaus TENUM*. (JB)
- [27] R. FRAEFEL, Grüningen : *Dynamisches Wärmeverhalten innen gedämmter Klassenzimmer*. (JB)
- [28] M. El-Khoury, CSEM, Neuchâtel : *NEUROBAT-Vorstudie*. (SB)
- [29] S. Storelli, CREM : *Impacts énergétiques d'un équipement Low NOX*. (SB)
- [30] E. Walder, ETH - Zürich : *Weiterführung Ökoinventar für Energiesysteme*. (ZB)
- [31] F. Dinkel, CARBOTECH, Basel : *Standardsoftware für die Ökobilanzierung*. (SB)
- [32] K. Richter, EMPA, Dübendorf : *Ökologische Bewertung von Wärmeschutzgläsern*.
- [33] H. Gubler, VSZ, Zürich : *Hochwärmedämmendes Verbandmauerwerk*.

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(ZB) Zwischenbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

7. Referenzen

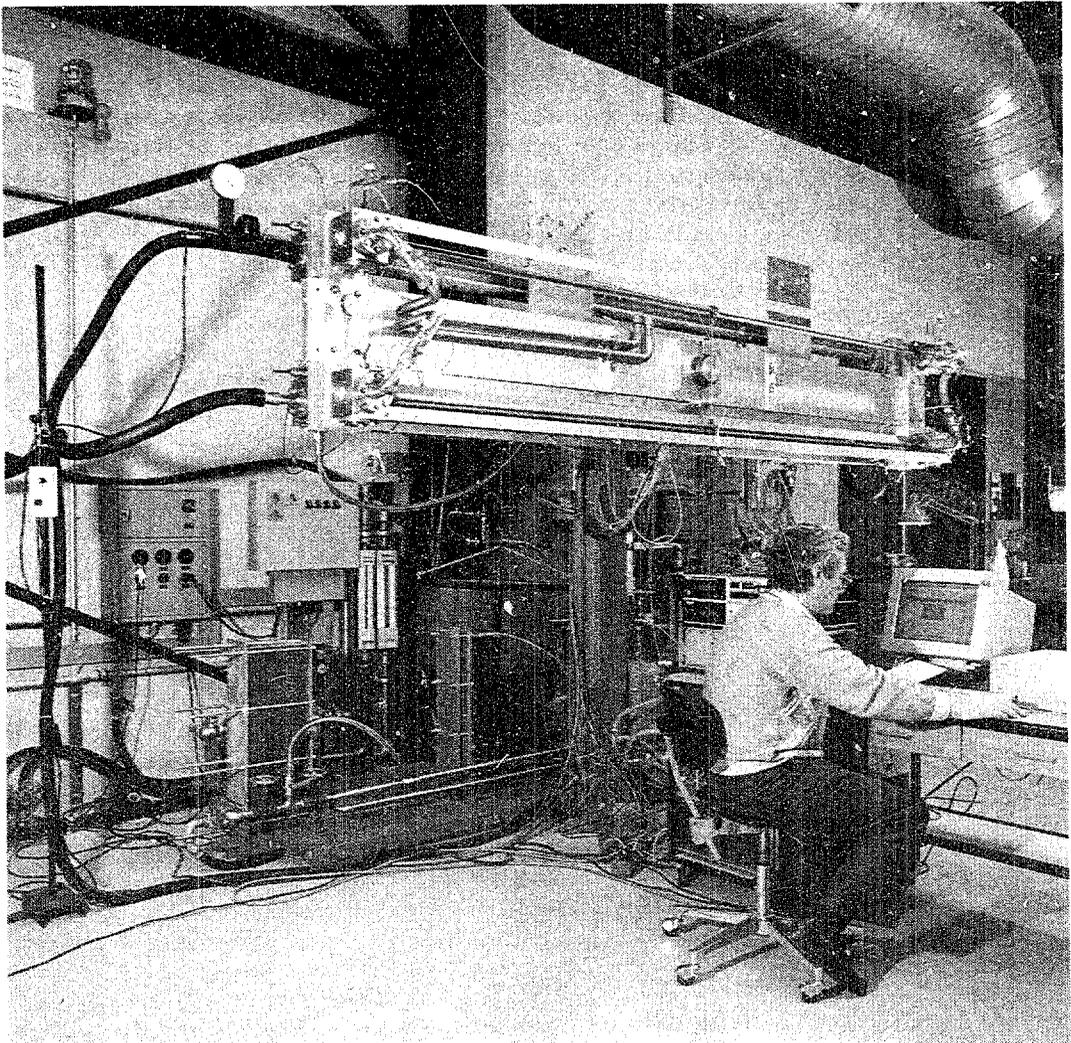
- [34] M. Zimmermann et al, KWH / EMPA, Dübendorf : *8. Schweizerisches Status-Seminar 1994 Energieforschung im Hochbau*, ETH - Zürich, 15.-16. Sept. 1994
- [35] M. Zimmermann et al, KWH / EMPA, Dübendorf : *Thermoelektrische Anwendungen in der Haustechnik*, Oktober 1994
- [36] M. Zimmermann et al., KWH / EMPA, Dübendorf : *Nationales Forschungsprogramm ERL abgeschlossen*, VSHL-Tagung 17. Mai 1994 / SIA Artikel-Serie, 8. Dezember 1994, Heft 50
- [37] B. WICK, M. BORNER, Widen : *Messbericht "Oberstufenzentrum Grünau, Sirnach"*, Oktober 1994
- [38] F. Widder et al., PSI, Villigen : *Forschungsprogramm Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden-Dokumentationsreihe für die Praxis*, VSHL Zürich, Mai 1994
- [39] F. Widder, PSI, Villigen : *Overview of the Program ERL*, Mai 1994
- [40] H. Bertschinger et al, KWH - EMPA, Dübendorf : *Hochwärmedämmende Wand- und Dachkonstruktionen*, April 1994

UMGEBUNGS - UND ABWÄRMENUTZUNG, WÄRME - KRAFT - KOPPLUNG

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Martin Zogg



Wärmeübergang bei der Verdampfung in Rohren

Ersatz von FCKW-hältigen durch umweltverträgliche Kältemittel: Versuchsanlage der ETH-Lausanne zur Untersuchung der Zweiphasenströmung und des Wärmeübergangs bei der Verdampfung in beliebig geneigten glatten und strukturierten Rohren.

1. Programmübersicht und Programmziele

Das Forschungsprogramm "Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung, UAW", befasst sich mit der Nutzung der Umgebungswärme (Luft, Erdboden, Grund- und Oberflächenwasser) und von Abwärme (Gebäude, industrielle Prozesse usw.) für die Raumheizung, zur Warmwasserbereitung und für industrielle Prozesse. Über 50 % des Gesamtenergie-Endbedarfs der Schweiz werden für diese Wärmeanwendungen benötigt. Davon entfallen ca. 20% auf Prozesswärme. Das Forschungsprogramm möchte die Wissenslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich höheren Anteil der **Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme oder aus Abwärme** gewinnen zu können. Bereits mit den heute verfügbaren technischen Lösungen wie Kombination BHKW / Elektrowärmepumpe, Gasmotorwärmepumpen oder Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **30 bis 45% an Primärenergie einsparen** und damit die **CO₂-Emission entsprechend reduzieren**. Zur Verbesserung dieser Systeme hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Betriebssicherheit und Kosten, zum Ersatz der FCKW-Kältemittel und zur vermehrten Verwendung von Biomasse (Holz!) wurden **im Jahr 1994 die folgenden Hauptziele** verfolgt:

- Verbessern der Nutzung von Umgebungsluft und Erdreich als **Wärmequellen** von Wärmepumpen,
- besseres Beherrschen der **Wärmeübertragungsvorgänge** alternativer und natürlicher Kältemittel,
- **monovalenter Betrieb von Wärmepumpen ohne Wärmespeicher** im Heizungssystem,
- Realisieren **neuer Wärmepumpenkonzepte**,
- Steigern der **Effizienz und Betriebssicherheit** von Wärmepumpen- und Blockheizkraftwerksystemen,
- Reduktion des Energiebedarfs **industrieller Prozesse**.

Die ausführlichere Jahresübersicht zum Forschungsprogramm [40] kann über ENET bezogen werden.

2. Durchgeführte Forschungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

WÄRMEQUELLEN UND WÄRMEÜBERTRAGUNG

Über die Ergebnisse der Messkampagne an einem **Schotterkoffer** zur Vorwärmung der Ansaugluft von Luft / Wasser-Wärmepumpen in Regensdorf wurde in [39] berichtet. Da ungünstige Luftführungsverhältnisse vorlagen, kann der Nutzen einer Luftvorwärmung in einem Schotterkoffer noch nicht abschliessend beantwortet werden [1].

Erdwärmesonden mit direkter Verdampfung des Kältemittels wiesen den Vorteil einer besseren Wärmeübertragung vom Erdreich ans Kältemittel auf. Da bei diesen Sonden ein Austritt von Kältemittel ins Erdreich langfristig nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, wurde eine **Sicherheits-Erdwärmesonde** entwickelt, bei der die Kupferrohre gegenüber dem Erdreich durch ein mit Wasser-Propylenglykol gefülltes Schutzrohr getrennt werden. Dazu wurden Systeme zum Erkennen von Leckagen entwickelt und getestet. Labor- und Feldversuche zeigten, dass sich der Gesamtwärmetransportwiderstand durch den Wasser-Propylenglykol-Sicherheitsmantel um rund 10% erhöht [2].

Ziel eines neuen Projekts ist das Ausarbeiten einer verlässlichen Versuchsmethode zum Erfassen der Wärmeübertragung und des Feuchte austausches in **regenerativen Luft / Luft-Wärmeübertragern** mit Sorptionsmittelbeschichtung unter Berücksichtigung der Mitrotations- & Leckageluftströme [21]. Flüssig-Flüssig-**Plattenwärmeübertrager** erlauben dank hoher Wärmeübergangskoeffizienten und praktisch reiner Gegenstromführung das Erreichen sehr kleiner Temperaturdifferenzen bei geringem Bauvolumen. Sorgfältig durchgeführte Druckverlust- und Wärmeübertragungsmessungen an drei Typen von Plattenwärmeübertragern mit verlöteten Platten führten zu neuen Berechnungsgleichungen für Widerstandsbeiwert und Wärmeübergangskoeffizient [3].

Nach umfangreichen Messungen zur **Wärmeübertragung bei der Verdampfung** an glatten Rohren konnten an der *im Titelbild* gezeigten Versuchsanlage Verdampfungsversuche an strukturierten Rohren durchgeführt werden [22].

Mit diesen werden dank viel besserer Benetzung des ganzen Rohrfumfangs wesentlich höhere Wärmeübergangskoeffizienten bei nur geringfügig grösserem Druckverlust erreicht. Weiter wurde der Einfluss des Schmieröls auf den Wärmeübergang bei der Verdampfung experimentell und theoretisch untersucht [6, 33, 34]. Bei der Verdampfung von Kältemitteln in Röhren treten zwei Effekte auf, die bei üblichen Berechnungen nicht berücksichtigt werden. Es sind dies der Einfluss des Schmieröls und die radiale Temperaturungleichverteilung bei unvollständiger Benetzung. Deshalb wurden zunächst Modelle zur Erfassung der bei unvollständiger Benetzung höheren Temperaturen der Gasphase erarbeitet [18]. Die Arbeiten konzentrieren sich nun auf die Erfassung des Schmieröleinflusses auf die Verdampfung [23].

WÄRMEPUMPEN UND KLEIN-BLOCKHEIZKRAFTWERKE

Die Untersuchung des Kompressorverhaltens bei variabler Drehzahl konnte infolge personeller Engpässe leider noch nicht abgeschlossen werden [24]. Über die Feldversuche an der Kleinwärmepumpe *ECOCAL* [4] wurde in [39] bereits berichtet. Mit dem Bau einer Vorserie wurde begonnen. Für die vergleichenden Untersuchungen zwischen einer konventionellen Erdkollektor-Wasser-Wärmepumpe (mit flüssigen Wärmeträger) und einem Wärmepumpensystem mit direkter Verdampfung des Kältemittels im Erdkollektor wurden im Handel erhältliche Kleinsysteme eingesetzt und nach den Richtlinien der betreffenden Hersteller installiert. Die Versuche verdeutlichten trotz der Vorteile des Systems mit Direktverdampfung für die Wärmeübertragung vom Erdreich ans Arbeitsmittel auch erhebliche Nachteile dieses Systems wie Verschmutzungsgefahr beim Füllen auf der Baustelle, Gefahr einer nicht optimalen Arbeitsmittelfüllung und hohe Dichtigkeitsanforderungen [5].

Die Entwicklung einer neuen zweistufigen Wärmepumpe für speicherfreien, monovalenten Luft/Wasser-Betrieb mit einem drehzahlvariablen Kompressor wurde parallel durch Computersimulationen und Laborversuche vorangetrieben. Die Hauptschwierigkeit der Ölverteilung auf die beiden Kompressoren wurde gemeistert. Für 1995 ist der Bau und das Ausmessen eines optimierten Funktionsmusters geplant [25].

Das prinzipielle Funktionieren der vorgeschlagenen Stirling-Kältemaschine mit Verdichtung und Expansion durch je ein Flügelrad mit rotierendem Flüssigkeitsring konnte zwar nachgewiesen werden. Die erwarteten Resultate wurden aber nicht erreicht [6]. Ziel der laufenden Forschungsarbeiten an einer Wärmepumpe mit Stirling-Antrieb und Resonanzrohr (Freikolben-Vuilleumier-Wärmepumpe) ist eine thermische Wärmepumpe für die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme. Im Berichtsjahr wurde eine Versuchsanlage fertiggestellt und in Betrieb genommen [26].

Die 870 kW-LiBr-Absorptionswärmepumpe in einem Nahwärmeverbund konnte nach den in [39] erwähnten Problemen erst im Juli 94 ordnungsgemäss in Betrieb genommen werden. Auch im Berichtsjahr verhinderten diverse Systemintegrationsschwierigkeiten die geplanten Messungen über eine ganze Heizsaison [27]. Dieses Projekt illustriert erneut die Wichtigkeit der optimalen Einbindung aller Komponenten in ein kompliziertes Wärmeversorgungssystem [19]. Über die erfreulichen Ergebnisse der Feld- und Labormessungen an der Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe (DAWP) wurde bereits in [39] berichtet. Leider war in der Schweiz bisher kein Hersteller zu finden, der diese hervorragende Entwicklung in ein Produkt für den Heizungsmarkt umsetzt. Ein Trost: Das Aggregat wird momentan durch eine grosse deutsche Firma getestet [7].

In einer Zusammenarbeit mit Russland wurde der Wissensstand auf dem Gebiet der Metallhydrid-Adsorptionswärmepumpen unter besonderer Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen in Russland zusammengestellt. Für den Bau eines 10 kW-Funktionsmusters wird ein Projektvorschlag ausgearbeitet [28].

Ein neuentwickeltes Klein-Blockheizkraftwerk wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Das Kompaktaggregat mit Einzylinder-Gasmagermotor und unregelmäßigem Oxidationskatalysator wird ohne Wärmespeicher ins Wärmeverteilungssystem eingebunden. Es läuft nach zwei behobenen Störungen zuverlässig. Mit NO_x -Emissionen in der Grössenordnung von 500 mg/m^3 ist ein Einsatz in Gebieten mit verschärften Emissionsgrenzwerten allerdings nicht möglich [29].

Die Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Untersuchungen an einem Funktionsmuster eines Freikolben-Stirling-Generators wurden in [39] bereits vorgestellt. Der Bau eines Prototypen mit 1.5 kW elektrischer Leistung wurde durch den Ausstieg eines ersten Industriepartners leider verzögert [8]. An einem Klein-

Blockheizkraftwerk mit einem V2-Stirlingmotor (V160-F, 160 cm³, Arbeitsdruck bei Vollast 200 bar) wurden Feldversuche durchgeführt. Nach einer gründlichen Revision funktionierte der mit Erdgas beheizte Motor in der Heizsaison 93 / 94 im Teillastbetrieb (bis 100 bar) während 1'750 Stunden störungsfrei. Trotz der dabei gemessenen bescheidenen Wirkungsgrade gab diese Untersuchung wertvolle Hinweise für die Weiterentwicklung [9].

AUSLEGUNG, SYSTEMOPTIMIERUNG UND DIVERSE

Über das Programm *WKK-Calc* zur Auslegung und Optimierung von Heizungsanlagen mit Blockheizkraftwerken wurde schon in [39] berichtet. Nach einer Überarbeitung wurden erste Lizenzen noch vor Jahresende an Planende verkauft [10]. Mit dem Programm *WP-Calc* wurde ein analoges Programm zur Auslegung und Optimierung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen entwickelt. Auch dieses basiert auf der Tagesgangmethode zur Bestimmung des stündlichen Wärmeleistungsbedarfs. Als Wärmequellen können Luft, Oberflächengewässer und Erdwärmesonden gewählt werden. Das Programm mit einer graphischen Benutzeroberfläche unter *Excel* wurde bereits in mehreren RAVEL-Kursen erprobt und laufend verbessert [11]. Mit den Programmen *WP-Calc* und *WKK-Calc* stehen nun ausgezeichnete Planungswerkzeuge für Heizsysteme mit Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken zur Verfügung. Sie können mit Benutzerhandbuch über INFOENERGIE - Brugg bezogen werden.

Wärmepumpensysteme mit einem Holzkessel zur Spitzendeckung verbinden die Komfortvorteile einer elektrischen Wärmepumpenheizung mit den Vorteilen einer CO₂ neutralen Holzverbrennung. Mit dem Simulationsprogramm *YUM-Holz* wurde zur Auslegung und Optimierung solcher Systeme ein praktisches Werkzeug für Heizungsplaner bereitgestellt [12]. Es kann mit Benutzerhandbuch ebenfalls über INFOENERGIE - Brugg bezogen werden.

Kompliziertere thermische und verfahrenstechnische Anlagen enthalten eine Vielzahl von Strömen mit unterschiedlichem Temperaturniveau. Diese sind im allgemeinen durch Wärmeübertrager, Verdampfer und Kondensatoren thermisch miteinander gekoppelt. Die *Pinch-Methode* ist ein effizientes Werkzeug zur Analyse und Optimierung solcher Systeme. Mit dem Code *PINCHLENI* für *Windows* steht nun dem planenden Ingenieur ein praktisches Werkzeug zum Betrieb unter *MS-Windows* zur Verfügung. Das Programm eignet sich auch zum Einarbeiten in die *Pinch-Methode* [13]. An der komplexen thermischen Optimierung von *Batch-Prozessen* wird weiter gearbeitet. Die um eine exergetische Analyse erweiterte *Pinch-Methode* wurde auf industrielle Prozesse (Essigsäureherstellung, Gipsplatten, Teigwaren, Dampfkreislauf in einem Kombikraftwerk) angewandt [30]. Über die Resultate des Projekts *dynamische Simulation von Fernwärmanlagen* wurde bereits in [39] berichtet [14].

Anhand einer messtechnischen Analyse von vier BHKW-Anlagen und einer Totalenergieanlage wurde das *dynamische Verhalten von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen* analysiert. Aufgrund der Ergebnisse dieser Messungen konnten die Planungsregeln und die Berechnungsgrundlagen für einen optimalen Einsatz von WKK-Anlagen verbessert werden [15]. Im Rahmen einer breit angelegten *Betriebsausfallanalyse für Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen* wurden achtzehn Anlagen mit Blockheizkraftwerken und vier Anlagen mit Gasmotor-Wärmepumpen eingehend analysiert. Dabei zeigte sich namentlich bei den GMWP-Anlagen ein erheblicher Verbesserungsbedarf [16].

Komplexere Heizungssysteme weisen leider einen hohen Wartungskostenanteil an den Betriebskosten auf. Zur Reduktion des Wartungsaufwands und zur Steigerung der Betriebszuverlässigkeit wurden *Expertensysteme für Wärmepumpen und Blockheizkraftwerke* entwickelt. Diese dienen der raschen Interpretation eintreffender Alarmmeldungen und lösen aufgrund einer ständigen Beobachtung möglichst weniger Betriebsgrößen die richtigen Wartungsmassnahmen rechtzeitig aus. Die Projektarbeiten befassten sich im Berichtsjahr mit der Störungsdiagnose und dem Langzeitverhalten von Wärmeübertragern und Emissionsminderungseinrichtungen für BHKW-Anlagen [31, 35]. In einer Parameterstudie wurde der Einfluss verschiedener Grössen auf die Bilanz der Gesamtemissionen beschrieben [20].

In Verkaufsläden, Industrie- und Gewerbebauten ist eine Raumkühlung im Sommer oft unumgänglich. Die *Adsorptions-Verdunstungskühlung (Desiccative Evaporative Cooling)* ist dazu eine energetisch sehr interessante Alternative zu den üblichen Kälteanlagen. Sie beruht auf dem Prinzip der Entfeuchtung der Zuluft durch

Adsorption und anschliessender Verdunstungskühlung. Zur Desorption genügt bereits Abwärme mit tiefer Temperatur. In einer Studie werden existierende Installationen und Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Adsorptions-Verdunstungskühlung analysiert [32]. Die Ergebnisse des Vorhabens **Wäschetrocknung im Trocknungsraum mit geregelter Ventilation** wurden in [39] bereits zusammengefasst [17].

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Auch in diesem Berichtsjahr konnte der Bereich Umgebungs- und Abwärmennutzung, Wärme-Kraft-Kopplung noch kräftig durch den NEFF unterstützt werden. Mit seinen Nachfolgefonds dem PSEL und dem FOGA konnten fruchtbare Kontakte geknüpft und eine Koordination angebahnt werden.

In zwei Workshops konnten die Bedürfnisse der Schweizer Betriebe aus den Bereichen verfahrens- und energietechnischer Prozesse sowie der öffentlichen Forschung und Lehre an den **Methoden der Prozessintegration** geklärt und ein fruchtbarer gegenseitiger Erfahrungsaustausch in die Wege geleitet werden. Sie waren wertvoll für das Einbringen unserer Wünsche und Angebote in das neue *IEA-Implementing Agreement on Process Integration* und das Formieren einer nationalen Arbeitsgruppe. Die Schweiz ist diesem neuen *Implementing Agreement* bereits beigetreten. Sie wird vorerst nur bei der Erfassung der Industriebedürfnisse, bei der Übersicht über die vorhandenen und die sich in Entwicklung befindenden Methoden sowie bei der Ausarbeitung einer Strategie zur weiteren Entwicklung der Methoden der Prozessintegration mitwirken.

Die internationale Zusammenarbeit im Wärmepumpenbereich fand auch dieses Jahr in erster Linie über die schweizerische Beteiligung am *Implementing Agreement for a Programme of Research, Development, Demonstration and Promotion of Heat Pumping Technologies* (kurz *IEA Heat Pump Programme*) statt. Das *Heat Pump Center* brachte uns weitweite Informationen und Impulse zur Entwicklung der Wärmepumpentechnologie. Innerhalb des *Swiss National Teams* fand wiederum ein reger Informations- und Gedankenaustausch zwischen verschiedenen schweizerischen Gruppierungen zur Förderung der Wärmepumpentechnologie statt. Über den Schlussbericht **Erfahrungen mit neuen Kältemitteln in Verdampfern** des *Implementing Agreements on Heat Pumping Technologies* [36] wurde im Juni 94 im Rahmen eines **Workshops** an der ETH-Lausanne orientiert. Dieser Schlussbericht fasst den Stand des Wissens zum Wärmeübergang und zum Druckverlust bei der Verdampfung von Kältemitteln vergleichend zusammen. Er ist allen zu empfehlen, die sich mit dem Einsatz alternativer Kältemittel beschäftigen. Über die im Rahmen von [22] in der Schweiz laufenden Untersuchungen wurde an der *10th International Heat Transfer Conference* in Brighton berichtet [33, 34].

Der Ausstieg aus den FCKW-Arbeitsmedien aktualisierte die Frage nach der Sicherheit von Alternativen. Ihr wurde im Rahmen des Projekt *Working Fluid Safety* nachgegangen. Der Schlussbericht [38] enthält insbesondere zu den Sicherheitsaspekten von Ammoniak (R717) und Propan (R290) auch für den Praktiker wertvolle Informationen und Analysen. Nach einer Klärung der schweizerischen Bedürfnisse und Möglichkeiten an einem Workshop im März 94 mit Vertretern aus Industrie und Forschung trat die Schweiz dem neuen Projekt *Compression Systems with Ecologically Safe Working Media* bei. Dieser befasst sich mit dem Schliessen von Wissenslücken zum breiten Einsatz natürlicher Arbeitsmedien in Wärmepumpensystemen.

Unsere Bemühungen zur **Prozessintegration** werden durch ein EU - Projekt (Joule II) im Bereich der Energieeinsparung bei Rektifikationsprozessen unterstützt. Über die Projekte [22, 30] werden auch enge Beziehungen zum ASHRAE und zum *Harwell Laboratory* in England gepflegt. Die Zusammenarbeit mit Russland konnte durch eine Übersichtsstudie zu den Aktivitäten der GUS-Staaten im Bereich der Metallhydrid-Adsorptionswärmepumpe gefunden werden [28]. Die **Internationale Absorptionswärmepumpenkonferenz** [37] vom Januar 1994 brachte uns wertvolle Impulse für unser Vorhaben eines Absorptionswärmepumpen-Kessels. Durch den Besuch der Begleitgruppe des Programms beim Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung in Garching/München konnten interessante Kontakte in aktuelle Gebiete der Absorptionskälte- und Absorptionswärmemaschinen grosser Leistung geknüpft werden.

4. Transfer in die Praxis

Da rund die Hälfte der Projektarbeiten von privaten Firmen durchgeführt wurde, ist die direkte **Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft sehr eng**. Im Berichtsjahr konnte ein weiteres gemeinsames Projekt mit Hochschule und Industrie [25] gestartet werden. Zahlreiche Forschungsarbeiten können direkt zu **neuen Produkten** im Sinne der eingangs erwähnten Zielsetzungen führen [2, 3, 4, 5, 25]. Die Ergebnisse anderer Arbeiten sind **gute Grundlagen für eine industrielle Weiterentwicklung** [8, 17, 22, 26]. Angesichts der tiefen Energiepreise fehlt allerdings in manchen Fällen der Mut zur industriellen Realisierung. Wesentlich besser funktioniert die Umsetzung bei den **Auslegungs- und Optimierungswerkzeugen** [10, 11, 12, 15, 16, 20, 31]. Sie finden leichten Eingang in die Planung, die industrielle Praxis und den Betrieb komplexerer Heizungsanlagen. Diverse RAVEL-Kurse helfen bei der Verbreitung, Schulung in der Anwendung und Verbesserung dieser Werkzeuge wesentlich mit. Zu erwähnen ist hier auch ein erster Kurs zur *Pinch*-Methode [13, 30].

An der **Herbsttagung des Schweizerischen Vereins von Wärme- und Klimaingenieuren SWKI** im November 94 hatten wir Gelegenheit, unsere Forschungsanstrengungen einem breiten Kreis von Anwendern aus der Praxis vorzustellen und den Nutzen für die Praxis an den Beispielen von zwei abgeschlossenen Projekten zu illustrieren. Neben Publikationen der Projektleiter werden die in den Projekten erarbeiteten Ergebnisse und Werkzeuge durch Kurzfassungen des Programmleiters in Fachzeitschriften vorgestellt. **Zahlreiche P+D-Projekte** halfen, das in der Forschung Erarbeitete in gut funktionierende Anlagen umzusetzen.

5. Ausblick für 1995

Für 1995 drängt sich keine wesentliche Kurskorrektur auf. Den Absorptionssystemen ist künftig allerdings vermehrtes Gewicht beizumessen. Dies nicht zuletzt infolge des immer ausgeprägteren Preisunterschieds zwischen fossiler und elektrischer Energie. Auch in Richtung einer optimalen Integration von Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken in die Heizungssysteme und der Emissionsreduktion bei Blockheizkraftwerken über den ganzen Betriebszyklus sind verstärkte Anstrengungen nötig. Im Rahmen dieser Ziele und unseren beschränkten finanziellen Mitteln wird die Priorität auf jene Forschungsarbeiten gelegt, die zu einer **treffsichereren Planung**, einer **besseren Systemoptimierung** oder mit hoher Wahrscheinlichkeit zu mittelfristig **vermarktbareren Produkten mit hohem Energiesparpotential** führen. Dabei möchten wir im Sinne von **Gemeinsam Forschen - individuell realisieren** weiterhin Privatfirmen bereits im Stadium der Funktionsmusterentwicklung zur Mitwirkung gewinnen.

Ebenfalls im Interesse der Umsetzung führen wir am 3. Mai 1995 an der ETH-Zürich eine **öffentliche Tagung** mit dem Thema "Heizungssysteme mit Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken: Planungs- und Optimierungsmethoden mit PC-Programmen" durch. Das Programm mit Anmeldeformular ist bei ENET zu beziehen.

6. Projets P + D de chaleur ambiante et de rejets de chaleur

Fabrice Rognon, chef du programme P+D

En 1994, au total 34 projets ont bénéficié d'un soutien financier dans le cadre du programme P+D de chaleur ambiante et de rejets 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 ≤ 2 MW);
- 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 pompes à chaleur utilisant des **technologies nouvelles à l'échelle 1:1** (par exemple, la variation de vitesse, les nouveaux fluides caloporteurs).

La majorité des projets représente la mise en application ou le prolongement de projets de recherche antérieurs. Le nombre de projets déposés s'est stabilisé. La qualité des projets est généralement bonne.

Les priorités pour 1995 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. La collaboration et la coordination avec le **groupement promotionnel suisse pour la pompe à chaleur** et les secteurs concernés d'**ENERGIE 2000** sont établies et seront renforcées. Elles devraient porter leurs premiers résultats concrets dès 1995.
- 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.

7. Liste der Forschungsprojekte im Jahr 1994

- [1] W. J. Eugster, R. J. Hopkirk, POLYDYNAMICS - Zürich : *Messprojekt Schotterkoffer EKZ Regensdorf*. (SB, ENET-Nr. 910 0223/1)
- [2] K. Ochsner, OCHSNER ENERGIETECHNIK - Birr-Lupfig & ETH - Zürich : *Sicherheits-Erdwärmesonden für Direktverdampfung*. (SB, ENET-Nr. 9200311)
- [3] A. Bölc, R. Bogaert, LTT / EPF - Lausanne : *Etudes expérimentales et théoriques des échangeurs de chaleur à plaques*. (SB, ENET-Nr. 9201071)
- [4] M. Lippuner, HOVAL INTERLIZ - Vaduz : *Kompakt Wärmepumpe - Messphasen 1 und 2*. (SB, ENET-Nr. 9106540)
- [5] R. Rhyner, CREM - Martigny : *Test comparatif de deux pompes à chaleur*. (SB, ENET-Nr. 9300941)
- [6] K. Malach, HTL- Bern : *FCKW-freies Kälteaggregat, Bau und Ausmessung eines Funktions-musters*. (SB, ENET-Nr. 9200701)
- [7] H. Stierlin, U. Wassermann, CREATHERM - Schlieren & W. Dörfler, J. Bösel, IVK / ETH - Zürich : *Messungen an Diffusions-Absorptions-Wärmepumpen DAWP*. (SB, ENET-Nr.920 0651/2)
- [8] C. Gaegauf, S. Delzer, Th. Schmidt, H. P. Zumsteg, ÖKOZENTRUM - Langenbruck : *Untersuchung eines Freikolben-Stirling-Generators*. (SB, ENET-Nr. 920521)
- [9] B. Nussbaumer, EICHER+PAULI - Bern : *Versuchsbetrieb mit dem Stirlingmotor VI60-F*. (SB, ENET-Nr. 9201061)
- [10] M. Stalder, A. Schweizer, EICHER+PAULI - Zürich : *Dimensionierung WKK: Rechenhilfe "WKK-Calc"*. (SB, ENET-Nr. 9201101)
- [11] M. Nani, HIL - Buchs : *Software-Evaluation für Wärmepumpen und WKK-Anlagen, Phase 3*. (SB, ENET-Nr. 9106480)
- [12] Th. Afjei, D. Wittwer, INFEL / KRE - Zürich & J. GOOD - Schwerzenbach : *Simulation von Wärmepumpenheizsystemen mit Holzkessel*. (SB, ENET-Nr. 9201141)
- [13] F. Staine, LENI / EPF - Lausanne : *Logiciel PINCHLENI (PC Windows)*. (SB, ENET-Nr. 9400601)
- [14] J. Kunz, LASEN / EPF - Lausanne : *Simulation of the Dynamic Behavior of District Heating Systems*. (SB, ENET-Nr. 9100194)
- [15] M. Stalder, A. Schweizer, Hp. Eicher, EICHER+PAULI - Zürich : *Dynamische Betriebsweise von WKK- und WP-Anlagen, Phase II*. (SB, ENET-Nr. 9100203)
- [16] C. Erb, A. Schweizer, Hp. Eicher, EICHER+PAULI - Zürich : *Analyse der Betriebsausfälle von gasbetriebenen BHKW- und GMWP-Anlagen*. (SB, ENET-Nr. 9106510)
- [17] J. Nipkow, W. Gygli, ARENA - Zürich : *Wäschetrocknen mit geregelter Ventilation und Heizung*. (SB, ENET-Nr. 9132352)

- [18] M. CONDE, Zürich : *Simulationsmodelle Kompressionswärmepumpe, fortgeschrittene Verdampfermodelle, Verdampfung unter Berücksichtigung des therm. Ungleichgewichtes.* (ZB, ENET-Nr. 9300221)
- [19] P. Krüsi, AMENA - Schlieren : *Messprojekt "Im Bilander" Brugg.* (ZB, ENET-Nr. 9106660)
- [20] P. Neuenschwander, LES / ETH - Zürich : *Überwachung und Bewertung der Schadstoffemissionen bei Blockheizkraftwerken.* (ZB, ENET-Nr. 9100164)
- [21] R. Furter, P. W. Egolf, B. Frei, ZIL - Horw : *Wärmerückgewinnung durch regenerative Luft/Luft-Wärmeübertrager.* (JB, ENET-Nr. 9400231)
- [22] D. Favrat, LENI / EPF - Lausanne : *Evaporation de nouveaux réfrigérants sur des tubes à surface améliorée.* (JB, ENET-Nr. 9200891)
- [23] M. CONDE, Zürich : *Simulationsmodelle Kompressionswärmepumpe, Fortgeschrittene Verdampfermodelle.* (JB, ENET-Nr. 9300221)
- [24] M. Ehrbar, HTL - Buchs : *Messungen an Wärmepumpen-Kompressoren.* (JB , ENET-Nr. 9200871)
- [25] D. Favrat, LENI / EPF - Lausanne : *Pompe à chaleur bi-étagée à haute performance.* (JB, ENET-Nr. 9400101)
- [26] J.P. Budliger, TELMECO - Plan-les-Ouates : *Wärmepumpe mit Stirling-Antrieb und Resonanzrohr.* (JB, ENET-Nr. 9300631)
- [27] P. Krüsi, AMENA - Schlieren : *Messprojekt "Im Bilander" Brugg.* (JB, ENET-Nr. 9106660)
- [28] A. Rasumowskij, KOROWINSKOJE SCH. - Moskau : *Metallhydrid-Adsorptionswärmepumpe, Phase1.* (JB, ENET-Nr. 9401011)
- [29] R. Ruch, EICHER+PAULI - Liestal : *Klein-Blockheizkraftwerk-Anlage.* (JB, ENET-Nr. 9300671)
- [30] 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 facteurs exergétiques: extensions du logiciel PinchLENI.* (JB, ENET-Nr. 9200881)
- [31] P. Neuenschwander, LES / ETH - Zürich: *Expertensystem BHKW (Expertensystem für präventive Wartung und Alarminterpretation in der Haustechnik, Phase 2: Blockheizkraftwerke, Teil 2).* (JB, ENET-Nr. 9100164)
- [32] J. P. BOREL, Cully: *Etude du potentiel d'application de la climatisation par sorption.* (JB, ENET-Nr. 9400721)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

8. Referenzen

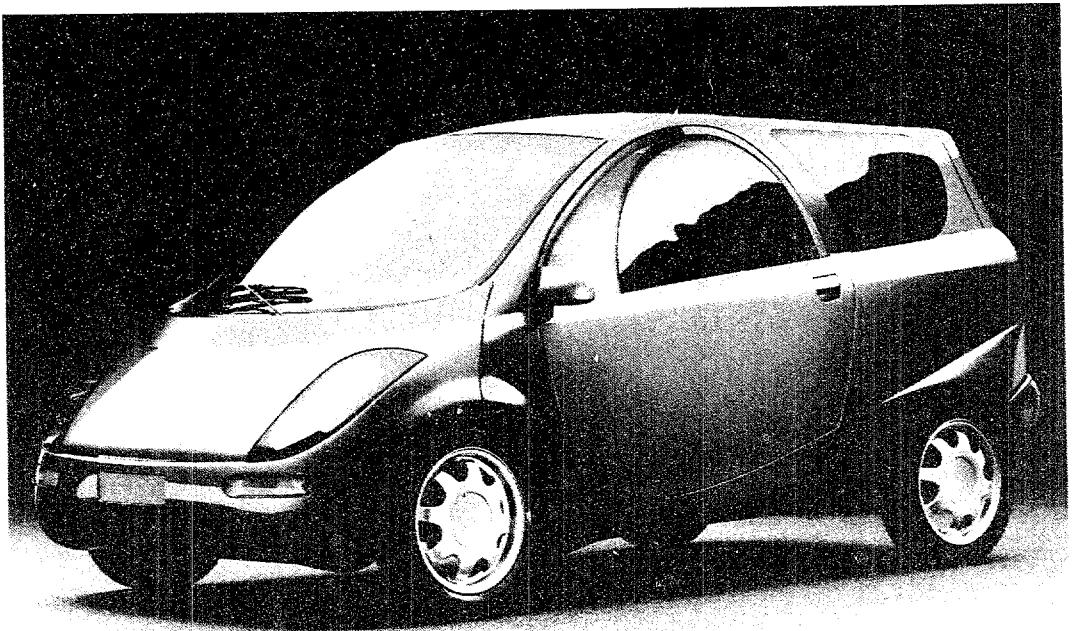
- [33] J. R. Thome : *Two-phase heat transfer to new refrigerants, 10th Int. Heat Transfer Conference, Brighton (UK), July 14-18, 1994.*
- [34] N. Kattan, J.R. Thome, D. Favrat : *Intube flow boiling of R-502 and two near-azeotropic alternatives, 10th Int. Heat Transfer Conference, Brighton (UK), July 14-18, 1994.*
- [35] P. Neuenschwander, D.E. Maurer, L. Rychlicke : *Long-term monitoring and wear prediction by means of wear models, IFAC-Symposium 13.-16. Juni in Espoo (SF).*
- [36] P. Melin : *The Behaviour of HFC-134a, HFC152a and HCFC-22 in Evaporators, IEA Heat Pump Report HPP-AN17-1, 1994, ENET-Art. 30240.*
- [37] R. Radermacher, K.E. Herold, W. Miller, H. Perez-Blanco, W.Ryan, G.Vliet : *Proceedings of the international absorption heat pump conference, ASME, AES-Vol.31, New York 10017.*
- [38] J. Berghmans : *Working Fluid Safety, IEA Heat Pump Report HPP-AN20-1, 1994, ENET-Art. 30173.*
- [39] M. Zogg : *Jahresübersicht 1993 zum Forschungsprogramm UAW, ENET-Artikel 30167.*
- [40] M. Zogg : *Jahresübersicht 1994 zum Forschungsprogramm UAW, ENET-Artikel 30262.*

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IM VERKEHR

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Bruno Albrecht



Versuchsträger *ESORO H301 Family*

Dieses Leichtmobil mit dem Parallelhybrid-Konzept enthält ein neues, leistungsfähiges Antriebssystem.

1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1994

Im Rahmen des Forschungsprogramms "Rationelle Energienutzung im Verkehr" sind die Schwerpunkte dort gesetzt, wo mittel- bis langfristig etwas Substantielles hinsichtlich rationellem Energieeinsatz erwartet werden kann.

Hauptziel für 1994 war vor allem eine vermehrte Zusammenarbeit mit Industriepartnern bei vorwiegend technisch orientierten Projekten. Neue Projekte wurden dabei in erster Linie aufgrund ihrer Bedeutung bezüglich Energieeinsparung und Verminderung der Umweltbelastung eingeleitet.

Zuhanden der CORE wurde im Berichtsjahr ein Grobkonzept des Forschungsprogramms 1996 / 99 erarbeitet.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

a) *Leichtybridfahrzeug (Benzin / Elektro)*

Das wichtigste Ziel des Projektes des Zentralschw. Technikum Luzern, ZTL in Horw war, die technischen Möglichkeiten eines Leichtmobils mit einem Hybridantrieb aufzuzeigen [1]. Hierbei stand die Verwirklichung eines Leichthybrids im Vordergrund, für dessen Antrieb eine Kombination von Elektroantrieb und Verbrennungsmotor dient. Dieses Konzept nützt einerseits die Vorteile eines Elektromotors (hohes Moment bei tiefer Drehzahl, hoher Teillastwirkungsgrad und die Möglichkeit des Rekuperierens) andererseits aber auch diese eines Verbrennungsmotors (hohe Energiedichte des Treibstoffs und guter Wirkungsgrad bei grosser Last).

Die technischen Hauptziele waren die Erfüllung der *Ultra Light Electric Vehicles ULEV*-Schadstoffgrenzwerte sowie ein Treibstoffverbrauch von weniger als 3 Liter/100 km. Beide Ziele konnten erfüllt werden, was zeigt, dass beim heutigen Individualverkehr noch ein grosses Sparpotential brach liegt.

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurde das Fahrzeug *Blue Angel* an diversen Ausstellungen und durch zwei Beiträge im Schweizer Fernsehen DRS der Öffentlichkeit vorgestellt. Den Höhepunkt bildete dabei die Präsentation an der *Advanced Research Projects Agency* - Konferenz in Sacramento.

Als Nachfolgeprojekt plant des ZTL ab Beginn des Jahres 1995 die Erarbeitung eines "Ecomotors für Leichtmobile (Leichtybrid II)". Im Gegensatz zum bestehenden Fahrzeug aus dem abgeschlossenen Projekt sollen die Batterien, welche das problematischste Element des bisherigen Hybridkonzeptes darstellen, zugunsten eines "intelligenten elektrischen Getriebes", bestehend aus Generator, Leistungselektronik und Elektromotor, praktisch entfallen.

b) *Gesamtökologische Beurteilung von Antriebssystemen für Leichtmobile*

Das Projekt der Firma ECOSENS in Brüttsellen umfasste die Erarbeitung eines aus Sicht der Umweltverträglichkeit optimalen Konzept für Leichtmobile unter besonderer Berücksichtigung von Antriebssystemen (Energieträger und -verbrauch) sowie einer Materialanalyse (Konstruktionsmaterialien sowie -art) [2]. Zu diesem Zweck werden drei unterschiedlich definierte Leichtmobilkategorien (Nahverkehrs- / Pendlervfahrzeug, Reiselimousine und Agglomerations-Kleintransporter) bewertet. Der Einfluss der Karosserie- und Fahrwerksmaterialien blieb dabei unberücksichtigt.

Das Vorgehen bestand darin, aus der gesamten in der Schweiz erkennbaren Palette verfügbarer Fahrzeuge, einschliesslich Prototypen, jene Konzepte auszuwählen, die nach Leistungs- und Gewichtsdaten in eine der drei Leichtmobilkategorien passen. Parallel dazu wurde für den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeuges von der Primär- über die Sekundärproduktion, Energieerzeugung, Betrieb über 100'000 km, Unterhalt und Entsorgung eine Relevanzmatrix der zu prüfenden Umweltkriterien erstellt. Für die ökologische Bilanzierung wurde das "Ökoinventar ETH" von 1994 herangezogen. Für die Ermittlung der betrieblichen Emissionen wurde der Fahrzyklus FTP 75 angewandt.

Die Beurteilung der verschiedenen Antriebe nach Umweltkriterien, Antriebskonzepten sowie Energieverbrauch und Energieherkunft zeigte, dass aus technischer Sicht keines der untersuchten Antriebskonzepte eine Patentlösung ohne Nachteile darstellt. Die emissionsrelevanten Stadien sind Betrieb, Bereitstellung der Betriebsenergie und Wartung bei Batterieantrieben. Am wenigsten ins Gewicht zu fallen scheinen die Emissionen bei einer korrekten Entsorgung. In bezug auf den Energieverbrauch zeigen insbesondere die Hybrid- wie auch die Elektroantriebe höhere Wirkungsgrade dank besseren Verbrauchszahlen bei der Bruttoenergie. Diese Vorteile werden jedoch durch einen höheren Aufwand für die Produktion und die Batteriewechsel weitgehend zunichte gemacht. **Der Dieselantrieb schneidet beim Energieverbrauch am besten ab**, während der Elektroantrieb allgemein und insbesondere der Elektroantrieb mit Bleibatterien und Strom-Mix aus 12 europäischen Ländern inkl. Schweiz von allen untersuchten Antrieben am ungünstigsten abschneidet, letzterer mit fast 70 % höherem Bruttoenergiebedarf. Bei Verwendung des CH-Energiemixes ergibt sich beim Elektroantrieb mit Bleibatterien gegenüber dem Dieselantrieb ein höherer Bruttoenergiebedarf von noch fast 40 %.

Die wichtigsten Ergebnisse des Projektes wurden an der *International Symposium on Advanced Transportation Applications ISATA* in Aachen präsentiert.

c) Vorstudie Zweiradentwicklung

Das Ziel dieser vom Verein SOLARMOBILGRUPPE Burgdorf durchgeführten 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 [3]. Dabei wurden der Ist-Zustand dokumentiert und analysiert, ein Massnahmenkatalog erstellt sowie verschiedene Szenarien diskutiert.

Die aus einer Marktforschung ermittelten Schwachpunkte in bezug auf die Velobenützung lassen sich in drei Problemkreise einteilen: Infrastrukturprobleme, Schwachpunkte am Fahrrad sowie gesellschaftliche Probleme und Akzeptanz. Anhand dieser verschiedenen Schwachpunkte liessen sich verschiedene Massnahmen formulieren, die die Stellung des Fahrrades verbessern helfen sollen. Als Grundsatz konnte hierbei formuliert werden, dass nicht die technische Weiterentwicklung des Fahrzeugs im Vordergrund stehen muss, sondern dass vor allem mehr Sicherheit für die Benutzer durch den Ausbau der Radfahrerinfrastruktur erforderlich ist.

d) Mechanische Komponenten für Leichtmobile

Das von der Arbeitsgemeinschaft BUCHER / HORLACHER / ESORO durchgeführte Projekt umfasste die Optimierung von mechanischen Komponenten für die speziellen Bedürfnisse von Leichtfahrzeugen. Das Projekt gliederte sich in zwei Teile: Weiterentwicklung der bewährten Teile einerseits und Neuentwicklung der kritischen Komponenten bis zur Umsetzung in eine kostengünstige, umweltgerechte und energieoptimierte Serienfertigung andererseits.

Nachdem der erste Teil des Projektes mit den letzten Fahrversuchen bereits im letzten Jahr abgeschlossen werden konnte, fand der zweite Teil Ende 1994 seinen Abschluss. Die Umsetzung der Resultate aus dem ersten Teil des Projektes, hin zu einer kostengünstigen, umweltgerechten und energieoptimierten Nullserienfertigung führte dahin, dass ab 1996 ein speziell auf Leichtmobile adaptiertes und für die Serienanwendung vorgesehenes Fahrwerk angeboten werden kann.

e) Grenzüberschreitender Strassengüterverkehr 1993

Das von der Arbeitsgemeinschaft SIGMAPLAN / POLYQUEST in Bern bearbeitete Projekt umfasst die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der vom Bundesrat veranlassten Erhebung "Grenzüberschreitender Strassengüterverkehr 1993" [4]. Damit wurde die Auslastung der ausländischen Fahrzeuge bezüglich Gewicht und Laderaum, der Abfahrts- und Bestimmungsorte sowie die Art der transportierten Ware erfasst.

Als wichtigste Ergebnisse sind zu erwähnen:

- Der Leerfahrtenanteil bei den ausländischen Güterfahrzeugen beträgt 35 %.
- Von den beladenen ausländischen Fahrzeugen sind 33 % bis zum zulässigen Ladegewicht ausgelastet.

Aus diesen Ergebnissen zu schliessen, dass die nicht bis zum zulässigen Ladegewicht ausgelasteten Fahrzeuge noch freie Kapazität aufweisen, wäre aber falsch, da bei 61 % dieser Fahrzeuge die Ladefläche voll belegt ist und die Waren nicht weiter stapelbar sind oder das Ladevolumen voll ausgenützt ist. Je nach Auslastungskriterium zeigt sich, dass 73 % der beladenen Fahrzeuge voll ausgelastet sind, da die Gewichtslimite erreicht ist und / oder aus Platzgründen keine Ladung mehr aufgenommen werden kann.

f) Neuartiger Hybridantrieb für Leichtmobile (Benzin / Elektro)

Dieses von der Firma ESORO in Zürich durchgeführte Projekt war als Vorprojekt zur praktischen Verifizierung einer von der ESORO patentierten Parallelhybrid-Konfiguration klassifiziert [5]. Die Ziele waren minimales Gewicht bei hoher Leistungsfähigkeit, optimaler Einsatz des Verbrennungsmotors mittels geeigneter Antriebsstrategie, Kompatibilität zu den mechanischen Komponenten für Leichtmobile und eine höhere Fahrzeugverfügbarkeit im Vergleich zum reinen Elektroantrieb.

Dabei wurde der gesamte Antrieb von Grund auf entwickelt, hergestellt und auf dem Prüfstand sowie auf der Strasse getestet. Anlässlich des Automobilsalons in Genf und der ISATA 94 in Aachen wurde das Hybridkonzept mit dem Fahrzeug *ESORO H301 Family* der Fachwelt präsentiert (vgl. Titelbild).

Da die im Rahmen des Projektes gesteckten Ziele weitgehend erreicht werden konnten, ist im Rahmen eines Nachfolgeprojektes für 1995 / 96 eine eingehendere und umfangreichere Weiterentwicklung vorgesehen, die mit den Schwerpunkten Verbrauchsverminderung, Emissionsverminderung kompaktere Masse und Minimierung des Nebenaggregataufwandes realisiert werden soll.

WEITERLAUFENDE PROJEKTE

a) Ökomobil Hybrid III B

Dieses bis Ende 1995 dauernde Grossprojekt von 8 ETHZ-Instituten umfasst die Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines umweltschonenden Antriebskonzeptes für das Ökomobil Hybrid III B mit geringem Energieverbrauch und minimalen Emissionen [6].

Folgende Arbeiten wurden in diesem Jahr ausgeführt:

- Die Schwungradgruppe wurde montiert, ausgetestet und mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt. Erste Taktversuche zeigten, dass der Verbrennungsmotor wie geplant gestartet werden kann.
- Das Getriebe wurde gefertigt und in Wolfsburg montiert. Die Hydraulikteile wurden ausgelegt, konstruiert und gefertigt.
- Aufgrund der Erfahrungen mit der ersten Elektromaschine wurde eine verbesserte Version aufgebaut und am Prüfstand untersucht. Die Leistungselektronik wurde aufgebaut und mit einem Satz Bleibatterien auf dem Prüfstand überprüft.

- Die Fahrstrategie konnte an einem Fahrzeugmodell mit der Berücksichtigung von Wirkungsgraden getestet und verbessert werden,
- Bei der Modellierung des Kettenwandlers konnte eine detaillierte Modellstruktur gefunden werden, die neben der mechanischen auch die hydraulischen Systeme umfasst.

Aus heutiger Sicht wird davon ausgegangen, dass die gesteckten Projektziele grundsätzlich erreicht werden können. Diesbezügliche Unsicherheiten bestehen allerdings noch beim komplexen Getriebe.

Teile der Arbeit wurden an der *Studiengesellschaft für Energiespeicher und Antriebssysteme* Jahreskonferenz in Detroit, der *IEEE Conference in Control Application in Glasgow* und an der *Electric Vehicle Society Conference* in Los Angeles vorgestellt.

b) Optimierung des thermischen Antriebes für Leichtmobile

Im Rahmen des seit Frühjahr 1994 laufenden und bis Ende 1995 dauernden Projektes der Abgasprüfstelle an der Ingenieurschule Biel soll das Minderungspotential der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs bei Benzin- und Dieselmotoren ermittelt werden [7]. Mit der Ausrüstung zweier Kleinmobil-Basisfahrzeuge mit Benzin- und Dieselmotoren und Messungen muss eine Vergleichsbasis geschaffen werden. Durch Umrüstung der Motoren in Zusammenarbeit mit der Industrie und weitere Messserien sollen anschliessend die Minderungspotentiale festgestellt werden.

Folgende Arbeiten wurden bis anhin ausgeführt:

- Beschaffung des Versuchsmaterials, Vorbereitung von zwei Kleinmobilen und Messungen an der Ingenieurschule Biel,
- Betrieb und Erfahrungen mit den Basisfahrzeugen. Gleichzeitige Vorbereitung der Tauschmotoren und der Zusatzeinrichtungen im Hinblick auf Verbesserungen der Emissionen und des Verbrauchs.

c) Grundlagen für die Inverkehrsetzung von Leichtmobilen

Das Ende 1994 gestartete und bis Anfang 1995 dauernde Projekt wird von der Firma PROTOSCAR in Rovio ausgeführt. Ziel dieses Projektes ist, während der 3-monatigen Vernehmlassungs-Frist die "Verordnung über den Bau und Ausrüstung der Strassenfahrzeuge (BAV)" auf ihre Akzeptanz bezüglich der relevanten Normierungsfragen im Zusammenhang mit der Verbreitung und insbesondere der Förderung von Leichtmobilen zu überprüfen. Dazu sind allfällige erforderliche Änderungsvorschläge unter Berücksichtigung u.a. der folgenden Beurteilungskriterien zu erarbeiten:

- In- und ausländische Vorschriften,
- Energie, Sicherheit, leichtmobilbezogene Umweltaspekte,
- Produktion, Betrieb und Entsorgung.

d) Einsatz bimodaler Gütertransportsysteme

Im Rahmen des bis Ende 1996 dauernden Projektes des Planungsbüros JUD in Zürich wird bezüglich des durch die MIGROS und die SBB durchgeführten Grossversuches mit Kombirail-Einheiten eine Überprüfung der im DIANE6-Vorprojekt erarbeiteten Erfolgsprognosen vorgenommen werden. Schwergewichtig soll zudem durch die Kommunikation der Erfahrungen mit bimodalen Systemen im In- und Ausland (Aufbau eines Informations-pools) das Vertrauen in dieses System und damit auch in die Bahn generell gestärkt werden.

Mit diesem Projekt werden die folgenden Ziele verfolgt:

- Aufzeigen von bestehenden bimodalen Systemen,

- Aufzeigen von bestehenden und potentiellen Einsätzen bimodaler Systeme.
- Aufzeigen des ökologischen Potentials des bimodalen Binnengüterverkehrs.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Auf nationaler Ebene wurde die fachliche und technische Zusammenarbeit mit den weiteren BEW-Programmen Treibstoffe, Leichtelektromobile und DIANE6 regelmässig gepflegt.

Auf internationaler Ebene wurde versucht, die Zusammenarbeit gegenüber früherer Jahre zu intensivieren. Die im Berichtsjahr im Rahmen von Kongressen (z.B. in Mexiko *"Towards Clean Transport Fuel and Clean Motor Vehicles"*) und Seminaren hergestellten Kontakte zu den Themen Verkehr und Energie zu den entsprechenden ausländischen Fachstellen (Mexiko, USA, Finnland, Holland, Dänemark) setzten hierbei den Grundstein.

4. Transfer in die Praxis

Mit Hilfe der bereits abgeschlossenen sowie noch laufenden Projekte konnten wesentliche Kontakte zur Industrie aufgebaut werden. Das Ziel wird es nun sein, diese Kontakte laufend auszubauen und eine grössere Einbindung der Industriepartner in zukünftige Projekte zu erreichen.

Um die mit den durchgeführten Projekten erreichten Ergebnisse der breiten Öffentlichkeit näher zu bringen, fanden regelmässige Präsentation an Tagungen und Workshops statt, bzw. die Resultate wurden in den entsprechenden Fachmedien publiziert.

5. P & D - Projekte

1994 wurde im Rahmen der P+D-Programmleitung 1994 das Projekt OMEGAZ II gestartet:

Aufgrund der aus dem 1993 abgeschlossenen Projekt OMEGAZ I gewonnenen Erkenntnisse wurde durch die Verantwortlichen des LENI an der ETH-Lausanne das Nachfolgeprojekt OMEGAZ II initiiert. Das im Herbst 1994 gestartete Projekt dauert bis Ende 1995 und beinhaltet die Entwicklung eines Eindüsssystems, das speziell auf die Anforderungen und Bedürfnisse des Erdgasantriebes zugeschnitten ist und insbesondere auch die Erfüllung der gegenwärtig bestehenden Abgasnormen erreichen soll.

6. Ausblick für 1995

Die Forschungsschwerpunkte 1995 liegen weiterhin

- bei der Verbesserung von Effizienz und Umweltverträglichkeit des Personenverkehrs,
- sowie dem rationellen Gütertransport.

Zur Zeit sind bisher folgende neue Projekte vorgesehen:

- Projekt für die Weiterentwicklung des kombinierten Güterverkehrs (evtl. P+D),
- Definition und Beurteilung von Konstruktionsmaterialien für serientaugliche Leichtmobile,
- Hauptstudie Swissmetro: Untersuchung der energietechnischen Aspekte,

- "Ecomotor für Leichtmobile (Leichthybrid II)"; Nachfolgeprojekt zum Projekt Leichthybrid,
- Technische Systemerprobung einer Schwungradeneinheit (*Flywheel*-Projekt).

Im Rahmen des Grossversuches mit Leicht-Elektromobilen (LEM) sind zudem diverse Begleituntersuchungen geplant, die teilweise im Rahmen des Forschungsprogramms begleitet und finanziert werden.

Zudem ist im Laufe des Jahres 1995 zuhanden der CORE das detaillierte Forschungsprogramm 1996 / 99 zu erarbeiten.

7. Liste der Projekte

- [1] M. Chastonay, ZT - Luzern-Horw : *Leichthybrid*. (JB)
- [2] J.-P. Porchet, ECOSENS, Brütisellen : *Energietechnische und gesamtökologische Beurteilung verschiedener Antriebssysteme für Leichtmobile*. (SB)
- [3] A. Schmid, Verein SOLARMOBILGRUPPE Burgdorf VSMB, Bern : *Umweltfreundliches Nahverkehrsmittel - Vorstudie Zweiradentwicklung*. (JB)
- [4] SIGMAPLAN & POLYQUEST, Bern : *Grenzüberschreitender Strassengüterverkehr 1993*. (SB)
- [5] D. Jaggi, ESORO, Zürich : *Neuartiger Hybridantrieb für Leichtmobile*. (JB)
- [6] M. K. Eberle, ETH - Zürich : *Ökomobil Hybrid III - ein umweltscvhonendes Antriebkonzept*. (JB)
- [7] P. Czerwinski, HTL - Biel : *Minderungspotential der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Kleinmobilen mit Verbrennungsmotoren* (JB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

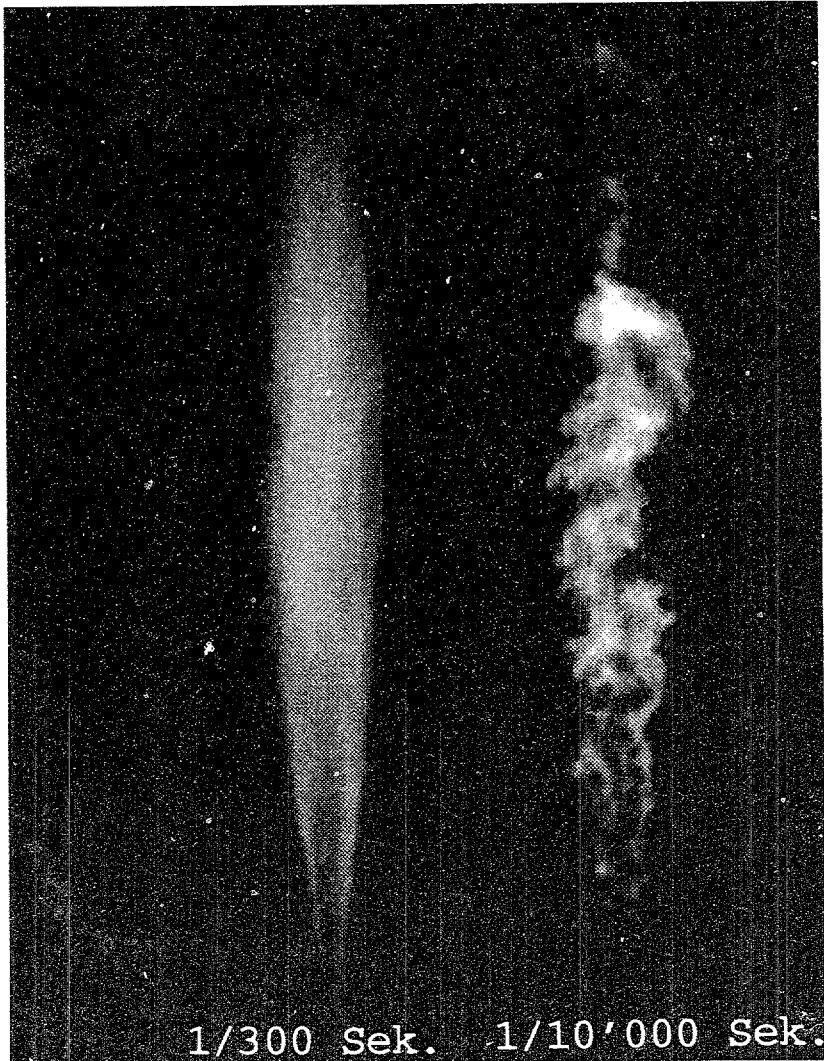
(SB) Schlussbericht vorhanden

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Alphons Hintermann



Zwei Belichtungszeiten derselben Flamme : Feinstrukturen einer Wasserstoffflamme

Im zeitgemittelten Bild (links) - so wie unser Auge die Flamme sieht - sind die feinen, momentanen Turbulenzstrukturen (rechts) ausgemittelt. Das Ausmessen und Berechnen dieser Feinstrukturen stellt hohe Anforderungen an die Experimentatoren und die eingesetzten numerischen Rechenverfahren.

1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1994

Zum Teil weltweit einmalige Forschungseinrichtungen wie der Hochdruckprüfstand DIVA, die Hochtemperaturdruckzellen und der transparente Einzylinder-Forschungsmotor stehen zur Zeit für die Verbrennungsforschung in der Privatwirtschaft, am PSI, an den ETH-Laboratorien für Verbrennungsmotoren (LVV) und für Energiesysteme (LES) sowie am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik (IVK) im Einsatz. Die im Laufe der letzten Jahre an diesen Forschungsstätten in zahlreichen Projekten erarbeitete Fachkompetenz in der Verbrennungsforschung, die sich heute am internationalen Standard messen kann, gruppiert sich inhaltlich um die langfristigen Schwerpunktsthemen:

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

In den einzelnen Projekten greifen meist mehrere Schwerpunktsthemen ineinander. Das ist auch der Grund für den rege genutzten und zum Teil institutionalisierten Informationstransfer unter den Projekten. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Industrie fallen oft kurzfristig nutzbare Ergebnisse für die Praxis an.

Die anvisierten Ziele für 1994 :

- *die Beibehaltung der hohen internationalen Fachkompetenz am PSI, LVV, LES und IVK,*
- *die Verstärkung der internationalen Einbindung der Projekte,*
- *die effizientere Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Privatwirtschaft*

sind eigentliche Mehrjahresziele und ein permanentes Anliegen aller Teilnehmer der laufenden Forschungsprojekte. Sie garantieren für einen hohen und praxisorientierten Ausbildungsstandard an den Instituten, dienen der effizienten Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis und tragen somit längerfristig zur Erhaltung des Arbeitsplatzes Schweiz bei. Das Durchsetzen dieser Ziele stellt hohe Anforderungen an alle Beteiligten. Die Tatsache, dass F&E-Aufwendungen in der Privatwirtschaft heutzutage in immer kürzer werdenden Zyklen über Marktprodukte amortisiert werden müssen als früher und sich zudem vor allem auf Gebiete mit den besten Chancen auf Marktprodukte mit hoher Wertschöpfung konzentrieren, belastet die effiziente Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Privatwirtschaft immer stärker. Sie ist aber auch eine Herausforderung an alle, gemeinsam nach tragfähigen Lösungen zu suchen.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1994

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Im Projekt **Turbulenzparameter von Strömungen** [1] standen Experimente am Einzylinder-Forschungsmotor im Vordergrund. Ziel dieser Arbeit ist ein vertieftes Verständnis der Wechselwirkung zwischen Strömungsmechanik und Reaktionskinetik und somit des motorischen Verbrennungsprozesses in seinen Einzelheiten zu gewinnen. Wesentliche Fortschritte konnten sowohl im experimentellen wie auch im numerischen Bereich der Strömungsfeldsimulation mittels *computational fluid dynamics* (CFD) erzielt und publiziert [18] werden. Als experimenteller Höhepunkt ist die quantitative Erfassung aller Komponenten des Reynoldsschen Spannungstensors [19] weltweit erstmals im Brennraum eines Verbrennungsmotors zu erwähnen. Damit wurden einerseits Daten von grosser Bedeutung für die Validierung von neueren Turbulenzmodellen und andererseits Einsichten in strukturelle Merkmale der motorischen Turbulenz gewonnen, die bis anhin dem Experiment nur unvollständig zugänglich waren [20].

Im Vorhaben **Katalytische Verbrennung** [2] sind die Arbeiten bezüglich der katalytisch stabilisierten Verbrennung von H₂-Luft-Gemischen [21] sowie der Katalysatorentwicklung [22] erfolgreich abgeschlossen worden. Die gute Übereinstimmung der experimentellen und numerischen NO_x-Emissionsdaten bei der kata-

lytisch stabilisierten Verbrennung von Propan wurde auch für Methan bestätigt. Mit den getroffenen Modellannahmen gelang es, den Einfluss des Katalysators auf die NO_x -Bildung gut zu beschreiben [23]. Die Zusammenarbeit mit der Industrie garantiert auch direkte Aufnahme der Ergebnisse in die Praxis.

LASER- UND ANDERE OPTISCHE MESSMETHODEN

Die Beherrschung moderner optischer Messmethoden ist ein absolutes Muss in der heutigen Verbrennungsforschung. Als Kompetenzzentrum wurde die PSI-Sektion Laser-Diagnostik aufgebaut. Jedoch beschäftigen sowohl das LES wie auch das LVV eigene Laserspezialisten, die in engem Kontakt mit dem PSI stehen.

Im Projekt **Laser-Diagnostik in der Verbrennung** [3] konzentrierten sich die Arbeiten auf die Messung der Schwefelchemie in Flammen. Mittels Laser-Induzierter Fluoreszenz (LIF) wie auch durch Vier-Wellen-Mischen (DFWM) sind zweidimensionale Darstellungen von SO_2 - und OH-Verteilungen erreicht worden. Mit DFWM gelang auch der Nachweis von S_2 mit eindeutiger Zuordnung der gemessenen Spektren. Die S_2 -Konzentrationen konnten somit ohne simultane Messung der Temperatur qualitativ bestimmt werden. Experimente mit dem mobilen CARS-Spektrometer am Hochdruckprüfstand DIVA zeigten, dass in hochturbulenten Flammen die Laserstrahlen soweit abgelenkt werden, dass sie nicht mehr in einen Punkt fokussiert werden können und daher Einzelschussmessungen im Innern einer ausgedehnten Flamme nicht mehr aussagekräftig sind. Trotz Erfolgen in laminaren Flammen führten im Projekt **Temperatur- und Turbulenzstrukturerfassung in Flammen** [5] verschiedene Versuche, die Turbulenzstruktur holographisch zu visualisieren, zu keinem Ergebnis. Die durch Turbulenzen hervorgerufenen Brechungsindexänderungen waren dafür zu klein. Daher wurde mit der holographischen Erfassung von Spezieskonzentrationen begonnen.

Mit dem im Projekt **Schaeff-Messverfahren in Flammen** [6] aufgebauten Infrarot-Spektroskopiesystem wurden an einem Gas- und an einem Ölbrenner umfangreiche Strahlungsmessungen durchgeführt. Zudem wurde neu die Möglichkeit geschaffen, die gesamte Flamme zu vermessen. Mehrere Temperaturbestimmungsvarianten wurden rechnerisch untersucht und für die gemessenen Strahlungsdaten angewendet. Schwierigkeiten tauchten bei der Ölbrenner-Temperaturbestimmung auf, führten aber zu neuen Erkenntnissen bezüglich der Russverteilung in der Flamme. Im Sinne einer Dienstleistung für das NEFF-Projekt **Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck** [12] konnten mit diesem IR-System am Hochdruckprüfstand DIVA aufschlussreiche Strahlungsmessungsdaten gewonnen werden.

Die Verminderung partikelförmiger Emissionen von Dieselmotoren ist ein vielbearbeitetes Forschungsthema und Gegenstand der beiden Projekte **Geometrische Partikeldetektion von Russteilchen** [7] und **Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung** [8]. Beide Projekte sind Paradebeispiele für das Ineinandergreifen aller Programm-schwerpunktsthemen. Im erstgenannten Projekt wurde zum Verständnis der Partikelentstehungsmechanismen eine laseroptische Messmethode entwickelt, welche die Detektion und Charakterisation von Russpartikeln in Diffusionsflammen ermöglicht. Festgestellt wurde, dass sich zuverlässige Aussagen über die Russpartikelgröße nur durch die genaue Kenntnis des optischen Brechungsindex gewinnen lassen. Im Berichtsjahr gelang es, anhand von Eichmessungen mit Partikeln bekannter Grösse durch die Verknüpfung zweier Messverfahren gleichzeitig die Grösse und der komplexe Brechungsindex der Partikel zu erhalten. Im zweiten Projekt [8] wurde für die experimentelle Untersuchung und für die Verifizierung der numerischen CFD-Rechnungen in Zusammenarbeit mit dem PSI eine Konstantvolumen-Hochtemperatur- und Druckzelle entwickelt. Sie ermöglicht eine sehr gute Untersuchung von dieselmotorischen Vorgängen wie der Einspritzung, Tröpfchenbildung / Zerstäubung des Einspritzstrahls, der Zündung des Gemischs, dessen Verbrennung und der Schadstoffbildung. Der Zugang für laseroptische Messmethoden in die Zelle wird durch fünf grosse Fenster gewährleistet. Die experimentellen Arbeiten an der Zelle sind mit nationalen und internationalen Industriepartnern geplant, während die numerischen Rechnungen im Rahmen des "ERC OFTAC Leonhard Euler Research Centers" koordiniert sind.

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 wissen-

schaftlichen Fragestellung gerecht werden zu können. 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]. Wie im *Titelbild* angedeutet, werden hier hohe Anforderungen an die Genauigkeit der theoretischen Verbrennungsmodelle gestellt. Vergleiche von Simulationen von experimentellen LDA-Daten haben gezeigt, dass für einen Freistrahler die *Pope-Korrektur* im "k- ϵ Modell" eine gute Voraussage des Öffnungswinkels erlaubt. In der 2. Phase des NEFF-Projekts **Basiswissen für Low-NO-Brenner und -Brennkammern** [4] erarbeitet das LES gemeinsam mit verschiedenen Brenner- und Kesselfirmen Grundlagen für eine möglichst schadstoffarme Verbrennung fossiler Brennstoffe, die in der nächsten Generation von Brennern zum Einsatz kommen sollen. Der Teilbereich "Numerische Simulation" ist mit einer Dissertation [24] abgeschlossen worden. Sie behandelt auch die Wechselwirkung zwischen modernen, auf dem Prinzip der Rauchgasrezirkulation basierenden Low-NO_x-Brennern und den Brennkammern, auf denen sie betrieben werden. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen konnten Zusammenhänge aufgedeckt werden, um die bisher in der Praxis bei der Kombination von Brennern und Brennkammern aufgetauchten, aber nur wenig verstandenen Probleme zu klären.

In Zusammenarbeit mit einer Brennerfirma werden die eng verknüpften Projekte **Physikalisch-numerisches Verbrennungsmodell für turbulente Diffusionsflammen** [10] und **Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern** [11] bearbeitet. Ziel ist die Erstellung eines zukunftsweisenden Werkzeugs zur Entwicklung schadstoffarmer Verbrennungssysteme. Die Basis von Projekt [10] ist ein innovatives "*Finite Element* Rechenprogramm" (FEPS), das am Institut für Computeranwendung in Stuttgart entwickelt wurde. Die Arbeiten für 1994 konzentrierten sich auf die Verfeinerung des Systems sowie auf die Einbindung verschiedener Modelle in das FEPS-Programm. Im Projekt [11] konnte das "Laminar-Flamelet Modell" vollständig in den Strömungslöser "*Tascflow*" eingebaut und getestet werden. Das Modell wurde auch in das FEPS implementiert. Es zeigte sich, dass die lokale Flammenlöschung einer gut ausgemessenen axialsymmetrischen turbulenten Diffusionsflamme nur von der PDF-Methode reproduziert werden kann [26].

Im NEFF-Projekt **Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck** [12] wurde der früher am LES entwickelte Strahlungscode erfolgreich in ein modernes Fluidmechanik-Programm integriert. Auf der experimentellen Seite wurde 1994 ein Flammrohr mit einem verschiebbaren Brenner für den Einsatz am Hochdruckprüfstand DIVA hergestellt. Erste DIVA-Experimente erwiesen die Brauchbarkeit der Dispersion-Quotienten Methode für Russmessungen bei der Hochdruckverbrennung. Die Evaluation von Russmodellen wurde soweit vorangetrieben, dass demnächst die ersten Simulationen durchgeführt werden können.

SCHADSTOFFREDUKTION UND SCHADSTOFFASPEKTE

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. Wesentlich zum Erfolg der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) und der selektiven nicht katalytischen Reduktion (SNCR) auf Harnstoffbasis in praxisnahen Anlagen hat das Projekt **Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen** [13, 27] beigetragen. Die SCR mit Harnstoff führt bei korrekter Auslegung der Anlage zu keinen nennenswerten Emissionen an zusätzlichen Abgaskomponenten. Hingegen limitiert der Ammoniak-schlupf den erreichbaren Entstickungsgrad. Beim SNCR-Verfahren mit Harnstoff anstelle von Ammoniak wird das optimale Temperaturfenster um etwa 50 °K zu höheren Temperaturen verschoben. Neben dem Ammoniak-schlupf tritt auch ein Schlupf von Isocyan-säure auf. Im Vergleich zu Ammoniak sind die Emissionen von Kohlenmonoxid und Lachgas deutlich höher. Da Lachgas als Treibhausgas und Zerstörer des stratosphärischen Ozons wirkt, sollte Harnstoff in SNCR-Anlagen künftig nicht mehr zum Einsatz gelangen.

Das im Rahmen des Vorhabens **Optimierte Verbrennungstechnologie beim Automobil-Benzinmotor** [14] entwickelte, frei programmierbare Motorenmanagement kam in Koordination mit wassergekühlten Katalysatoren erstmals zum Einsatz. In enger Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Verkehr und der EMPA wurden die ersten Abgastypenprüfungen für Schiffsmotoren erfolgreich abgeschlossen. Damit konnte z. B. die Stufe 1

der Abgasemissionen der Bodenseeschiffahrtsverordnung für die Otto-Doppelmotoren (OMC 5.0 1 und 5.8 1) erreicht werden.

Das vom IVK und LVV durchgeführte Projekt **Stickoxidminderung bei stationären Dieselmotoren** [15] ist Teil des grösseren Vorhabens Notstrom-/Netzersatzanlage, an dem neben dem Laboratorium für Technische Chemie (Entwicklung von Katalysatoren) auch die Industrie aktiv beteiligt ist. Das IVK befasste sich mit dem Aufbau der Bypass-Katalysator-Versuchsstrecke inklusive Abgasanalyse, Messdatenerfassung und dazugehöriger Software. Das LVV entwickelte ein quasidimensionales Mehrzonenmodell zur Beschreibung der Vorgänge im Zylinder eines direkt eingespritzten Dieselmotors während des Arbeitstakts. Es dient einerseits der Vorausberechnung des vom IVK experimentell in verschiedenen Betriebszuständen ausgemessenen Motors, andererseits liefert es wertvolle Daten für den Motorenhersteller.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Zwischen ETH und PSI herrscht eine rege Zusammenarbeit. Wie in den Projektbeschreibungen hervorgehoben, findet ein echter *Know-how*-Transfer statt, indem neu entwickelte Methoden von anderen Gruppen übernommen und den eigenen Projekten angepasst werden. Dazu trägt wesentlich das jährlich stattfindende ETH/PSI-Verbrennungsseminar bei. Am 23. Februar 1994 und am 24. März 1994 wurden zahlreiche Teilnehmer aus Hochschule und Privatwirtschaft über den aktuellen Stand von ETH- und PSI-Projekten informiert.

Die über 150 Vollastbetriebsstunden des Hochdruckprüfstands DIVA wurden zu einem grossen Teil von der ABB belegt. Die andern DIVA-Partner, ETH und PSI, haben einerseits zu wenig Projekte, die viele Versuchsstunden im DIVA-Massstab erfordern, andererseits können sie einen Teil der hochdruckrelevanten Forschungsfragen durch kostengünstigere Experimente an den Hochtemperaturdruckzellen beantworten. Nach wie vor ist die Industrierelevanz der ETH/PSI Hochdruckexperimente ein Thema intensiver Gespräche aller DIVA-Partner, um das Synergiepotential der DIVA optimal zu nutzen.

Das LVV lud Ende 1994 Vertreter von Hochschule und Privatwirtschaft zur *Computational Reactive Fluid Dynamics (CRFD)*-Seminar ein. Ziel und Zweck der Veranstaltung war, über die neuesten Ergebnisse und internationale Vernetzung der CRFD-Gruppe des LVV zu berichten, das Aufzeigen von konkreten Möglichkeiten zur Umsetzung von Grundlagenwissen in praxisnahe Anwendungen, sowie die Vorstellung der Hochtemperaturdruckzelle. Die Veranstaltung wurde als erster Schritt zur Realisierung eines CRFD-Konsortiums zwischen LVV / PSI und der Verbrennungskraftmaschinenindustrie deklariert, einer Idee welche von den zahlreich erschienenen Vertretern der Privatwirtschaft positiv aufgenommen wurde. Der Grundgedanke ist, dass das LVV sein Basiswissen, sein qualifiziertes Personal, seine Versuchsträger (Einzylinder-Forschungsmotor, Hochdrucktemperaturzelle) und die Supercomputer-Infrastruktur des ETH-Bereichs der Industrie zur Verfügung stellt und dass sich jeder Industriepartner mit einem Mannjahr am geschaffenen CRFD-Pool beteiligt. Die LVV-Wissenschaftler sind dabei direkte Ansprechpartner des jeweiligen verantwortlichen Projektleiters aus der Industrie.

Das internationale *Highlight* des Jahres war das von über tausend Forschern besuchte, vorwiegend wissenschaftlich orientierte *25th Symposium on Combustion*, das vom 1. - 5. August 1994 in Irvine stattfand und einen ausgezeichneten Überblick über die Forschungsaktivitäten auf allen Gebieten der Verbrennung vermittelte. Unsere Verbrennungsforschung war mit acht Postern, die auf ein reges Interesse stiessen, gut vertreten. Insbesondere der LVV-Poster *Unsteady Premixed Flame Propagation in S.I. Engines* [28] wurde von einem massgebenden Vertreter der deutschen Automobilindustrie äusserst positiv beurteilt, da er neue Erkenntnisse in einem die Motorenhersteller direkt interessierenden Problembereich anbot.

Das *Task-Leaders Meeting* im Rahmen des IEA-Programms *Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* [29] wurde vom 5.-7. September 1994 in Heidelberg abgehalten. Mit 45 Teilnehmern und 29 Vorträgen, wovon 6 aus der Schweiz, hielt sich die Veranstaltung im Vergleich zu früheren Jahren in recht bescheidenem Rahmen. Leider war die Industrie des Gastgeberlandes nicht vertreten.

Das *Leonhard Euler Research Centers for Combustion*, das schweizerische Pilotzentrum für Verbrennungsforschung innerhalb der europäischen ERCOFTAC-Vereinigung, hielt vom 28. Januar bis 1. März 94 seine zweite Jahrestagung ab. Dabei sind Kompetenzzentren in Verbrennung, Messtechnik und Computational Fluid Dynamik (CFD) gegründet worden. Die von den Zentren Messtechnik und CFD im Januar 1994 organisierten Fachseminare haben auch bei den Industrievertretern guten Anklang gefunden.

4. Umsetzung der Ergebnisse und P & D - Projekte

Die Umsetzung erfolgte einerseits über die etablierten Kanäle der Jahres- und Schlussberichte via BEW/ ENET, ETH- und PSI - interne Berichte sowie Veröffentlichungen in Fachzeitschriften [18-29]. Nicht zu vernachlässigen sind andererseits die Fachtagungen und Symposien im nationalen und internationalen Rahmen, die neben dem Ausloten des aktuellen Wissensstands stets auch Gelegenheit zum wichtigen persönlichen Erfahrungsaustausch bieten.

Unter dem Motto *Zusammenarbeit Privatwirtschaft - Hochschule* fand am 26. August 1994 das gut besuchte Seminar der Schweizerischen Interessensgemeinschaft für Feuerungsforschung SIFF statt. Die anwesenden Vertreter der Brenner- und Kesselfirmen haben sich bereit erklärt, Expertengruppen zur Verfügung zu stellen, um die Umsetzung des vom LES entwickelten Temperaturmessverfahrens [6] zu betreuen.

Von den drei SIFF-Arbeitsgruppen hat sich einzig die Gruppe *Abgasanalytik* zu einem Forum regelmässiger Begegnungen von Vertretern der Hochschule, Privatwirtschaft und der Verwaltung herauskristallisiert. Vertreter aus Forschung, Industrie und Behörden treffen sich zwei bis dreimal pro Jahr, um aktuelle Probleme zu diskutieren. Bei den Gruppen *Feuerungssimulationsmethoden* und *Laser-Messverfahren* arbeiten die meisten Interessenten auf Projektebene miteinander, sodass sich zur Zeit separate Sitzungen erübrigen.

Ziel des Projekts *Thermische Verwertung von Abfällen durch Wirbelschichtverbrennung unter Berücksichtigung des Einflusses der Aufgabe- und Bettkörnung* [16] ist, Einflussfaktoren auf die thermische Verwertung von Abfällen in Wirbelschichtfeuerungen aufzuzeigen. Zu diesem Zweck sollen Verbrennungsversuche an der auf Anfang 1995 in Betrieb gehenden *Pilotanlage* (max. 2 MW Leistung) des industriellen Partners sowie parallele Untersuchungen an industriellen Grossanlagen durchgeführt werden. Dabei werden - im Hinblick auf eine Verwertung oder allfällige Nachbehandlung - insbesondere die unterschiedlichen Eigenschaften der erzeugten Aschen und deren Mengen in die Untersuchung miteinbezogen.

Ein Rückschlag ist im P&D - Projekt *Konstant-Volumen-Verbrennung (CVC)* [17] zu verzeichnen. Die 1993 vorgenommene Implementierung des Konstant-Volumen-Prozesses in einer Druckwellenmaschine mit Zellenrotor erwies sich als nicht hochdrucktauglich. Die detaillierte Analyse der festgestellten Schwachstellen gaben Anlass zu einer Neukonzeption einer kostengünstigen und effizienten CVC-Maschine, die Ende 1995 als Entscheidungsgrundlage für eine Weiterführung des Vorhabens vorliegen soll. Entscheidendes Gewicht wird neben einer hohen Zuverlässigkeit und tiefen Stickoxidemissionswerten auf einer vertieften Analyse aller identifizierten, noch zu lösenden technischen Schwierigkeiten samt Lösungswegen gelegt werden. Ein wichtiges Kriterium werden auch die Marktchancen sein.

5. Bewertung 1994 und Ausblick 1995

Aufgrund der Analyse der Berichte [1-17] ist gute Arbeit geleistet worden und bis auf wenige Ausnahmen sind die gesteckten Projektziele erreicht worden. Mit der Einweihung des neuen OLGA-Gebäudekomplexes am PSI haben die langen Jahre der Provisorien der PSI-Labors für Laserdiagnostik und Verbrennungstechnik ein definitives Ende gefunden. Die Aufbaujahre in der Verbrennungsforschung beginnen nun auch auf dem Ausbildungssektor ihre Früchte zu tragen. Im Berichtsjahr sind fünf Dissertationen [21-25] erfolgreich beendet worden. Ein Kandidat wurde für seine Dissertation [21] mit der silbernen Medaille der ETH ausgezeichnet,

wofür ihm auch an dieser Stelle herzlich gratuliert wird. Besonders erfreulich waren auch die anlässlich internationaler Konferenzen von renommierten Forschern spontan geäußerten Kommentare über die gute Qualität unserer Forschungsbeiträge.

Auf nationaler Ebene wird 1995 die gegenseitige Abstimmung der DIVA-Forschungsaktivitäten der ETH (LES und LVV), des PSI und der ABB nach wie vor mit hoher Priorität verfolgt werden. Insbesondere sollen die ETH / PSI-Vorhaben an der DIVA auch für die ABB von Interesse sein und sollten von ABB entsprechend getragen werden. Des Weiteren wird die Gründung des CRFD-Konsortiums in Angriff genommen werden. Der nächstes Jahr in Interlaken stattfindende internationale CIMAC-Kongress wird eine weitere Gelegenheit sein, unsere Verbrennungsforschungsprojekte einem kritischen Publikum unter Beweis zu stellen.

Die internationalen Verknüpfungen in der Verbrennungsforschung werden auch 1995 im Vordergrund bleiben. Insbesondere sollen die Kontakte im europäischen Raum verstärkt werden. Einerseits sind EU-Projekte in Vorbereitung, andererseits organisiert das LES eine europäische Kleinbrennerkonferenz. Ziel der Konferenz ist, unsere Erfahrungen mitzuteilen, den gegenwärtigen Stand der Technik europaweit auszuloten, neue Kontakte zu knüpfen und - wenn möglich - gemeinsame Projekte zu definieren. Nach wie vor traktandiert ist die Gründung des *Schweizerischen Nationalkomitees für Feuerungsforschung* mit mindestens drei privatwirtschaftlichen Firmen, damit die Schweiz am *Triannual Meeting der International Flame Research Foundation IFRF* vom 9. - 11. Mai 1995 als Vollmitglied teilnehmen kann. 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*. (SB)
- [2] P. Benz, S. Buser, P. Marti, A. Schlegel, U. Dogwiler, 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] T. Fey, ELCO, Vilters : *Physikalisch-numerisches Verbrennungsmodell für turbulente Diffusionsflammen*. (JB)
- [11] J. Gass, LES / ETH - Zürich : *Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern*. (JB)
- [12] J. Gass, S. Martens, B. Spiess, R. Schulz, LES / ETH - Zürich : *Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck*. (NEFF-JB)
- [13] M. Koebel, PSI - Villigen : *Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen*. (SB)

- [14] K. LEISTRITZ, Zürich : *Optimierte Verbrennungstechnologie im Automobil-Benzinmotor*. (SB)
- [15] G. Weisser, LVV, F. Bettoni, IVK / ETH - Zürich : *Stickoxidemissionsminderung bei stationären Dieselmotoren*. (SB) / *Optimierte Verbrennungstechnologie im Automobil-Benzinmotor*. (SB)
- [16] L. Reh, IVK / ETH - Zürich : *Thermische Verwertung von Abfällen durch Wirbelschichtverbrennung unter Berücksichtigung des Einflusses der Aufgabe- und Bettkörnung*. (JB)
- [17] F. Spinner, ABB, Baden : *Konstant-Volumen-Verbrennung*. (JB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

7. Referenzen

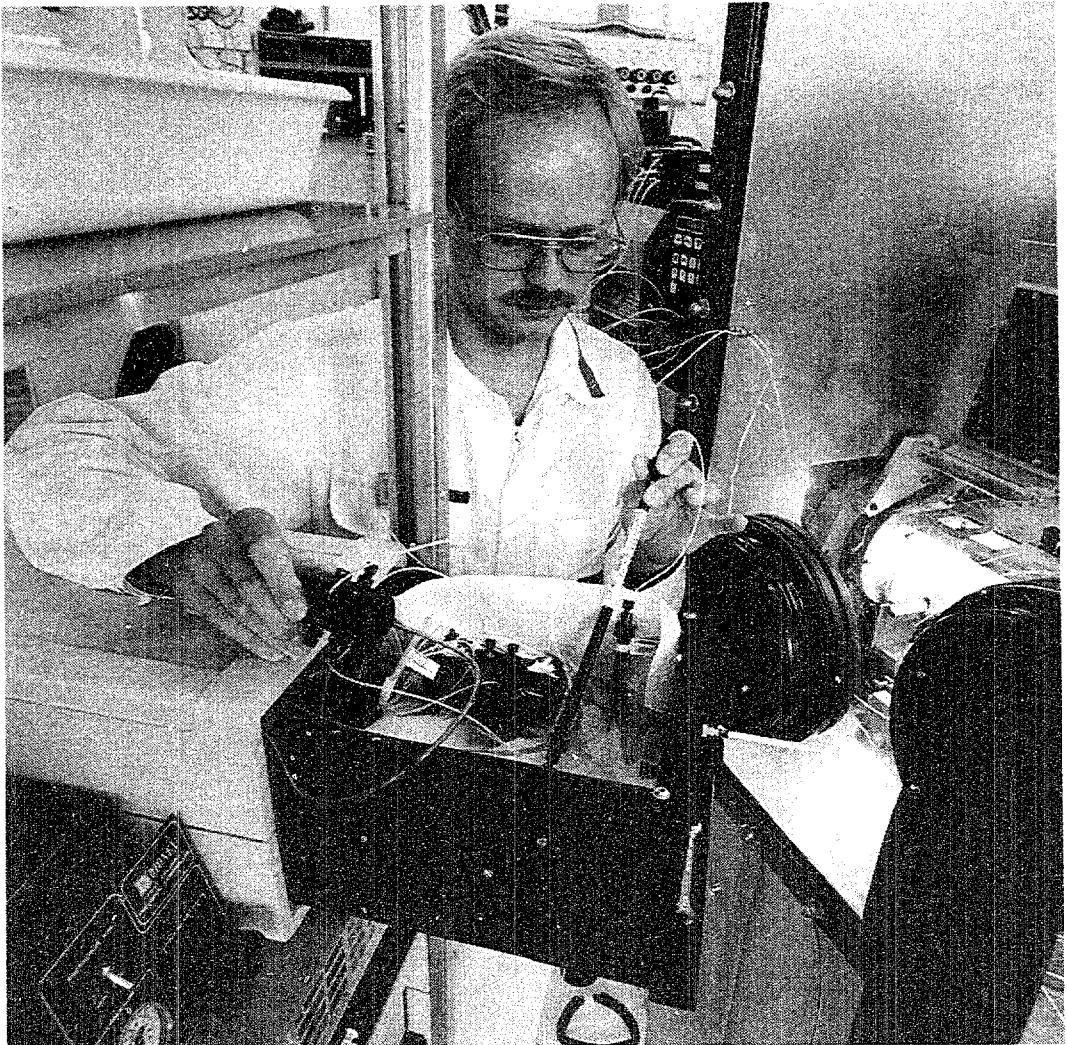
- [18] L. Kaiktsis, G.E. Karniadakis, S.A. Orzag, LVV / ETH- Zürich : *Supercritical Behaviour and Convective Instabilities in 2-Dimensional Flow over a Backward-facing Step*, *J.Fluid Mech.*, 1994
- [19] P. Dimopoulos, K. Boulouchos, LVV / ETH - Zürich : *Reynold Stress Components in the Flow Field of a Motored Reciprocating Engine*, Proc. Sae Conference, Detroit, 1995.
- [20] P. Dimopoulos, T. Steiner, K. Boulouchos, LVV / ETH - Zürich : *Investigation of Flame Speed Models for the Flame Growth Period During Premixed Engine Combustion*, 1994.
- [21] S. Buser, PSI - Villigen : *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur katalytisch stabilisierten Verbrennung von mageren Wasserstoff-Luft-Gemischen in einer Kanalströmung*, Diss. ETH Nr. 10488 (1994).
- [22] P. Marti, PSI - Villigen : *Methane Combustion over Perovskite-Type Oxides and over Palladium-Zirconia Prepared from Amorphous PDIZR3 Alloy*. Diss. ETH Nr. 10643 (1994).
- [23] A. Schlegel, PSI - Villigen : *Experimentelle und numerische Untersuchung der NO_x-Bildung bei der katalytisch stabilisierten und der nicht-katalysierten, mageren Vormischverbrennung*. Diss. ETH Nr. 10887 (1994).
- [24] H. Dreher, YGNIS, Ruswil : *Abgasrezirkulation zur Stickoxidminderung- Bestimmung der Rezirkulationsrate in Brenner-Kesselkombinationen mittels numerischer Simulation*. Diss. ETH Nr. 10491 (1994).
- [25] R. Keller, LES / ETH - Zürich : *Primärmassnahmen zur NO_x-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung*. Diss. ETH Nr. 10514 (1994).
- [26] J.C. Ferreira, A. Laxander & al., IAC Stuttgart : *Numerical Simulation of a Turbulent Nonpremixed Methane-Air Jet Flame*, Proc. 25. Int. Symp. on Combustion, Irvine, CA, 1994.
- [27] M. Koebel, M. Elsener, PSI - Villigen : *Determination of Urea and its Thermal Decomposition Products by High Performance Liquid Chromatography*, J. of Chrom. A, 1994/5.
- [28] K. Boulouchos, T. Steiner : *Unsteady Premixed Flame Propagation in S.I. Engines*, Proc. Combustion Symposium, Irvine, 1994.
- [29] *XV Task-Leaders-Meeting, Proc. IEA-Conf. Heidelberg, 1994.*

KERNTECHNIK UND NUKLEARE SICHERHEIT

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Wolfgang Krüger



Fortgeschrittene Brennstoffzyklen

Lanthaniden-Trennung mit Hochleistungs-Flüssigchromatographie und -Detektion mit induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie im Hotlabor des PSI: Nachgewiesen werden können bis zu $20 \cdot 10^{-9}$ g jedes Lanthanids pro Gramm Uran in einer 1-prozentigen Lösung.

1. Programmziele

Forschung auf dem Gebiet der "Kerntechnik und nuklearen Sicherheit" in der Schweiz dient heute primär

- der ständigen Angleichung der Kompetenz an den Stand von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf eine sichere Nutzung der Kernenergie auch in der Zukunft,
- der Ausbildung von fachlichem Nachwuchs im Rahmen attraktiver Forschung in Zusammenarbeit mit den Hochschulen,
- der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen bis hin zu Expertisen zu Einzelaspekten und dem Erbringen wissenschaftlich-technischer Dienstleistungen samt sicherem Betrieb der dazu notwendigen Anlagen und
- dem aktiven Verfolgen sich international abzeichnender sicherheitstechnischer Anforderungen und Merkmale für zukünftige Kernanlagen und Evaluation technischer Lösungen.

Schwerpunktmässig findet die nukleare Energie- und Sicherheitsforschung in der Schweiz im Bereich **Nukleare Energie, Sicherheit** (F4) des Paul Scherrer Instituts, PSI statt. Die Beiträge der Hochschulen konzentrieren sich auf die Lehre; Diplomierende und Doktoranden führen allerdings ihre Forschungsarbeiten in der Regel ebenfalls am PSI durch. Im Jahr 1994 wurden ca. 200-PersonenJahre (davon ca. 45 für Infrastruktur) und Sachmittel von ca. 6.8 Mio. Fr. in diese Forschung investiert. Mehr als 1/3 der Personalmittel und etwa die Hälfte der Sachmittel wurden durch die Elektrizitätswirtschaft und die NAGRA, das BEW sowie den ehemaligen NEFF im Rahmen von Forschungsaufträgen finanziert. BEW steuerten ca. 26% der drittfinanzierten Sachmittel und ca. 13% des drittfinanzierten Personals bei. Über die vom BEW mitfinanzierten Aktivitäten wird auch im nachfolgenden Jahresüberblick "Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK" berichtet. Eine ausführliche Zusammenstellung der PSI-Arbeiten befindet sich im *Jahresbericht des Forschungsbereichs "Nukleare Energie, Sicherheit"* des PSI (Annex IV).

2. Arbeiten und Ergebnisse 1994

Die Forschungsarbeiten am PSI gliedern sich in drei Themenkreise:

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

Im Folgenden werden die wichtigsten Projekte auf diesen Gebieten kurz dargestellt.

FORSCHUNG ZU SCHWEREN UNFÄLLEN

Analysen schwerer Unfälle in Kernkraftwerken mit LWR umfassen experimentelle und theoretische Forschung zur Vertiefung von Grundlagewissen, sowie Entwicklung, Verbesserung und Validierung mathematischer Modelle und Quelltermanalysen für die schweizerischen KKW.

Eine der derzeit international dominierenden Forschungsaufgaben ist die Identifikation sicherheitsrelevanter Mechanismen, die zum Reaktor Druckbehälter (RDB)-Versagen unter Kernschmelzbedingungen führen können. In der späten Phase solcher Unfälle könnte sich geschmolzenes Material von der Kernregion in das untere Plenum des RDB verlagern und die untere RDB-Kalotte durchschmelzen. Die genaue Versagensart, die Austrittsgeschwindigkeit der Schmelze in das Containment und der Zustand der austretenden Schmelze bestimmen massgeblich den weiteren Unfallverlauf hinsichtlich Aerosol-Produktion, mechanischer Belastungen der Containmentstruktur und der Effizienz der Schmelzekühlung. Eine vollständige Quelltermanalyse muss deshalb die RDB-Versagensmechanismen adäquat berücksichtigen. Das Forschungsprogramm *CORVIS* (*Corium Reactor Vessel Interaction Studies*) leistet dazu einen wesentlichen experimentellen und analytischen Beitrag in Zusammenarbeit mit einer internationalen *Task-Force*. Hauptziel des Projektes ist es, zuverlässige experimentelle Daten zu gewinnen, um rechnerische Versagensmodelle als Werkzeug mit einer genügenden Voraussagens-

kapazität über RDB-Versagen im Bereich der unteren Kalotte unter realistischer Unfallbedingungen, einschliesslich zu unterstellender Hochdruck-Szenarien, zu validieren.

Nach dem ersten grossmassstäblichen Versuch in 1993, der einige technische und verfahrensmässige Probleme zeigte, konnten an 3 technischen Experimenten kleineren Massstabs Verbesserungen der Anlage überprüft werden. Metallurgische und chemische Material-Nachanalysen an den Stahlplatten der Testgefässe nach den Experimenten lieferten wertvolle Einsichten in die strukturelle Morphologie des Materials und in Diffusionsprozesse, die durch die thermische Belastung verursacht wurden. Sie erlauben auch eine Rekonstruktion der thermischen Geschichte des Materials an Orten, wo direkte Messungen von Temperaturen nicht möglich sind.

Mit einem umfassenden vollinstrumentierten Experiment wurde am 15. Dezember 1994 das Verhalten der für GE-SWR (wie das KKW Mühleberg) typischen Entleerungsleitung untersucht. Das Experiment zeigte, dass einige Sekunden nach dem ersten Kontakt mit der Schmelze ein Versagen des Leitungsstützens erwartet werden muss. Sollten sich solche RDB-Strukturen auch in Wirklichkeit wie Sollbruchstellen verhalten, würde dies auf ein "tropfenweises" Austreten der Schmelze in das Containment und daher auf einen wahrscheinlich "ruhigen" Unfallverlauf hindeuten. Die Auswertung der Versuchsdaten und der Vergleich mit Voraussagen mehrerer Rechenmodelle wird sicherheitsrelevante Aspekte des Verhaltens dieser speziellen Durchdringung abklären.

Im analytischen *CORVIS*-Teil sind Fortschritte in der Simulation korrekter Randbedingungen für die thermischen Verluste und der Schmelzhydrodynamik erzielt worden. Der Hauptteil der analytischen Arbeit liegt ausserhalb des PSI; am PSI wird das Finite-Element-Codepaket ADINA für die Berechnungen von Wärmeleitung, Fluidodynamik und nicht-linearer struktureller Verlagerungen (z.B. Geometrieänderungen) benutzt.

Aerosole können während eines schweren Unfalles die Wirksamkeit von Sicherheitseinrichtungen, wie Wärmeabfuhrsysteme, beeinträchtigen und so indirekt zu weiteren Radioaktivitätsfreisetzungen führen. PSI hat ein Aerosolerzeugungs-System entwickelt, das Aerosol-Gas-Gemische mit den erforderlichen Spezifikationen über mehrere Stunden liefern und mit verschiedenen instrumentierten Testvorrichtungen bestückt werden kann. Gegenwärtig laufen an dieser Anlage drei Teile des *POSEIDON* (*Pool Scrubbing Effect of Iodine Decontamination*) Programmes:

- Das Hauptprojekt untersucht den Einfluss von Wasservorlagen auf die gesamte Aerosolrückhaltung und Jod-Dekontamination. Die Ergebnisse werden benutzt, um das Verständnis der einzelnen Mechanismen zu verbessern und den PSI Computercode BUSCA zu validieren und fortzuentwickeln; sie fliessen in probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) der 2. Ebene für die schweizerischen LWR ein.
- *AIDA* (*Aerosol Impaction and Deposition Analysis*) untersucht den Effekt von Aerosolen auf die Effizienz passiv bespeister Containmentkühler, wie sie im *Simplified Boiling Water Reactor* (SBWR) von GE benutzt werden: Aerosolablagerung kann die Durchflussfläche im Kondensator reduzieren und den thermischen Widerstand der Wärmeübertragungs-Grenzfläche erhöhen, und so die Nachwärmeabfuhr behindern.
- Das Testprogramm für Druckentlastungs-Filter fand zur Unterstützung der Auslegung und Qualifikation eines Containment-Filters statt, der von der Fa. SULZER weiterentwickelt wurde. Es konnte eine Aerosolrückhaltungs-Fähigkeit um viele Grössenordnungen höher als erforderlich nachgewiesen werden.

KOMPONENTENSICHERHEIT

Das Wachstum von Rissen in druckführenden Komponenten eines Kernreaktors spielt eine entscheidende Rolle für deren Verhalten. Kritisch ist insbesondere das schnelle, ungehinderte Risswachstum, das zu makroskopischem Bruch und katastrophalem Versagen führen könnte. Die Hauptschwierigkeit bei der Voraussage von Risswachstum durch numerische Methoden - gewöhnlich Finite Elemente - ist die Behandlung von Bereichen sehr unterschiedlicher Grösse, vom ganzen Containment bis zur unmittelbaren Nachbarschaft einer Risspitze. PSI nahm am Hochdruckreaktor (HDR)-Sicherheitsprogramm des Forschungszentrums Karlsruhe teil, in dem Sicherheitsmargen von Komponenten in reeller Grösse experimentell bestimmt wurden. Das HDR-Sicherheitsprogramm wurde 1994 ordnungsgemäss abgeschlossen. Als zentrales, weiterhin offenes Problem im Bereich der Rissmechanik wurde die Grösse und Geometrie-Abhängigkeit von Materialeigenschaften identifiziert. Im vergangenen Jahr wurde der Akzent auf die systematische Erforschung der Effekte von Komponentengeometrie, Rissform, Materialeigenschaften und komplexer Beanspruchung auf dem Rissverhalten verschoben. Parallel gelang dem PSI innerhalb des *FALSIRE*-Projektes (*Fracture Analyses of Large Scale International Reference Experiments*) die Entwicklung eines Algorithmus, in dem sich der Riss wie ein Reissverschluss öffnen kann,

und der mit nur einem einzigen Rechenlauf den ganzen Prozess beschreibt. Ein *Spin-Off* diesbezüglicher PSI-Rechenfähigkeiten konnte im Herstellungsprozess dickwandiger bimetallischer Zylinder in Zusammenarbeit mit der schweizerischen Industrie angewendet werden: Auf der Basis von PSI-Berechnungen wurden Massnahmen getroffen, um die beim Herstellungsprozess beobachtete und durch thermische Belastungen verursachte Rissbildung zu reduzieren.

Für experimentelle Untersuchungen von Spannungsriss-Korrosion in niederlegierten Stählen unter simulierten SWR-Bedingungen wurde ein neuer Kreislauf mit integraler Zugmaschine in Betrieb genommen, der eine bruchmechanische Interpretation Spannungsriss-Korrosion erlaubt. Erste Ergebnisse zeigen, dass Experimente unter kontrollierter Belastung und bei einer ausserhalb der Spezifikationen liegender Wasserchemie Risswachstum in niederlegiertem Stahl schnell erzeugen können.

Zwei Schadensanalysen wurden im Rahmen des Projektes EDEN abgeschlossen. Der Schadensprozess eines beschädigten SWR-Kontrollstabes könnte auf strahlungsinduzierte Spannungsriss-Korrosion zurückgeführt werden. Die spektakulären axialen Risse in SWR-Hüllrohren mit innenliegendem Liner wurden als Aufweitung von strahlungsgehärteten Herstellungsfehlern während einer Leistungstransiente charakterisiert. Der experimentelle Teil des Hüllrohrkorrosion-Forschungsprogrammes der *Nuclear Fuels Industry Research (NFIR)* wurde abgeschlossen; er deutete u.a. darauf hin, dass strahlungsbedingte Veränderungen in intermetallischen Ausscheidungen für die Erhöhung der Korrosionsrate bei hohem Abbrand nicht verantwortlich gemacht werden können. Diese Erkenntnis führt zu einem Nachprüfen aktueller Korrosionsmodelle. Ein neues NFIR Projekt, über die mechanische Integrität von durch hohen Abbrand hydriertem Hüllrohrmaterial, ist derzeit im Gang.

COMPUTERUNTERSTÜTZTE ANALYSEN VON KKW

Beim Projekt *STARS* (Berechnung von Transienten in schweizerischen Kernkraftwerken) hat die HSK die Möglichkeit neben Verbesserungen und Erweiterungen der Rechenfähigkeit und der Modellierung der schweizerischen Kernkraftwerke, spezifische *On-Call* Analysen zu verlangen. Zwei solchen Analysen (Folgen eines möglichen Rohrbruchs (KKL), Verhalten von Hochabbrand-Brennstoff während einer Leistungsexkursion) wurden dieses Jahr durchgeführt. Die Arbeit für das KKL bestand aus einer umfassenden Studie des Anlageverhaltens unter ATWS-Bedingungen und umfasste auch Modifikationen des Codes TRAC-BF1, und eine umfangreiche Fehlersuche im Code. Zur Überprüfung der eindimensionalen Näherung für Reaktorkinetik in TRAC-BF1 wurden Vergleichsfälle mit einem dreidimensionalen Transientencode (RAMONA) gerechnet. Des weiteren umfasste die Projektarbeit auch die Validierung von RAMONA gegen einen "Speisewasserverlust"-Test, der am KKW Mühleberg durchgeführt wurde. *STARS* stützt sich auf eine enorme Menge von Daten, Zeichnungen und Dokumenten ab. Für deren effiziente Archivierung und schnellen Wiederzugriff wurde in der Vergangenheit ein Informationssystem (IRIS), basierend auf objektorientierter Datenbasis-Technik, konzipiert. Als ein erster Schritt zu seiner Realisierung wird gegenwärtig ein kleineres Informationssystem (*PANDA-DINF*) für das *PANDA*-Experiment (siehe unten), ausgehend vom bereits bestehenden IRIS-Konzept, entwickelt.

Thermohydraulische Aktivitäten im Rahmen computerunterstützter Analysen von KKW wurden in internationale Programme integriert. Ein wichtiger Meilenstein wurde in 1994 mit dem Unterzeichnen des *CAMP*-Übereinkommens (*Code Assessment and Maintenance Program*) zwischen der US NRC und dem BEW erreicht. Diese Programmteilnahme stellt sicher, dass das PSI ununterbrochenen Zugang zu den neuesten Versionen der wichtigsten Systemcodes für LWR- und ALWR-Sicherheitsanalysen hat und, als Gegenleistung, fortgeschrittene Modelle zu den Codes, insbesondere im Bereich der Wärmeübertragung oberhalb des kritischen Wärmeflusses, beisteuern kann. Des weiteren, leistete das PSI einen bedeutenden Beitrag zum CSNI- Sicherheitsbericht über Unsicherheits-Analysemethoden mit der Übernahme der Verantwortung für die Formulierung der Codevalidierungs-Matrix für Separate-Effekte-Tests im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit (OECD/NEA/CSNI).

LWR - KONTAMINATIONSKONTROLLE

Der Umwälzungs-Testkreislauf wurde 1994 weiter optimiert. Vier Autoklaven können jetzt mit identischem Speisewasser betrieben werden, um die Aktivität und Ablagerung auf intern beheizten Zircaloy-Rohren unter Variation der Wasserchemie und Randbedingungen für Oberflächensieden zu modellieren. Mehrere spezifische Parameter wurden untersucht: Eine Variation der Oberflächenbehandlung von Stahlproben zeigte, dass elektro-

polierte Oberflächen am langsamsten, mechanisch polierte Oberflächen dagegen am schnellsten korrodierten. Nach Anwendung eines Dekontaminationsverfahrens der Fa. SIEMENS, stellte sich die Rekontamination unabhängig von der Oberflächenbehandlung ein. Unter Benutzung von COUETTE-Autoklaven mit gut definierten Flussfeldern wurde gezeigt, dass die Aktivitätszunahme von Co-58 unabhängig von der angewandten Wassergeschwindigkeit geschieht. Schliesslich zeigten Messungen vor Ort an schweizerischen SWR, dass die Kobalt-Aktivität im Reaktorwasser hauptsächlich in gelöster Form vorkommt, nicht nur unter stetigen Bedingungen, sondern auch, unerwartet, während der beim Reaktorabfahren beobachteten Aktivitätserhöhung.

ALPHA - PROGRAMM

Das Projekt umfasst drei grössere experimentelle Bestandteile: *PANDA*, eine grossmasstäbliche, integrale Systemsimulationsanlage; *LINX*, eine mittelgrosse Anlage zur Untersuchung besonderer Effekte, wie Mischungs- und Kondensationsphänomene in Druckabbau-Becken und Containment-Volumina; *AIDA*, eine Testvorrichtung für Aerosoluntersuchungen, die eine passive Containmentkühlung simuliert (siehe oben).

- Der Bau von *PANDA* wurde 1994 abgeschlossen, und die Inbetriebnahme hat in Vorbereitung des ersten stationären Tests im März 1995 begonnen. Wegen der erhöhten Bedeutung der Anlage im Zertifizierungsprozess der US-NRC für den SBWR, müssen die Tests und begleitende Analysen vollen nuklearen Qualitätssicherungs-Standards (NQA-1) angepasst werden. Dazu wurde Personal von GE ans PSI delegiert, um die Einführung des QA-Verfahrens zu entwickeln und zu überwachen. Parallel wurden Vorberechnungen der ersten Experimente mit dem Code TRACG durchgeführt und die Resultate der NRC unterbreitet.
- Eine Zusammenarbeit wurde zwischen PSI und ENEL schriftlich vereinbart mit dem Ziel, das Verhalten eines Kondensations-Wärmetauschers zu untersuchen, der zur passiven Containmentkühlung eines fortgeschrittenen Druckwasserreaktors vorgesehen ist. Neben der Durchführung der Experimente an der *LINX*-Anlage, beteiligt sich das PSI auch an deren Vorberechnungen. Der Vorkonditionierungs-Kreislauf und das Datenerfassungssystem wurden bereits eingebaut und umfassend getestet.
- Dreidimensionale numerische Simulationen des oberen *AIDA*-Trommels wurden mit den Codes ASTEC und FLOW3D durchgeführt, um die optimale Platzierung einer Deflektor-Platte zur gleichmässigen Verteilung der Strömung an den Kondensatorrohren ohne übermässigen Druckverlust zu bestimmen. Ein Lagrange-Teilchenverfolgungs-Modell, das mit den zwei Codes interferiert, wurde geschrieben und lieferte erste Abschätzungen über die Aerosolablagerung in der oberen Trommel und den Kondensatorrohren.

HTR - PROTEUS

Im Rahmen des laufenden internationalen Programmes "HTR-*PROTEUS* Experimente" wurden zwei neue Typen von Reaktorconfigurationen untersucht, nämlich eine Reihe stochastischer Kernbeladungen mit Brennstoff- und Moderatorokugeln, als auch ein sog. "Punkt-auf-Punkt" Kugelbett-Kern. Letzterer entspricht einem speziellen Typ deterministischer Kernladung, die speziell konzipiert wurde, um einen leichten Zugang zum Kernzentrum, z.B. für die Messung von Reaktionsraten innerhalb einzelner Brennstoffkugeln, zu ermöglichen.

Signifikante Effekte wurden im stochastisch beladenen Kern 4 beobachtet, die insbesondere zu starken azimuthalen Schwankungen in individuellen Werten von Reflektor-Kontrollstäben führten. Diese Schwankungen, deren analytische Voraussage schwierig ist, liegen weit ausserhalb der Genauigkeitsanforderungen für die Auslegung, die gegenwärtig für die Berechnung von Kontrollstab-Werten akzeptabel sind. Erstmalige Messungen von Reaktionsraten innerhalb der Brennstoffkugeln selbst haben vorläufige Ergebnisse geliefert, die zum erstenmal die vorausgesagte Änderung von Spaltungsraten über dem Kugelradius bestätigen.

SICHERHEIT SCHNELLER REAKTOREN

PSI-Untersuchungen zur Sicherheit schneller Reaktoren liefern im Rahmen internationaler F&E-Aktivitäten Beiträge zu spezifischen reaktorphysikalischen und thermohydraulischen Fragen. Der reaktorphysikalische Teil zielt auf Reduktion der Unsicherheiten in den Berechnungen der Reaktorsicherheitsparameter. Dies ist von Bedeutung für die aktuellen Kernladungen im Superphénix, aber noch wichtiger für die beabsichtigten neuen Brennstoffzusammensetzungen zur Plutoniumverbrennung. Da dieser Kern keine Uranblankets mehr und be-

trächtlich weniger Uran haben soll, werden das Neutronenstreaming aus dem Kern und die Neutronenabsorption in Strukturmaterialien wichtiger. Untersuchungen zeigten, dass Unsicherheiten im inelastischen Streuwirkungsquerschnitt von Eisen eine unerwartet grosse Rolle bei der Berechnung der Kernparameter spielen.

Im thermohydraulischen Teil wurde die Untersuchung von Mischungsphänomenen in geschichteten Strömungen unter Benutzung des WAMIX-Wasserkreislaufes im Rahmen einer Doktorarbeit abgeschlossen. Die Auslegung der Teststrecke NAMIX für die darauffolgenden Studien mit Natrium wurde abgeschlossen; der Bau des NALO-Kreislaufes, der das Natrium für die Experimente liefert, steht vor dem Abschluss. Parallel wurde die direkte numerische Simulation turbulenter Mischungsschichten in internationaler Zusammenarbeit (Anwendung und Weiterentwicklung des pseudo-spektralen Codes FLOW-SB) fortgesetzt. Die Studien wurden auf 3 Dimensionen erstreckt und haben Schichtungseffekte mitberücksichtigt; Proberechnungen für Luft, Wasser und Natrium zeigten gute Übereinstimmung mit Daten aus WAMIX-Messungen und der Literatur.

SICHERHEIT OSTEUROPÄISCHER REAKTOREN

1994 nahm das PSI eine Zusammenarbeit mit den Russischen Instituten RDIPE und RCC Kurtschatov im Rahmen internationaler Aktivitäten zu Verbesserung der RBMK-Sicherheit auf. Die PSI-Aktivitäten zielen auf die Bewertung der Wirksamkeit gegenwärtiger RBMK-Abschaltssysteme und die konzeptuelle Entwicklung eines unabhängigen diversitären Abschaltsystems für diesen Reaktortyp.

Obwohl der *Void*-Koeffizient des Primärkreislaufes durch technische Massnahmen drastisch reduziert wurde, zeigten die Bewertungsergebnisse keine Verbesserung des *Void*-Effektes im Kühlsystem der Kontroll- und Abschaltstäbe, was die Notwendigkeit eines zusätzlichen Abschaltsystems bestätigt. Die Physik eines solchen diversitären Abschaltsystems, das vom PSI vorgeschlagen wurde und auf der Einspritzung flüssiger Gifte basiert, wurde mittels stationärer physikalischer Berechnungen, Transientenanalysen und kritischer Experimente am Kurtschatov Institut untersucht. Es zeigte sich, dass das vorgeschlagene System westliche Basisauflagen für Abschaltssysteme erfüllt.

Die Aktivitäten finden im Rahmen der schweizerischen "Osthilfe" des EDA statt.

ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE

Die Entsorgungs-Aktivitäten zielen auf die Entwicklung und Prüfung von Modellen und das Gewinnen ausgewählter Daten, um das Verhalten angestrebter schweizerischer Endlager verlässlich beschreiben zu können. Dabei stehen die Weiterentwicklung des Verständnisses sicherheitsrelevanter Mechanismen und Prozesse, die die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfallmatrizen bestimmen, der Transport durch das technische Barrierensystem und das Fernfeld sowie die Anwendung des gewonnenen Wissens in Sicherheitsanalysen im Vordergrund. Im Juni 1994 hat die NAGRA einen formellen Antrag auf Rahmenbewilligung eines Endlagers für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) am Wellenberg-Gebiet gestellt. Ferner wurde der Kristallin-1 Bericht durch die NAGRA als Abschluss eines umfangreichen Untersuchungsprogrammes für den Standort eines Endlagers für hochaktive Abfälle im Kristallin der Nordschweiz veröffentlicht. Das PSI hat zu beiden Meilensteinen fachlich beigetragen.

Ein SMA-Endlager beinhaltet grosse Mengen von Strukturzement. Zement-Degradierungsexperimente zeigen die zeitliche Entwicklung von Zement-Porenwässern auf. Ihre gemessene Zusammensetzung war in guter Übereinstimmung mit theoretischen Voraussagen. Langzeit-Experimente zur Radionuklid-diffusion durch Zementplatten wurden fortgesetzt und durch globale Sorptionsmessungen ergänzt. Beide Typen von Experimenten zeigen unterschiedliche Verhältnisse der Sorptionsverteilung, eine Diskrepanz, die noch im einzelnen analysiert werden muss.

Einige der Abfallmatrizen im SMA-Endlager beinhalten abbaubare organische Materialien, deren Abbauprodukte einen wichtigen Einfluss auf die Radionuklidspeziation und -sorption haben. Die Untersuchung der radiolytischen Degradierung von Ionenaustauschern wurde im wesentlichen abgeschlossen; in erster Linie wurden Oxalate, Aminine und Ammoniak als Produkte identifiziert. Ihr Einfluss auf die Sorption kann in einer Zementumgebung vernachlässigt werden. Die Situation ist ganz anders bei chemisch degradierender Zellulose, wo ein starker Einfluss auf der Sorption festgestellt wird. Diese Untersuchungen sind im Gang.

Im Nahfeld eines Endlager-Systemes, müssen grosse Konzentrationensgefälle erwartet werden. Wasser mit hohem pH-Wert aus einem zementhaltigen Endlager wird z.B. die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Wirtgesteins beeinflussen. Zwei Ansätze zur Kopplung von Transport und Speziation, ein Zufallsmodell und ein Modell mit Zellularamatomen, wurden angewandt; beide sind imstande, die Bewegung scharfer Fronte, die aus der Festkörper-Auflösung und -Prezipitation entstehen, zu beschreiben.

Die Modellierung von Feld-Migrationsexperimenten am Felslabor Grimsel wurde für Experimente mit Uranin, Natrium und Strontium als Tracer abgeschlossen. Die ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen ist ein bedeutender Schritt in der Modellvalidierung. Gegenwärtig sind Experimente mit Cäsium im Gang, wo Sorptionskinetik ein wichtiger Mechanismus zu sein scheint.

Humin-Substanzen könnten durch Komplexierung den Transport von Radionukliden durch die Geosphäre beeinflussen. Beim Anfang der Arbeit vor einiger Zeit stand wenig Information über Komplexierung bei Spur-Konzentrationen unter endlagertypischen Bedingungen zur Verfügung. Umfangreiche Messungen unter solchen Bedingungen und sorgfältige Literaturdaten-Auswertung haben jetzt zu Modellen geführt, die in Sicherheitsbetrachtungen benutzt werden können und einen Bereich von zehn pH-Einheiten und zehn Grössenordnungen in der Konzentration freier Metalle abdecken.

FORTGESCHRITTENE BRENNSTOFFZYKLEN

Dieses neue Projekt befasst sich mit der Reduzierung von Plutoniumvorräten und der Transmutation langlebiger höherer Actiniden. Forschung auf den Gebieten der Reaktorphysik und materialtechnischer Aspekte verfolgt ein doppeltes Ziel: Vermehrter Plutoniumverbrauchs in (ggf. modifizierten) LWR und Nutzung der höheren Actiniden als Brennstoffe in fortgeschrittenen schnellen Systemen.

Eine Studie für einen Kern aus 100% - PuO₂ (MO_x) in einem kleineren schweizerischen KKW hat ermutigende Ergebnisse gezeigt. Forschung zur potentiell viel wirksameren Nutzung von uranfreien Brennstoffen aus LWR-Plutonium wurde durch die Ermittlung der reaktorphysikalischen Eigenschaften eines breiten Bereichs von Mischungen aus Plutonium und abbrennbaren Giften initiiert, und zeigte auch die Notwendigkeit geeigneter Ganzkern-Analysen. Experimente zur Actinidentransmutation, einschliesslich der Bestrahlung dünner actinidenhaltiger Proben mit 0.6 GeV Protonen aus dem PSI-Zyklotron, wurden in Angriff genommen, um eine Validierungs-Basis für Rechenmodelle bereitzustellen, die in solchen Studien angewandt werden.

Im Bereich der Nachbestrahlungsuntersuchungen wurden zwei hochabgebrannte MO_x-DWR-Brennstoffstäbe zerstörungsfrei charakterisiert; die radiale Isotopenverteilung von Pu in hochabgebranntem SWR-Brennstoff wurde mit *Sekundäre Ionen Massen-Spectrometrie* ermittelt. Die radialen Pu-Konzentrationsprofile wurden mit berechneten Profilen des verbesserten TRANSURANUS-Codes des Instituts für Transuranelemente verglichen.

Auf dem Gebiet der Analytik wurde *High Performance Liquid Chromatography* erfolgreich mit *Inductively Coupled Plasma Mass-Spectrometry* zur Trennung von Lanthaniden und Analyse von Nd-148 als Abbrand-Monitor gekoppelt. Der nasschemische Prozess des PSI wurde angewandt, um (U,Pu)-Oxyde und -Nitride mit hohem Pu-Gehalt vorzubereiten. Die Möglichkeit, niedrige Sinterungstemperaturen anzuwenden, verspricht viel für die Erzeugung von Brennstoffen mit geeigneter Löslichkeit, eine Vorbedingung für eine spätere erfolgreiche Wiederaufarbeitung.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN

Das Projekt Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen befasst sich mit Gesundheitsrisiken, Umwelteinwirkungen und ökonomischen Aspekten verschiedener Energieträger (fossile Brennstoffe, Kernenergie und erneuerbare Energien); es zielt auf eine (in vernünftigem Rahmen) vollständige Bewertung des schweizerischen Energiesystems, ausgehend von der gegenwärtigen Situation und in die kommenden 30 Jahre hineinleuchtend.

- **Ökoinventare:** Ein umfangreicher Bericht, der eine Lebenszyklusanalyse von gegenwärtigen Systemen zur Elektrizitätsumwandlung und Wärmeerzeugung liefert, wurde im März 1994 von der ETHZ veröffentlicht. Es werden ca. 300 Luft- und Wasserschadstoffe gedeckt und ca. 500 Prozesse untereinander gekoppelt, um die Wechselwirkungen zwischen Energiesystemen zu erklären. Zwei Elektrizitätsmixe - für die Schweiz und für

die UCPT-E-Länder - wurden benutzt. Ausgehend von den erzeugten Daten wurden Vergleiche von Elektrizitätserzeugungssystemen durchgeführt, z.B. hinsichtlich Treibhausgas-, SO_x-, NO_x- und NMVOC-Emissionen, Landverbrauch, Strahlung und Abfällen.

- **Risiko-/Sicherheitsaspekte:** Die Arbeit richtet sich auf Weiterentwicklung und Konsolidierung der PSI-Datenbasis von energiebezogenen schweren Unfällen, dazugehöriger Abschätzungen für die wichtigsten Brennstoffzyklen und Anwendung probabilistischer Techniken zur Überprüfung potentieller Beiträge schwerer Unfälle zu externen Kosten (konzentriert auf Kernkraft). Besondere Aufmerksamkeit wurde der Qualifikation und Erweiterung der verfügbaren Daten geschenkt, insbesondere über Wasserkraft und den verzögerten gesundheitlichen Auswirkungen des Tschernobyl-Unfalls. Normierte Todesfallraten wurden für Kohle, Öl, Gas, Wasser und Kernbrennstoff berechnet. Externe Kosten nuklearer Unfälle wurden durch eine (um die Behandlung ökonomischer Folgen erweiterte) anlagenspezifische probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) errechnet, und die Unterschiede von mehreren Größenordnungen zwischen bestehenden Studien untersucht und erklärt.

3. Internationale Zusammenarbeit

- **CORVIS:** Vertragliche Kopplung von 19 Institutionen aus 10 Ländern im Rahmen einer *Task-Force*.
- **Aerosol-Rückhaltung, POSEIDON:** Electric Power Research Institute (EPRI, USA), Framatome.
- **Komponentensicherheit, HDR-Experimente, Spannungsriss-Korrosion:** Forschungszentrum Karlsruhe, IAEA, MPA Stuttgart, VTT (Finnland).
- **EDEN, Materialien des inneren Kernbereichs, Brennstoffforschung:** OECD/NEA-Halden Programme, EPRI/NFIR, internationale Brennstoffprogramme (DOMO, PRIMO, GEMINI, FIGARO).
- **CAMP, Code Assessment and Maintenance Program:** US NRC.
- **PROTEUS-Experimente:** Delegieren von Experimentatoren aus USA, Deutschland, Japan, China, GUS im Rahmen eines IAEA-Programmes; zusätzliche französische Beteiligung.
- **ALPHA:** EPRI, General Electric, KEMA (NL), IEE (MEX), ENEL.
- **Schneller Brüter:** European Fast Reactor (EFR), CEA.
- **Osteuropäische Reaktoren:** RDIPE, RCC Kurchatov
- **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen:** CEA, OECD/NEA
- **GaBE:** IAEA-koordiniertes Forschungsprogramm, COGEMA (F)

4. Perspektiven für 1995

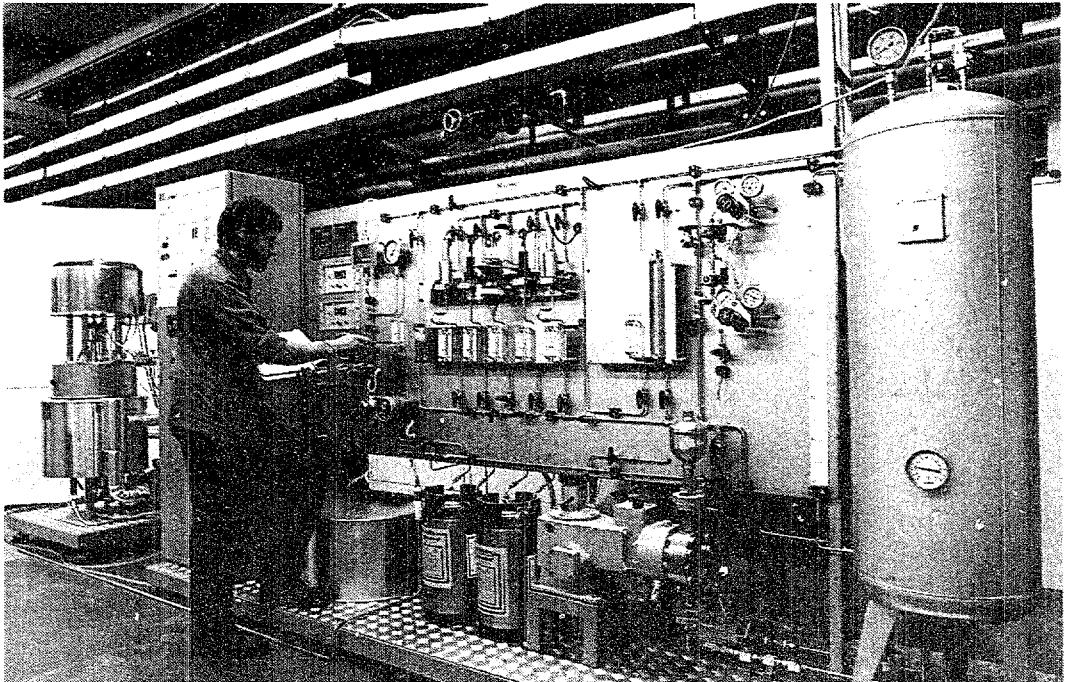
Die oben dargestellten Forschungsprogramme sind mittel- und langfristig angelegt. Die meisten Aktivitäten werden 1995 fortgeführt. In 1995 und 1996 werden aber auch grundsätzliche Überlegungen über die Fortsetzung oder Umorientierung vieler PSI-Programme auf dem Gebiet der nuklearen Energieforschung stattfinden und entsprechende Weichen gestellt. Bei *CORVIS* ist es vorgesehen alle 2-3 Monate ein Durchschmelzexperiment mit unterschiedlichen geometrischen Charakteristiken durchzuführen; das Projekt soll sich für nicht-schweizerische Verhältnisse öffnen, und eine stärkere und formellere internationale Einbettung, als OECD-Projekt, wurde angestossen. Eine Fortsetzung des LWR-Kontamination-Projektes wird derzeit geprüft. Die *HTR-PROTEUS-Experimente* sollen 1995, spätestens 1996 abgeschlossen werden. Verschiedene Ideen zu Nachfolgeexperimenten auf dem Gebiet der Reaktorphysik und fortgeschrittener Brennstoffzyklen werden derzeit evaluiert; die Qualität des zukünftigen Forschungsprogrammes wird über den Weiterbetrieb von *PROTEUS* mitentschieden. Die von der US NRC geforderten Messungen im Rahmen des Projektes *ALPHA* werden 1995 abgeschlossen; für die zukünftige Nutzung der Anlagen für Grosseperimente werden verschiedene Optionen untersucht, insbesondere werden Vorbereitungen für eine Einbindung der Projektanlagen in Forschungsprogrammen der EU getroffen. Die Aktivitäten zum schnellen Brüter sollen bis zum Ablauf der bestehenden Verträge mit UAK und BEW (Ende 1996) fortgeführt werden. Das Programm "Fortgeschrittene Brennstoffzyklen" läuft zunächst bis Ende 1995; gegen Ende 1995 stehen seine Fortsetzung und der damit verbundene Aufwand PSI-intern zur Diskussion und Entscheidung an.

REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG DER HSK

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Sabyasachi Chakraborty



Spannungsrisskorrosion

Diese PSI-Versuchsanlage dient der Beurteilung des Langzeit-Korrosionsverhaltens von druckbelasteten Komponenten in Kernkraftwerken.

1. Programm Ziele

Die Aufsichtsbehörde HSK hat die Sicherheit der schweizerischen Kernanlagen nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik auszurichten. Dazu unterstützt die HSK verschiedene Vorhaben auf wichtigen Gebieten der regulatorischen Sicherheitsforschung.

Die Forschungsaktivitäten teilen sich in drei verschiedene Bereiche auf:

- Forschungsvorhaben am Paul Scherrer Institut PSI und an den Hochschulen.
- Einzelprojekte bei in- und ausländischen Ingenieur-Unternehmungen.
- Beteiligung an internationalen Projekten.

Im folgenden werden die Vorhaben aus der Sicht des Programmleiters kommentiert. Für weitere Informationen wird auf die detaillierten Jahresberichte der einzelnen Projekte verwiesen.

2. Arbeiten und Ergebnisse 1994

Simulationsmodelle zu Transientenanalysen in der Schweiz (STARS II); PSI - Villigen

In der Phase II des Projektes wird die Übertragung aller schweizerischen Kernkraftwerksanlagen auf Eingabe-Datensätze für Simulationsmodelle weitergeführt.

Für alle vier KKW's sind spezifische Störfallsimulationen und Sensitivitätsstudien vorgenommen worden.

Neu sind auch sogenannte *On-Call-Analysen* eingeführt worden, die es der HSK erlauben, kurzfristig dringende sicherheitstechnische Abklärungen mit Simulationsmodellen ausführen zu lassen. Im vergangenen Forschungsjahr wurde diese Dienstleistung in einigen Fällen beansprucht.

Das Konzept für die Entwicklung des Informationssystems IRIS für Störfallanalysen wurde abgeschlossen und die Realisierung an einem Prototyp demonstriert.

Die HSK braucht auf dem Gebiet der Störfallanalyse ein erfahrenes Team, das in der Lage ist, schnell und gezielt auf aktuelle Fragen einzugehen.

Spannungsrisskorrosion von Stählen für Reaktorkomponenten im Heisswasser; PSI - Villigen

Mit dem neuen Heisswasserkreislauf mit einer im Autoklaven integrierten Zugmaschine konnten mehrere Langzeitversuche erfolgreich durchgeführt werden. Zugleich wurde der alte Kreislauf mess- und regeltechnisch verbessert. Die Versuchsreihen werden unter Reaktorbedingungen durchgeführt, mit einer Wasserchemie, die knapp ausserhalb der empfohlenen Werte für den Sauerstoffgehalt und die Leitfähigkeit liegt. Bei den ausserordentlichen Bedingungen zeigte sich, dass die unter konstanter Last stehenden Proben anfälliger auf Spannungsrisskorrosion sind als die statisch keilbelasteten Proben. Die Tätigkeiten sind mit einem Audit von der HSK überprüft worden. Trotz der aufwendigen Langzeitversuche mit hoher Anforderung an die Mess- und Regeltechnik konnten die wesentlichen Ziele im vergangenen Projektjahr erreicht werden.

Die Forschungsarbeiten liefern neue Einsichten für die Beurteilung des Langzeit-Korrosionsverhaltens von durckbelasteten Komponenten in den Kernkraftwerken.

Spannungsrissskorrosion von Reaktordruckbehälterstählen; ETH - Zürich

Im vergangenen Forschungsjahr sind einerseits Messergebnisse ausgewertet und andererseits Proben aus den Heisswasserkreisläufen untersucht und analysiert worden. Die Erkenntnisse sind für die Sicherheitsbeurteilung der Kernkraftwerke wichtig.

LWR Kontaminationskontrolle; PSI - Villigen

Arbeiten in vergangenen Jahr:

- Umrüstung des Pilotkreislaufs (*Loop*) zur Untersuchung der Einflüsse von Temperaturgradienten auf die aktive und inaktive Ablagerung auf Zirkaloy-Hüllrohren.
- Untersuchung der Aktivitätsablagerung unter kontrollierten Strömungsbedingungen in Couette-Autoklaven. Es zeigte sich, dass der Aufbau der Oxidschicht und der Aktivität zeitlich unterschiedlich verlaufen. Der Aktivitätssaufbau (gelöstes Co-58) ist unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit.
- Rekontaminationsversuche an Proben mit verschiedenen Oberflächenbehandlungen. Die vorläufigen Erkenntnisse zeigen, dass die Oberflächenvorbehandlung einen grossen Einfluss auf die Aktivitätsablagerung hat. Eine Oxid-Schutzschicht vermindert die Rekontamination.
- Auswertung von Messkampagnen über Inhaltsstoffe im Reaktorwasser beim Abschalten der Anlagen in Leibstadt und Mühleberg. Entgegen den bisherigen Erwartungen zeigte sich, dass im Normalbetrieb der überwiegende Teil der aktivierten Korrosionsprodukte im Reaktorwasser gelöst ist.

Bestimmung des Reentrainments aus dem Sumpf des Containments nach einem Kernschmelzunfall bei Leckagen oder bei einer kontrollierten Entlüftung des Containments; ETH - Zürich

Gemäss Terminplan wurde im Frühjahr des vergangenen Forschungsjahres die geplante Versuchsanlage im Pilotmassstab aufgebaut und im Sommer erfolgreich in Betrieb genommen. Nach einigen Vorversuchen zur Optimierung der Mess- und Analysetechnik konnte die erste Serie der Messungen mit gelösten Verunreinigungen (Na_2SO_4) durchgeführt werden. Diese ersten reproduzierbaren Ergebnisse bestätigen bis jetzt die von der HSK getroffenen Annahmen über die Filterbelastung während einer Containmententlüftung.

Die Resultate sind unter anderem für die Notfall-Schutzmassnahmen während und nach einem schweren Kernschmelzunfall wertvoll.

Wasserstoff-Zündungen; PSI - Villigen

Zusätzlich zu den Gasgemischen mit Wasserstoff-Dampf- CO_2 -Luft wird nun auch der Einfluss von CO auf das Zündverhalten untersucht. Solche Gasgemische können nach schweren Kernschmelzunfällen im Containment auftreten und müssen in jedem Fall beherrscht werden.

Bei der Zumischung von Kohlenmonoxid verschiebt sich die untere Zündgrenze beim Sauerstoff von 6,5 Vol-% auf rund 5 Vol-%. Die Drucküberhöhung verhält sich beim CO gleich wie beim Wasserstoff.

Das Projekt wird mit einem Schlussbericht anfangs 1995 abgeschlossen. Die Ergebnisse der Versuche werden in den Simulationen von schweren Kernschmelzunfällen und bei allfälligen Massnahmen berücksichtigt.

Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen; ETH - Zürich

Nach der vollständigen Auswertung und Publikation der Ergebnisse wurde eine radiometrische Karte der Schweiz über die Dosisleistung am Boden erstellt.

Im Hinblick auf Einsätze der Aeroradiometrie bei Notfällen wurde das Freigabeverfahren für den Einbau des Messsystem in einen Super-Puma-Helikopter der Armee durchgeführt. Schulung und Tests sind mit diesem Überwachungs-Messsystem vorgenommen worden.

Programmsystem RADAU für die Ermittlung der Dosisbelastung durch atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe in komplexen Geländen; PSI - Villigen

Der evaluierte amerikanische Simulationscode ADPIC (Version 1992) wurde durch die fortgeschrittene Version mit radioaktiven Zerfallsketten ersetzt. Im vergangenen Jahr konnte planmässig das neue Mathew/ADPIC-Codessystem auf HSK- und PSI- Arbeitsstationen implementiert werden. Die Abnahmetests sind in Vorbereitung.

Mit diesem Code-System erhält die HSK die Möglichkeit, gegenüber den herkömmlichen Methoden verfeinerte deterministische Ausbreitungsrechnungen, gekoppelt mit aktuellen Windfeldern, nach grossen Freisetzungen von radioaktiven Stoffen aus den Kernkraftwerken zu machen.

Zusammenarbeit HSK-PSI in der Dosimetrie; PSI - Villigen

Das grundsätzliche Ziel dieses Projektes ist es, mit geeigneten Studien, Entwicklungsarbeiten sowie Messkampagnen auf eine Verbesserung der Dosimetrie hinzuwirken. Insbesondere sind die Anforderungen an die Dosimetrie durch die neue Strahlenschutzverordnung erhöht worden.

Im vergangenen Projektjahr sind 10 Teilprojekte aus den Bereichen: Aerosolmesstechnik, Freigabemesstechnik, Emissionsmessungen, Sonden-Kalibrierung, Personenkontaminierung, Neutronen-Personendosimetrie, Hochenergie Neutronenfelder und in vivo-Ganzkörpermessungen bearbeitet und zum Teil abgeschlossen worden. Die Personendosimetrie durch äussere und innere Bestrahlung ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes und somit auch der HSK.

Radioanalytik; PSI - Villigen

Das neue Dosimetrie-Verfahren zur Erfassung der Aktiniden (Strontium 90) und α -Strahler ist verfeinert worden. Es wurden Messungen an Gras- und Bodenproben durchgeführt, die den Nachweis für den Einsatz als Überwachungsmethode erbrachten.

Verhalten von Radionukliden aus Kernkraftwerken in Aare und Rhein; EAWAG - Dübendorf

Das Hauptinteresse galt der Co-60 Messung, der Radionuklidverteilung und Bilanzierung im Bielersee und dem Radionuklidverhalten unterhalb des KKW Beznau. Es zeigte sich, dass bis zu 50% des Radiokobalts im Aarewasser anionisch komplexiert wird und daher ein geringes Adsorptionsverhalten an Partikeln aufweist. Aufgrund der sehr langsam ablaufenden Adsorptionskinetik konnten keine ausserordentlichen Co-60 Anreicherungen in den Fluss- und Seesedimenten unterhalb der KKW's festgestellt werden.

Die Kenntnis über das Transportverhalten von Radionukliden aus Abwässern der KKW stellt ein wichtiger Beitrag für die Überwachung und mögliche Massnahmen bei Störfällen dar.

Radioökologie; PSI - Villigen

Im vergangenen Forschungsjahr wurden drei Teilprojekte bearbeitet:

- Installation des bei der NAZ eingesetzten Berechnungsmodells CHECOSYS. Testrechnungen anhand von Chernobyl-Messungen für die Freisetzungspfade: Gras-Milch.
- Wurzelauftnahmen von Cs-134 bei Fichtenkeimlingen.

- Bestimmungen des Depositionszeitpunktes, der die höchste Kontaminierung von Weizenkörnern zur Folge hat.

Für die HSK ist es wichtig, den aktuellen Kenntnisstand über radioökologische Vorgänge zu erweitern.

Human Reliability Analysis; PSI - Villigen

Der Einfluss des menschlichen Handelns auf die Risikobewertung eines Kernkraftwerkes, sowohl im Normalbetrieb als auch während Störfällen, ist ein wichtiges Forschungsgebiet.

Im vergangenen Forschungsjahr standen folgende Tätigkeiten im Vordergrund:

- Begutachtung der Zuverlässigkeitsanalysen des menschlichen Handelns in den probabilistischen Sicherheitsanalysen für die KKW's Mühleberg und Beznau.
- Überblick über alle wichtigen internationalen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Zuverlässigkeits-Analyse des menschlichen Handelns.
- Koordination der OECD-Arbeitsgruppe *Critical Operator Interactions and Data Issues*

Die Risikobewertungen sind wichtige Entscheidungsgrundlagen für die Akzeptanz von Kernkraftwerken. Die HSK legt Wert darauf, dass solche Bewertungen auf dem neuesten Stand der Erkenntnisse und umfassend vorgenommen werden.

Berechnung der kinetischen Parameter von Leichtwasserreaktoren am Beispiel des KKW Beznau; ETH - Lausanne

Die neuentwickelte mathematische Methode erlaubt es, die reaktorkinetischen Parameter mit Standard-Codes für stationäre Reaktorzustände zu ermitteln.

Das Projekt wurde mit einer Dissertation (EPFL 1230 1994) erfolgreich abgeschlossen, in der auch gezeigt wird, dass das mathematische Verfahren beispielsweise beim Reaktor in Beznau eingesetzt werden kann. Für die HSK ist es wichtig, dass die Berechnungen der Brennelementhersteller mittels unabhängiger Methoden überprüft werden können.

Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des schnellen Brutreaktors; PSI - Villigen

Die Forschungsarbeiten haben zum Ziel, das Verständnis für die verschiedenen Sicherheitsprobleme der Anlage Superphénix zu fördern. Die Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Partnern gemacht und stützen sich auf die Einsicht in die französischen Begutachtungen.

Die Tätigkeiten konzentrieren sich auf die Gebiete der Reaktorphysik und Thermohydraulik. In der Reaktorphysik konnte gezeigt werden, dass beim Einsatz von neuem Brennstoff zur Plutoniumverbrennung die Unsicherheiten in den nuklearen Daten der inelastischen Neutronen-Streuung von Eisen eine unerwartet grosse Rolle in den Berechnungen der nuklearen Parameter spielt. In der Thermohydraulik werden vor allem die Mischungsphänomene zwischen Flüssigkeitsschichten untersucht. Vorexperimente mit Wasser sind abgeschlossen und ausgewertet. Der darauf abgestützte Natrium-Versuchsstand ist im Bau.

Die Behörden legt Wert darauf, auf eigenes Fachwissen bei der Beurteilung der Sicherheit von schnellen Brutreaktoren zurückgreifen zu können.

Reaktor-Druckbehälter-Versagensmodus beim Kernschmelzen: CORVIS; PSI - Villigen

Das Projekt CORVIS untersucht das Durchschmelzen des Druckbehälters von Leichtwasserreaktoren während eines schweren Kernschmelzunfalles. Dazu werden grosstechnische Experimente an Druckbehältermodellen mit einer Eisen-Aluminiumoxid-Schmelze als Substitut für die Kernschmelze durchgeführt. Diese Experimente sollen vor allem zur Verbesserung und Validierung von Berechnungsmodellen dienen.

Im vergangenen Forschungsjahr konnten zwei Vorversuche, ein Inbetriebnahme-Versuch und ein Ausströmungsversuch am Modell einer Durchführungsleitung analog zum KKW Mühleberg durchgeführt werden. Die Versuchsergebnisse entsprechen bei den zwei letzten Grossversuchen nicht den Erwartungen. Einerseits traten experimentelle Schwierigkeiten auf, andererseits zeigte sich noch ein Bedarf an analytisch-numerischen Modellverbesserungen. Der Ausströmungsversuch deutet darauf hin, dass die Leitungsstutzen am Reaktorbehälterboden als Sollbruchstellen wirken und die Kernschmelze als relativ dünner Strahl in das Containment strömt. Ein für das Containment gefährlicher Unfallablauf könnte in diesem Fall ausgeschlossen werden. Ob diese vorläufigen Ergebnisse auf den Reaktordruckbehälter von Mühleberg übertragbar sind, bedarf noch weiterer Abklärungen.

Das eigentliche Projektziel, die Aufheizung der Schmelze mit der Doppelelektrode, konnte nicht gemäss Forschungsplan erfolgreich durchgeführt werden.

Die Experimente erlauben es, dass die Berechnungsmodelle für das Austreten der Kernschmelze aus dem Reaktordruckbehälter zu verbessern und experimentell abzusichern.

Brandgefährdung und -Risiko im KKW; TECOVA, Wohlen

Im vorliegenden Projekt wurde ein Berechnungsverfahren entwickelt, das weitgehend auf anerkannte physikalische und chemische Gesetze und Regeln abstützt. Die analytischen Modelle sind als PC-Simulationsprogramm numerisch umgesetzt und an mehreren Brandversuchen validiert worden.

Das Simulationsprogramm wird in einer Brandanalyse für das KKW Mühleberg am realistischen Fall getestet.

Damit ist ein Schritt in die Richtung der Quantifizierung des Brandrisikos mit einem eigenen Werkzeug vorgenommen worden.

Evaluation of Fuel-Coolant-Interaction Energetics; ENERGY RESEARCH, Rockville (USA)

Im Vordergrund stand die analytische Untersuchung der Auswirkungen von energiereichen Brennstoff-Kühlmittel-Wechselwirkungen auf das Containment während schweren Kernschmelzunfällen. Es konnte bestätigt werden, dass bei Dampfexplosionen innerhalb und ausserhalb des Reaktordruckbehälters die Versagenswahrscheinlichkeit für das Containment bei Beznau und Leibstadt vernachlässigbar klein ist.

Diese Analysen stellen einen wesentlichen Beitrag zur kritischen Diskussion über die Sicherheit der schweizerischen Kernanlagen während Kernschmelzunfällen dar.

Erdbeben-Kapazität von Schubwänden in Kernkraftwerken; BASLER & TOFMANN, Zürich

Die Schweiz beteiligt sich an diesem OECD Forschungsprojekt. Die in Japan durchgeführten Schütteltischversuche an Modellwänden bieten dazu die Grunddaten.

Ziel des Schweizer Beitrages ist es, die Erkenntnisse aus den Versuchen und aus den darauf ausgerichteten Modellrechnungen im Hinblick auf die schweizerische Auslegungspraxis auszuwerten und zu nutzen.

Maitrise de la spectrométrie et de la dosimétrie neutronique dans des champs de radiation complexes; CERN, Genf

Im vergangenen Projektjahr konnten verschiedene neue Messkampagnen durchgeführt werden. Mehrere neue Messsysteme für Hochenergie-Neutronen wurden getestet und auf ihre Eignung für Feldmessungen geprüft.

Die Überwachung von nuklearen Energie- und Forschungsanlagen soll mit bestmöglichen Methoden und Verfahren durchgeführt werden. Dieses Vorhaben ist ein wichtiger Beitrag für erweiterte Überwachungskonzepte.

OECD Halden Reactor Project; Halden (Norwegen)

Seit 1991 ist die Schweiz (HSK, KKW-Betreiber) Mitglied des OECD Halden Projektes. Es hat zwei Schwerpunkte: Brennstoff + Werkstoffe (F+M), sowie Mensch-Maschine-Wechselwirkung (MMI).

F+M untersucht das Verhalten von nuklearen Brennstäben bei hohem Abbrand und von Strukturwerkstoffen aus dem Kernbereich unter Bestrahlung. Das Ziel ist es, den Schadensmechanismus aufzuklären und die Lebensdauer zu verlängern. Diese Themen sind für die schweizerischen KKW Betreiber von aktuellem Interesse

MMI gliedert sich in 3 Teilgebiete: a) Prüfmethode für sicherheitsrelevante Rechenprogramme (Software); b) Kommandoraumauslegung zur Erhöhung der Sicherheit und Verfügbarkeit; c) Rechensysteme zur Operateurunterstützung. Die MMI-Resultate sind wichtige Grundlagen für die Nachrüstung der Leittechnik in bestehenden Kernanlagen.

Halden dient auch zur Weiterbildung von Kernfachleuten. 1994 arbeiteten 3 Hochschulabsolventen aus der Schweiz in Halden. Von den früheren Delegierten ist heute einer bei der HSK und einer in einem Kernkraftwerk tätig. 1994 leitete ein Schweizer Vertreter die Halden Programmgruppe.

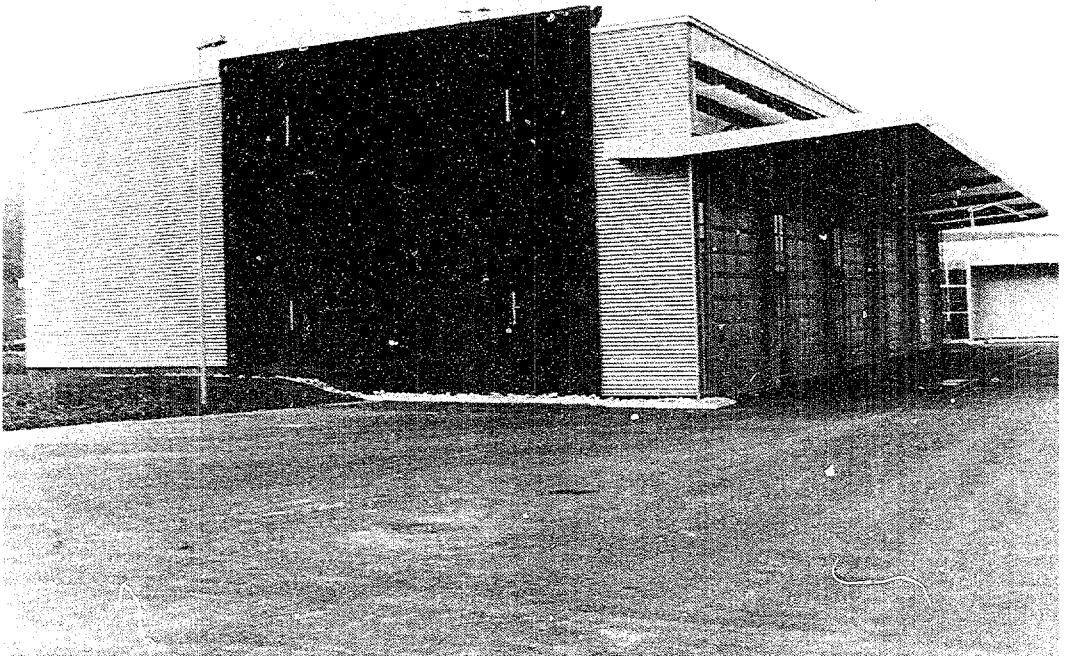
Beteiligung an der Forschung schwerer Unfälle der US-NRC, Washington (USA)

Die Schweiz leistet einen finanziellen Beitrag an das Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP) der amerikanischen Sicherheitsbehörde US-NRC. Teil dieses Forschungsprogrammes ist die Entwicklung des Computer Codes MELCOR, der den Ablauf von anlagespezifischen schweren Unfällen simulieren kann. Dieser Code wird von der HSK zur Überprüfung der Risikostudien der schweizerischen KKW's eingesetzt.

SOLAIRE THERMIQUE ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 1994 du programme de recherche

Chef de programme : Pierre Bremer



Absorbeurs non vitrés intégrés en façade

Centre d'entretien de la N5 à Boudry (NE), avec son installation type *plancher solaire direct*.

1. Objectifs

Pendant l'année 1994, les divers projets de recherche entrepris dans le cadre du programme 1992-1995 ont été poursuivis. Six projets ont pu être menés à terme [1, 4, 5, 9, 10, 11]. Quatre projets sont en voie d'achèvement [7, 12, 13, 16]. Six projets sont encore en cours [2, 3, 6, 8, 14, 15] et trois projets sont nouveaux [17, 18, 19].

2. Les travaux effectués en 1994

MÉTÉOROLOGIE SOLAIRE

Dans le domaine de l'éclairage naturel, la Suisse a participé au projet AIE **Mesures spectrales du rayonnement solaire** qui s'est terminé en octobre 1994. Il en est résulté un grand nombre de résultats scientifiques concernant les calibrations et les caractérisations d'instruments, des tests et développements de modèles d'évaluation de l'éclairage naturel, des banques de données de luminance, d'illuminance et du rayonnement spectral. En particulier, un rapport sur les **Mesures et modélisation de l'éclairage naturel à Genève** est disponible [1].

COMPOSANTS

Comme par le passé, les travaux concernant la technologie des capteurs et des composants solaires ont été poursuivis au **Laboratoire Fédéral d'Héliotechnique de Rapperswil (SPF/ITR)**. Ce laboratoire jouit d'une réputation grandissante, en Suisse comme à l'étranger.

Les principaux travaux et résultats sont [2]:

- 40 nouveaux capteurs ont été testés, ce qui porte le nombre total à 138. Si l'on peut se réjouir de l'essor du marché européen du capteur thermique, il faut néanmoins constater que souvent les nouveaux modèles sont de qualité inférieure que par le passé. La publication des protocoles de mesures empêche, dans un certaine mesure, la diffusion de capteurs de moindre qualité. Plus de 1'200 exemplaires du catalogue des capteurs testés ont été vendus.
- Une étude particulière concernant 3 capteurs haute-température de constructions différentes a été effectuée. Un premier capteur "évacué" classique du type "CORNING-CORTEC" (aussi fabriqué en Suisse), un second, également "évacué", mais entièrement en verre et équipé d'un miroir CPC et un capteur plan avec isolation transparente faite avec des capillaires en verre, donnent respectivement une énergie utilisable annuelle, rapportée à la surface de l'absorbeur et à 100°C, de 634, 463 et 393 kWh/m². Rapportées à la surface brute, les énergies utilisables sont de 367, 407 et 314 kWh/m². Le rendement du capteur plan avec isolation transparente est remarquable, comparé à celui d'un capteur plan conventionnel.
- 6 capteurs à air ont été testés. Ils sont destinés à des installations de climatisation et de préchauffement de l'air. Leur rendement, comparé à celui d'un capteur à caloporteur liquide, reste relativement faible.
- Le rapport sur la **résistance aux intempéries des couvertures transparentes** sera disponible au début 1995. Les verres de qualité "solaire", qui étaient importés des Etats-Unis, sont dorénavant obtenables en Europe.
- Le rapport final du projet AIE concernant les **surfaces sélectives** a été publié. Vu le succès de ce travail, auquel la Suisse a activement participé, il est proposé de continuer les travaux dans le cadre d'un groupe de travail international (*Materials for Solar Thermal Collectors*). 6 projets de recherche sont en discussion. Un premier atelier a eu lieu en Suisse au début décembre.

- Les résultats obtenus sur des produits antigel du type polyglycoether sont prometteurs : ces derniers restent stables jusqu'à 200°C. A leur contact, seul le cuivre montre une certaine déperdition massique. L'effet de la faible chaleur massique sur le rendement du circuit des capteurs doit encore être analysé.
- Les stands d'essais "systèmes" ont été modifiés. Une climatisation des cabines abritant les chauffe-eau a dû être installée afin de maintenir la température interne indépendante des pertes des chauffe-eau. En 1995, un concours entre constructeurs sera organisé pour déterminer le système le plus performant.

Le projet **Absorbeur 2000** entrepris conjointement entre le Laboratoire de Rapperswil et l'Institut de Physique (IFP) de l'Université de Bâle a fait d'importants progrès [3]:

- L'appareil de mesure de l'efficacité de captage des ailettes, essentiel pour ce projet, devient un outil d'analyse général et est utilisé couramment par les constructeurs de capteurs pour l'analyse de leurs propres absorbeurs. Il en résulte une économie de matière et un gain de temps appréciables.
- Les nouveaux traitements de surface développés par le IFP donnent d'excellentes propriétés optiques, dont la stabilité long terme dépasse celle des procédés actuellement connus et utilisés. Il s'agit maintenant d'optimiser les détails de fabrication.
- Les premiers capteurs construits avec ces nouveaux absorbeurs sont en service dans 10 installations depuis 6 mois.

APPLICATIONS

La préétude concernant la possibilité d'un **stockage latent de chaleur de récupération dans un système industriel** a dû être définitivement interrompue. En effet les difficultés opérationnelles du système de rejet de chaleur se sont avérées insurmontables [4].

Lors d'une première saison de chauffage, les **systèmes de régulation prévisionnelle**, appliqués à deux installations solaires identiques (eau chaude et chauffage par sol) avaient amélioré les performances des installations de 12 et de 15 % par rapport à une régulation conventionnelle. Lors d'une seconde période de chauffage, ces économies ont été portées à 20 % dans les deux installations: l'algorithme de réglage a été simplifié et la surface de l'échangeur de chaleur a été augmentée. Rappelons que ce dispositif est basé sur des modèles stochastiques du rayonnement solaire et de la température extérieure. Il est à même de prendre en compte l'évolution aléatoire de ces grandeurs météorologiques et de réaliser, par ce biais, de substantielles économies d'énergie. Une étude est en cours en vue d'une fabrication industrielle d'un régulateur prévisionnel [5].

Le projet **Centrale électro-solaire alpine, CSIP2**, entrepris en commun par le Laboratoire d'Energie Industrielle, LENI, de l'EPFL et par le Laboratoire des systèmes énergétiques, LES de l'EPF-Zürich, basé sur la conception d'un cycle de Rankine à 2 étages, entre dans sa phase préopérationnelle. Un nouveau capteur (CEP2) a été réalisé et installé sur le site d'un paravalanche aux Diablerets, au lieu dit "La Dix". Une cabane abritant les instruments de mesure a également été installée sur le site. Les essais hivernaux concernant le système de dégivrage débuteront au début de l'année 1995. Le stand d'essais bi-étage est en cours de montage et les premiers essais auront lieu en 1995. Un rendement global de 65 % de la turbine scroll du cycle inférieur a été atteint [6].

Le complexe de 44 logements **SAILLON 1 MW Solaire** (62 m² de capteurs vitrés, 957 m² d'absorbeurs non vitrés, stock saisonnier en aquifère de 7'500 m³, appoint par chaudière au mazout, distribution par *CALOBUS sanitaire*) a été mis en service en avril 1994. Divers problèmes de fonctionnement et de régulation ont dû être résolus. Un fonctionnement satisfaisant du stock n'a pas pu être atteint avant fin juillet. Seule la moitié des appartements étant occupée, le premier bilan (26. 1. 94 - 5. 10. 94) est très incomplet et n'est pas représentatif. Il faut néanmoins constater que pour cette première période, l'apport solaire est moindre que prévu. Il est probable que le rendement des absorbeurs non vitrés, exposés au vent, souffre de la ventilation relativement forte

régnant dans cette région de la Vallée du Rhône. Toutefois, des puissances de 500 kW à 50°C ont été mesurées. La tête du stock est montée à plus de 50°C et le système de stabilisation du stock donne satisfaction. Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont encourageants. Cette installation a reçu un *Prix Solar '91* [7].

Les sheds d'une halle industrielle sont couverts de **panneaux photovoltaïques hybrides refroidis à l'air**. La surface de captage est égale à 500 m². L'air préchauffé sert à la ventilation de la halle 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. Les mesures faites sur l'installation s'étalent sur deux saisons complètes (92 / 93, 93 / 94). Le taux de couverture total (chaleur et électricité) est escompté à 70 %. Le dépouillement des mesures est en cours et les résultats devraient être publiés au début 1995 [8].

Comme lors de la saison 1992/93, l'**autonomie énergétique d'une fabrique de composants solaires** n'a pas été entièrement atteinte pendant la saison 1993 / 94. La production électrique des 512 m² de panneaux photovoltaïques, raccordés au réseau, a été de 49'067 kWh, soit 88,5 % de la consommation, alors que le taux de couverture de la saison précédente avait été de 92,5 %. La consommation électrique des ateliers représente 81,5 % de la consommation totale, le solde étant utilisé par une pompe à chaleur. Celle-ci couvre les besoins en eau chaude sanitaire et les 48,2 % des besoins de chauffage. Le COP annuel est de 3,2. Le solde des besoins de chauffage est couvert à 27,5 % par 84 m² de capteurs thermiques, à 13,1 % par une chaudière à bois et à 11,2 % par les excédents de chaleur de la maison solaire autonome voisine. Les pertes de stockage représentent 20,6 % des besoins de chaleur. Cette installation a également reçu un *Prix Solar '91* [9].

Une **procédure d'estimation de la performance annuelle d'un chauffe-eau solaire**, basée sur une courte période de mesures faites au moyen d'une instrumentation légère, a donné de bons résultats sur des installations de petite taille. Elle a été appliquée, à titre d'essai, sur une installation de 200 m² chauffant des accumulateurs d'une contenance totale de 4'000 litres. Les mesures ont couvert une saison complète. L'estimation de la production annuelle obtenue à partir des mesures d'un mois particulier a donné des résultats satisfaisants du point de vue numérique, quel que soit le mois choisi. Par contre, les valeurs des paramètres physiques du modèle décrivant l'installation variaient de mois en mois dans des proportions inacceptables. Cette ambiguïté a pu être levée en appliquant l'algorithme d'identification des paramètres séparément au circuit des capteurs et à l'accumulateur au moyen de modèles plus complets. Cette manière de faire résout bien le problème, mais au prix d'une instrumentation plus lourde. L'application de la méthode initiale, plus simple, doit donc rester réservée aux petites installations [10, 11].

La publication du rapport final concernant l'**enquête faite auprès de 1'300 propriétaires d'installations de séchage solaire du foin** a dû être reportée au début 1995. Les mesures faites sur 3 installations confirment les résultats du logiciel de dimensionnement dans le cas de toits en Eternit et en tôle. Dans le cas de toits de tuiles, les calculs théoriques sont trop optimistes [12].

La préétude théorique concernant une **installation de climatisation "tout solaire" d'un bâtiment administratif** a également pris du retard et le rapport final ne paraîtra qu'au début 1995. La simulation des installations est faite au moyen du logiciel américain TRNSYS [13].

Une maison familiale comportant 2 appartements a été équipée d'un **chauffage solaire avec stockage saisonnier**. La surface de captage est de 70 m², le stockage est réparti sur 2 cuves à eau d'un volume de 40 et 5 m³ (stock saisonnier et hebdomadaire). Le système de régulation a été conçu et réalisé au moyen d'automates programmables existants sur le marché. Une mise en service partielle a eu lieu en août 1993. Les travaux de construction se sont terminés en septembre 1994. Après les réglages initiaux, le fonctionnement de l'installation donne satisfaction. Le stock saisonnier était chargé fin août 1994 à 115°C. À cette température, sa charge est de 4'800 kWh et ses pertes de 16 kWh par jour. La stratégie de charge des accumulateurs a été simplifiée. Elle ne dépend plus que d'un régime d'été et d'hiver, et de l'état de charge momentané des stocks. Le suivi des mesures de la saison de chauffage 94 / 95 est en cours [14].

Le projet **GEOSER sert à l'étude du stockage journalier de la chaleur excédentaire d'une serre**. Trois serres identiques ont été construites. Dans l'une, la chaleur est récupérée par un échangeur air/eau et stockée dans une

cuve à eau. Dans une seconde, la chaleur est stockée en terre dans des conduites aménagées sous la serre. La troisième sert de témoin. La mise en service a eu lieu en novembre 1993. En 1994, 4 périodes de mesures ont été effectuées:

- La première a servi à comparer les consommations de chaleur sans stockage. Elles sont à peu près identiques à celles de la serre témoin, soit - 4,7 % pour le stockage en terre et + 3,8 % pour le stockage en cuve.
- Une culture de printemps avec systèmes de stockage en exploitation. Les économies d'énergie ont été de 14 et 17 %, respectivement pour la serre à stockage en terre et pour la serre à stockage en cuve.
- Une période sans culture, de courte durée, où on a laissé monter les températures à des valeurs extrêmes de l'ordre de 33°C.
- Une culture d'automne avec systèmes de stockage en exploitation. Les économies d'énergie ont été de 27 et 42 %, respectivement pour la serre à stockage en terre et pour la serre à stockage en cuve.

Si les économies d'énergie de chaleur sont intéressantes, les consommations d'électricité sont trop importantes. Les rapports entre chaleur économisée et électricité supplémentaire sont faibles: 4,3 pour le stockage en terre et seulement 2,0 pour le stockage en cuve. Un progrès certain doit encore être réalisé dans ce domaine. Les travaux de simulation sur TRNSYS ont commencé sur le système de stockage en cuve. La climatisation des serres n'a pas eu d'effet négatif sur les cultures et les résultats obtenus jusqu'à présent sont comparables [15].

Partant d'une installation de production de "froid solaire" au moyen d'une machine à absorption, réalisée en 1983, l'étude CLIMSOL fait le point sur cette technique. Un inventaire de 10 installations, dont 2 en Suisse, a été fait, suivi d'une étude détaillée de chaque installation. Les fonctionnements sont en général bons, mais les performances peuvent devenir très mauvaises dès que l'alimentation solaire devient irrégulière. Une seule firme offre des machines adaptées aux conditions solaires. Une revue des perspectives futures sera également esquissée. La publication du rapport final est prévue pour le début de l'année 1995 [16].

Une installation pilote de préchauffage d'eau chaude sanitaire au moyen d'absorbeurs sélectifs non couverts a été mise en service en mars 1994. Les absorbeurs, d'une surface totale de 77 m², sont posés avec une inclinaison de 5° sur un toit plat et alimentent un accumulateur de 2'500 litres. Le risque de surchauffe étant éliminé, il devient possible de simplifier notablement l'installation:

- pas d'isolation des conduites du circuit des absorbeurs;
- utilisation de matériaux plastiques en torche;
- utilisation de conduites à sertir;
- utilisation d'un plus petit vase d'expansion et élimination du vase tampon.

Tous les paramètres importants sont enregistrés toutes les heures et feront l'objet d'un rapport [17].

Une installation du type plancher solaire direct (voir photo de l'en-tête) a été réalisée au nouveau Centre d'entretien de la N5 à Boudry (NE) et mise en service en automne 1994. Elle est équipée de 102,5 m² d'absorbeurs sélectifs non couverts intégrés comme éléments de la façade sud-ouest du bâtiment atelier. Les absorbeurs, complétés par une isolation thermique arrière et un caisson, constituent les éléments de façade. En hiver, l'énergie solaire est directement injectée par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur dans la dalle du "plancher solaire direct". En été, l'énergie solaire contribue à la production d'eau chaude sanitaire. Une chaudière à bois de 230 kW sert d'appoint. Une série de mesures s'étalant sur 2 ans devrait permettre de:

- évaluer et analyser les performances du système,
- élaborer des règles de dimensionnement,
- valider un module de calcul TRNSYS,
- évaluer le prix de l'énergie produit de cette manière.

Ce projet bénéficie de la collaboration d'un entrepreneur général [18].

Le stockage de chaleur en nappe phréatique est le plus économique, mais aussi le plus risqué, si la nappe est instable. Par ailleurs, les boues de lavage de gravier constituent un rejet industriel difficilement recyclable. Ces

boues ont néanmoins la propriété d'une très faible perméabilité comme mise en évidence par le Laboratoire de Géologie de l'EPFL (GEOLEP).

Sur la base des résultats obtenus en laboratoire, l'idée de **confiner une nappe perméable par boues de lavage de gravier** méritait d'être testée par une expérience dans le terrain. Avec la collaboration d'une entreprise en génie civil, un essai fut entrepris dans une gravière disposant de boues de lavage. D'abord une fouille sous nappe à l'aide d'une pelle mécanique a été réalisée, en remplaçant en continu les alluvions extraits par de la boue. Aucun éboulement ne s'est produit et les parois sont restées en place. Le rôle de barrière hydraulique du massif de boues ainsi créé a pu être vérifié. Puis la tranchée, d'une profondeur de 5 m et d'un diamètre de 4 m, a été rebouchée au moyen de boues essorées. Après une période de séchage d'un mois, un puits a été creusé au centre, afin de mesurer les coefficients d'étanchéité. Des valeurs de l'ordre de 10^{-7} à 10^{-8} m/s ont été atteintes, soit des valeurs similaires à celles trouvées en laboratoire. Ces perméabilités relativement basses permettent d'envisager la poursuite des essais dans le cadre d'un projet pilote [19].

ETUDES, LOGISTIQUE

Le catalogue des tests de capteurs publié par le SPF/ITR (voir plus haut) donne aussi les coûts des capteurs. On peut en déduire le coût d'investissement spécifique par kWh solaire en définissant les conditions d'application. Une étude intitulée **Comparaison de capteurs solaires du marché suisse en 1993/1994** compare les divers capteurs au moyen du logiciel de dimensionnement POLYSUN et sur la base de l'énergie utilisable annuelle (*Bruttowärmeertrag*). Parmi les diverses conclusions, l'utilisation d'absorbeurs non couverts est particulièrement intéressante pour des applications à basse température ($\leq 40^\circ\text{C}$) [20].

3. Collaboration nationale et internationale

Le projet **Absorber 2000** s'effectue en collaboration du programme de recherche **Chimie solaire** avec l'Institut de Physique de l'Université de Bâle et 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 & Cooling Programme*) reste très active:

- le projet **Mesures spectrales du rayonnement solaire** est terminé [1];
- le projet **Advanced Solar Energy Systems** se terminera en 1995;
- le nouveau projet **Advanced Glazing & Associated Materials for Solar and Building Applications** a démarré en 1994;
- un groupe de travail international s'est constitué pour l'étude de **nouveaux matériaux pour capteurs solaires thermiques** (*Materials for Solar Thermal Collectors*).

4. Transfert à la pratique

Un séminaire de 2 jours a été organisé à l'EPFZ, les 21-22 novembre avec pour thème *Thermische Solarenergienutzung in Gebäuden*.

Dans le cadre du programme d'action **PACER**, dix cours de deux jours avec un total de 184 participants ont été organisés en 1994 sur le thème "Les installations solaires actives - réalisation, mise en service et entretien". Le

film vidéo "Les installations solaires thermiques" a eu un vif succès : 931 exemplaires en allemand, 857 en français et 20 en italien ont été vendus.

Dans le cadre du programme d'action **Energie solaire thermique**, 9 projets dits "Pilote et Démonstration" ont été sélectionnés. Les installations bénéficiant d'un subside de Fr. 270.-- par m² de capteur ont été au nombre de 297. Elles totalisent une surface de captage de 10'013 m². Ces derniers chiffres représentent le cumul de toutes les installations depuis le début de ce programme.

Près de 50 chauffe-eau solaires "SOLKIT" ont été installés dans le cadre de la campagne de promotion ENERGIE 2000. Vingt unités font l'objet d'un suivi de mesures [21].

5. Perspectives 1995

En 1995, trois cours PACER "installations solaires" seront organisés, un en Suisse romande et deux au Tessin.

Le programme "Solaire thermique et stockage de chaleur 1992-1995" arrivera à terme. Un nouveau programme quadriennal 1996-1999 est en préparation.

Le séminaire CISBAT 1995 organisé par l'EPFL, les 12-13 octobre 1995 sera consacré pour l'essentiel au Solaire thermique et au Stockage de chaleur.

6. Liste des projets

- [1] P. Ineichen, GAP / UNI - Genève : *Coordination suisse de la Tâche 17 du Programme SH&C de l'AIE*. (RF)
- [2] U. Frei, SPF / IT - Rapperswil : *Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Solaranlagen*. (RA)
- [3] U. Frei, SPF / IT - Rapperswil : *Absorber 2000*. (RA)
- [4] F. Righetti, INTERTECNIC, Vevey : *Stockage latent intégré dans un système industriel*. (RF)
- [5] M. Bauer, Y. Oestreicher, EAUG / CUEPE, Genève : *Régulation prévisionnelle appliquée à une installation solaire active*. (RF)
- [6] Y. Allani, LENI / EPF - Lausanne + LES / ETH - Zürich: *Mini-centrale électro-thermosolaire CSIP2*. (RA)
- [7] J.-Ch. Hadorn, ENERGIE SOLAIRE, Sierre, & BSI, Lausanne : *SAILLON 1 MW solaire*. (RA)
- [8] P. Berchtold, ARGE ATLANTIS ENERGIE / P. BERCHTOLD, Sarnen : *Fabrikgebäude mit einem hohen solaren elektro-thermischen Deckungsgrad*. (RA)
- [9] P. Stähli, ETS - Berthoud : *Energiemessung an Solarwerkstatt Jenni*. (RF)
- [10] B. Lachal, CUEPE, Genève : *Application d'une procédure de test à un système solaire de préchauffage de l'ECS de grande taille : SPIRKL - CGO*. (RA)
- [11] D. Cabrera, B. Lachal, CUEPE, Genève : *Dynamic system test methodology applied to a large in-situ solar domestic hot water system (IEA SHC # 14)*. (RF)
- [12] K. Egger, INFOENERGIE - Tänikon : *Sonnenkollektoren für die Heubelüftung - Erfolgskontrolle*. (RA)

- [13] O. Berchtold, Ch. Filleux, BASLER & HOFMANN, Zürich : *Ganzjährige Nutzung der Solarenergie in Bürogebäuden*. (RA)
- [14] U. Frei, SPF / IT - Rapperswil : *Regelstrategie einer Saisonspeicheranlage*. (RA)
- [15] A. Reist, RAC Changins, Conthey : *GEOSER, stockage souterrain temporaire de chaleur pour serres*. (RA)
- [16] 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)
- [17] L. KELLER, Ch. FREUDIGER, Lavigny & C.-A. MACHEREL, P.-H. HEIZMANN, Le Lignon : *Capteurs sélectifs non vitrés dans une installation de préchauffage de l'eau chaude sanitaire*. (RA)
- [18] M. Kernen, PLANAIR, La Sagne : *PSD CEB Plancher solaire direct CE Boudry / NE*. (RA)
- [19] G. de los Cobos, A. Parriaux, GEOLEP / EPF - Lausanne & J. Wilhelm, C. ZSCHOKKE, Renens : *Confinement d'une nappe perméable par boues de lavage de gravier*. (RA)
- [20] B. Saugy, BSI, Lausanne : *Comparaison de capteurs solaires du marché suisse en 1993/1994*. (RF)
- [21] U. Frei, SPF / IT - Rapperswil : *SOLKIT, 20 Versuchsanlagen*. (RA)

(RA) rapport annuel 1994 disponible

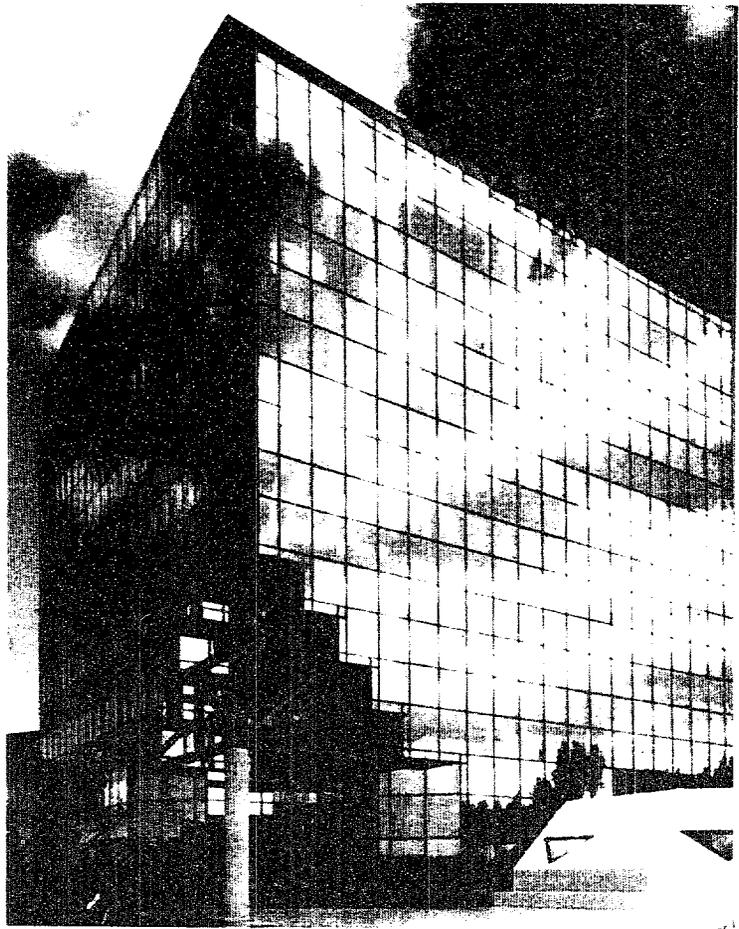
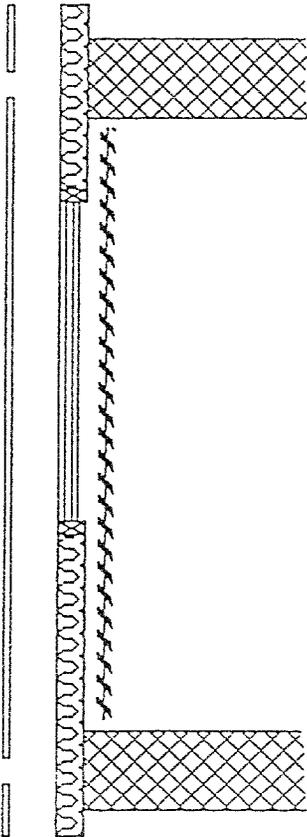
(RF) rapport final disponible

SOLARARCHITEKTUR

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : S. Robert Hastings



Doppelwandfassaden beim Bussigny Business Center

Diese Doppelhautkonstruktion bietet vielfältige architektonische Gestaltungsmöglichkeiten und übernimmt Funktionen wie thermische Isolation und Schallschutz. Sie lässt sich bei Neubauten wie bei Sanierungen einsetzen.

1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1994

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. Solargewinn und interne Lasten werden so genutzt, dass der Verbrauch von nicht-erneuerbarer Energie extrem tief gehalten wird. Form des Gebäudes, Verhältnis von transparenten zu opaken Elementen, Zonierung und thermische Masse werden so gestaltet, dass die Wärmeverluste gering werden. Aufgabe des Forschungsprogrammes "Solararchitektur" ist es, die Erarbeitung neuer Konzepte, die Entwicklung von Prototypen 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.

ZIELE FÜR 1994

- Beschaffung von Daten über die Eigenschaften auf dem Markt erhältlicher Komponenten als Entscheidungsgrundlage für Planer;
- Auswertung von Systemen mittels Messkampagnen an Gebäuden (koordiniert mit P+D);
- Sensitivitätsstudien mittels Einsatz von Computermodellen (z. B. Hypokausten, PCM, TWD);
- Transfer der Erfahrungen aus internationaler Zusammenarbeit in IEA Projekten: *Advanced Solar Low Energy Buildings* [13], *Advanced Glazing Material for Solar Applications* [18], *Solar Air Systems* [19], *Solar Energy in Building Renovation* [29], und *Daylight in Buildings* [21];
- Fertigstellung von *PC-Tools* und Einführung in Praxis und Lehrbetrieb;
- Gestaltung von Workshops für Praxis bzw. Forscher z.B.: TRNSYS und Hypokausten (Feb.), EU-Solar-tagung (Nov.);
- Planmässiger Abschluss einiger Projekte und Einengen der Bandbreite des Forschungsprogramms gemäss Vorschlägen der Begleitgruppe.

2. 1994 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

MATERIALIEN UND KOMPONENTEN

Im Projekt *Optische und thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien* (Glasdatenbank GLAD-PC) [1] soll für die Schweiz ein Standard PC-Programm erstellt werden zur Berechnung von Wärmedurchgang und Gesamtenergiedurchlassgrad hochwärmedämmender Gläser und Fenster. In diesem Jahr wurde in Zusammenarbeit mit der Industrie die Datenerhebung fortgesetzt, die Datenbanksoftware ausgewählt, und es wurden Rechenroutinen erstellt.

Ein Teil der in der Vorstudie *Untersuchungsmethoden für neue Gläser und transparente Materialien* (abgeschlossen 1993) festgestellten Lücken bei den Untersuchungsmethoden für transparente Materialien soll im IEA - Projekt *Rechenmodelle, Mess- und Prüfverfahren für transparente Bauteile* [2] gefüllt werden. Es wurde damit begonnen, einen Prüfstand für Bewitterungsprüfungen von TWD-Materialien auszurüsten und es wurden Messungen an Abstandhaltern in Fenstern durchgeführt.

Im Projekt *Prototype de vitrage isolant évacué* [3] wurden verschiedene Materialien auf ihre Eignung zur Gasdichtung untersucht, wobei vor allem die Langzeitstabilität im Vordergrund stand.

Zum Thema *Gebäude mit transparenter Isolation - Optimierung des Überhitzungsschutzes* [4] konnten Muster thermotroper Materialien sowie Zylindergläser untersucht werden. Weiter wurden Muster modularer

Lamellenelemente mit einem Verhältnis Lamellenbreite zu Abstand von 1:2 sowie einachsige drehbare Lamellen geprüft. Eine Kosten-Nutzen-Analyse ergab, dass der Verkaufspreis für eine fixe Lamellenbeschattung unter 100.- Fr/m² liegen muss. Der Schlussbericht ist für Anfang 1995 vorgesehen.

Vom Projekt *Façade double-peau - Zusammenhang zwischen der Typologie von Doppelwand-Fassaden und ihrem energetischen und bauphysikalischen Verhalten* [5] wurde der erste Teil der Arbeiten - Zusammenstellung einer Typologie - abgeschlossen und veröffentlicht (vgl. *Titelbild*). Mit der Modellierung für Simulationsrechnungen wurde begonnen.

Im Projekt *Denkraum* [6] geht es um eine Fassade, in der Sonnenschutz, Lichtlenk- und PV-Elemente zusammenwirken. Am LESO bei der ETH-Lausanne wurde ein Prototyp dieser Fassade montiert. Mit energetischen und komfortmässigen Messungen wurde begonnen, obwohl dem Prototyp noch einige Funktionsmängel anhaften.

Unter dem Projekttitel *Verbesserte Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung mit Hilfe von teiltransparenten Latentwärmespeichern* [7] wurde eine lichtteildurchlässige und wärmespeichernde Aussenwand untersucht. In Glasbehältern abgefülltes, teiltransparentes Salzhydrat absorbiert das Sonnenlicht, schmilzt und speichert die Wärme. Lade- und Entladevorgang laufen rein passiv. Die Vorgänge Absorption und Schmelzen wurden mathematisch-physikalisch modelliert und für numerische Simulationsrechnungen wurde ein Programm erstellt und validiert. Durchgeführte Simulationsrechnungen zeigten, dass Wärme- und Lichtgewinne interessante Werte erreichen.

Die Arbeiten über *Aspekte des Bauens mit Lehm in der Schweiz* [8] wurden abgeschlossen. Es liegt ein Inventar mit 51 Lehmbauten aus der Schweiz vor, worin jedes Gebäude kurz beschrieben ist. Bezüglich Dauerhaftigkeit wurde festgestellt, dass Lehmbauten bei sachgemässer Ausführung Bauten aus andern Materialien ebenbürtig sind. Weiter wurden bauphysikalische und materialtechnische Kennwerte zum Wärmeschutz und Feuchteverhalten ermittelt. In diesen Belangen schneidet Lehm gut ab. Ein Kataster der zum Bauen geeigneten Lehmvorkommen, eine Energie- und Schadstoffbilanz und Regeln zum Bauen mit Lehm runden die Arbeit ab. Die Erkenntnisse aus dem Projekt wurden an einer Lehmbautagung und durch eine Wanderausstellung in die Öffentlichkeit getragen.

SYSTEME UND GEBÄUDE

Die erste Phase des Auftrages *Optimierung der Luftkollektoren mit Latentspeicher in Schüpfen* [9] ist auf Jahresende abgeschlossen worden. Es werden vier Varianten vorgeschlagen, wovon bei der ersten die Warmluft aus dem Kollektor aufgeteilt wird für die Aufladung des Latentspeichers und zur Wassererwärmung. Genutzt werden drei der ursprünglich vier Teilspeicher. Entladen wird passiv. Der zweite Vorschlag sieht eine aktive Entladung des Latentspeichers vor, wobei nur noch zwei Teilstücke genutzt würden. Vorschlag drei brächte eine Erhöhung der Kapazität des Latentspeichers unter Beibehaltung aller drei Teilspeicher mit teilweise aktiver Entladung. Vorschlag vier ist eine Minimalvariante die auf die weitere Nutzung des Latentspeichers verzichtet und sich beschränkt auf die Erwärmung des Wasserspeichers.

Wegen Verzögerungen in der Fertigstellung der Baute konnte die Messeinrichtung für das Projekt *Solare Luftvorwärmung in Atrien* [10] erst im Laufe dieses Jahres fertig eingerichtet werden und im Herbst 1994 wurde mit den Messungen begonnen. Ziel der Arbeiten ist es, die Wirksamkeit der Luftvorwärmung zu bestimmen. Die Auswertung einer 14-tägigen Messphase im Monat Oktober zeigte, dass in dieser Periode 16% des Lüftungswärmebedarfs aus dem Atrium bezogen werden konnte.

Beim IEA-Projekt *Solar Air Heating for Buildings* [11] sind die Startschwierigkeiten, die internationalen Projekten anhaften, überwunden. Mit der Dokumentation mehrerer Gebäude mit unterschiedlichen Systemen aus verschiedenen Klimaregionen wurde begonnen.

Die Arbeiten am Messprojekt *Solarhaus Bühler, Lausen* [12] sind abgeschlossen und der Schlussbericht ist in Arbeit. Es wurde eine Energiekennzahl Wärme von 175 MJ/m²a ermittelt. Merkmal dieses Hauses ist das

Konvektivsystem mit Fensterkollektor und Hypokaustenspeicher. Bemerkenswert ist die Feststellung, dass der Anteil des Direktgewinnes am ganzen Solargewinn sehr hoch ist. Für den Ventilator des Konvektivsystems wurden während der Heizperiode nur 465 Betriebsstunden registriert, in diesem Betriebszustand wurden 24% der eingestrahelten Energie durch Direktgewinn und 33% über das Konvektivsystem aufgenommen.

Im Messprojekt **EFH Gwadt, St. Gallenkappel** [13] ist die Messphase abgeschlossen. Die durchgeführten Auswertungen ergaben eine Energiekennzahl Heizung von 163 MJ/m²a, dies liegt bei etwa der Hälfte des SIA-Zielwertes. Komfortmässig wurden im Wohnzimmer in Bodennähe zu tiefe Temperaturen festgestellt.

Für das Messprojekt **Direktgewinnhaus Trin** [14] wurde das Messkonzept erarbeitet und die ersten Probenmessungen sind durchgeführt. Die Hauptarbeiten sind für 1995 vorgesehen.

Für das Projekt **Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil** [15] wurden lediglich Vorbereitungsarbeiten durchgeführt, weil die Messungen, welche für die Eichung des Rechenmodells gebraucht werden, noch nicht abgeschlossen sind.

PLANUNGSHILFSMITTEL

Die Parameterstudien zum Thema **Tageslicht** [16] wurden abgeschlossen. Zuerst ging es um die Verknüpfung eines Tageslichtprogrammes mit einem Energieprogramm. Darauf wurden für verschiedene Bürobauten mit unterschiedlichen Beleuchtungsstrategien und Tageslichtanteilen die Auswirkungen auf den Elektrizitätsverbrauch ermittelt. Die Fallstudien werden noch in einer Broschüre mit viel Grafik dargestellt und soll in der 1. Hälfte 1995 erscheinen. Die wichtigste Aussage der Untersuchung ist die, dass mit einer ganzen oder teilweisen automatischen Steuerung des Lichtes Elektrizität eingespart wird. Das 1994 gestartete Folgeprojekt **Tageslichtnutzung in an Atrien grenzenden Räumen** [16] hat zum Ziel, Faustregeln aufzustellen um den Einfluss verschiedener Atrien auf das Tageslichtniveau in angrenzenden Räumen und den jährlichen Energieverbrauch bestimmen zu können.

Die Arbeiten **Éclairage naturel à Genève: modèles et mesures** [17] wurden abgeschlossen. Neben den Messungen wurden verschiedene Modelle zur Bestimmung der Lichtausbeute überprüft. Es zeigte sich, dass die Luftverschmutzung in Bodennähe einen grossen Einfluss hat. Durch Berücksichtigung dieser Verunreinigung wurde eine bessere Übereinstimmung zwischen Modellwerten und Messwerten erzielt. Auch die Modelle zur Berechnung der Helligkeitsverteilung wurden überprüft. Das Modell von Perez ergab die besten Resultate.

Abgeschlossen wurde das Projekt **Interne Lasten für den Solarplaner** [18]. Es zeigte sich, dass die Menge der anfallenden internen Wärme stark von der Nutzungsart eines Büros abhängt. Weiter wurde festgestellt, dass unabhängig von Tages- und Jahreszeit oder Einstrahlung die Arbeitsplätze erstaunlich häufig durch Storen beschattet sind. Der Schlussbericht wird anfangs 1995 erscheinen.

Mit dem Projekt **Auslegung von Hypokaustenspeicher** [19] sollen Grundlagen zur thermischen und hydraulischen Dimensionierung von Hypokaustensystemen erarbeitet werden. Nachdem das Projekt **Entwicklung eines Rechenmodells für Hypokaustenspeicher und dessen Einbau in das Simulationsprogramm TRNSYS** [20] abgeschlossen ist und ein Workshop durchgeführt wurde, sollen nun Planungsunterlagen für Systeme in Form von Nomogrammen erarbeitet werden. Diese sind zur Zeit in Arbeit.

Im Rahmen des Projektes **Modélisation de grands espaces vitrés** [21] wurden drei Modelle auf ihre Eignung zur Berechnung einer vereinfachten Temperaturschichtung getestet. Mit TRNSYS - Mehrzonenmodell (Typ 56) wurden die Atrien der Universitäten Neuenburg und Trondheim durchgerechnet. Dieses Vorgehen erwies sich als zu empfindlich auf die Art der Zerlegung des Grossraumes in Schichten und ist daher ungeeignet für Planungen. In der Folge wurden die Verteilung der Solargewinne durch Berücksichtigung des Eindringens der Sonne in den Raum verändert. Dieses Vorgehen erwies sich als angepasster als die erste Variante. Die dritte Variante, ein Programm auf der Basis der Knotenauflösung brachte dann eine befriedigende Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung. Obwohl sie schwieriger zu Handhaben ist als die TRNSYS-Methode, wurde sie für die Berechnung des Energiebedarfs benutzt. Die erste Phase des Projektes ist abgeschlossen; der Schlussbericht wird in der ersten Hälfte 1995 erscheinen.

Das Programm DIAS 1.0 wurde im Sommer in französischer und im Herbst in deutscher Sprache für den Vertrieb freigegeben. Es ist das Resultat aus dem Projekt *Banque de données interactive d'architecture solaire DIAS* [22] und wurde im Lauf von 4 Jahren erstellt. Zur Zeit laufen die Arbeiten für DIAS 2.0, die Freigabe ist vorgesehen für Sommer 1995. Diese Ausgabe wird vor allem mehr Beispiele enthalten.

Das Expertensystem ISOLDE [23] zur Sonnenenergienutzung in Geschäftshäusern, das auf den Erkenntnissen eines IEA Projektes basiert, soll den Planer von energiesparenden Bauten in der Entwurfsphase, sowie bei Grob- und Feinanalyse unterstützen. Das Programm liegt als DOS/ *Cristal-Version* und als *Windows / Knowledge Pro-Version* vor. An beiden Versionen wurden im abgelaufenen Jahr kleinere Verbesserungen vorgenommen. ISOLDE hat den Entwicklungsstand eines einsetzbaren Prototyps erreicht. Das Programm wird durch die dänische Koordinationsstelle dieser IEA-Aktivität vertrieben werden.

Am Programm LESOSAI 4.0 [24] wurden verschiedene Verbesserungen vorgenommen. Der Berechnungsblock wurde als eigenständiger Modul ausgelegt, sodass er auch von andern Programmen aufgerufen werden kann. Die Bedienungsebene wurde benutzerfreundlicher gestaltet. Die Verwaltung der Daten von Klima und Gläsern wurde überarbeitet, der Benutzer kann seine eigenen Datenfiles eingeben. Neu entwickelt wurde ein Modul zur Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeit des errechneten Energiebedarfs.

Die Tätigkeiten für **Nutzung der Sonnenenergie bei Gebäudesanierungsmassnahmen** [25] sind angelaufen. Es handelt sich darum, einige der in einem Vorgängerprojekt festgestellten offenen Fragen zu klären, welche in der Broschüre "Nutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen - Eine Standortbestimmung" (erschienen April 1994) dargestellt sind. Zum Projekt gehört als Teilaufgabe auch die Vertretung der Schweiz im IEA-Projekt *Solar Energy in Building Renovation*.

Der Titel **Verglasung von Balkonen als solare Sanierungsmassnahme** [26] steht neu für das Projekt **Kosten-Nutzen-Analyse solarer Gebäudesanierungstechniken**. Ziel dieser Studie ist es, die Auswirkungen nachträglicher Verglasungen eines Balkons auf Energieverbrauch, Komfort und Kosten zu ermitteln. Grosses Gewicht liegt auf der Quantifizierung des Einfluss des Benutzerverhaltens mittels Simulationsrechnungen. Die Ergebnisse werden in der ersten Hälfte 1995 veröffentlicht werden.

Im Projekt **Nutzung der Sonnenenergie bei Sanierung des ZITL** [27] wurden mittels Simulationsrechnungen Variantenstudien verschiedener Sanierungsansätze durchgeführt, nämlich Ersatz der bestehenden Verglasung, Nachisolierung verschiedener Bauteile und Doppelwandfassade. Für die Doppelwandfassade wurde eine breite Parameterstudie durchgeführt zur Optimierung von u.a. Fassadentiefe, vertikaler Ausdehnung einer Zone und Lüftungsstrategien. Wichtige Erkenntnisse daraus sind: - Der Abstand zwischen bestehender Fassade und Glashaut im Bereich von 30 bis 120 cm hat nur geringen Einfluss auf die Überhitzungsproblematik in den dahinterliegenden Unterrichtsräumen; - ein Doppelwand-Fassadenabschnitt darf sich höchstens über zwei Stockwerke erstrecken (Überhitzung); - die für die äussere Haut eingesetzte bessere Glasqualität reduziert den Jahreswärmebedarf nur geringfügig, erhöht jedoch die sommerliche Überhitzungsgefahr; wohingegen der Ersatz der innern, bestehenden Fenster durch besser isolierende diese nur geringfügig beeinflusst. Der höherer Absorptionskoeffizient der Fassade bei vorgesetzter Glashaut verbessert deutlich die Wärmeeinsparung. Auch auf der Nordseite sind mit einer Doppelhaut Einsparungen möglich.

Im Projekt **Bauliche und architektonische Integration von transparenter Wärmedämmung (TWD) an bestehenden Gebäuden** [28] wurde ein geeignetes Objekt gefunden, woran verschiedene Sanierungsvarianten studiert werden können. An einem andern Sanierungsobjekt haben Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ergeben, dass die Elementkosten für TWD auf 500 Fr/m² gesenkt werden müssen, damit annehmbare Wärmepreise resultieren.

Im Projekt **Weiterentwicklung des dynamischen Gebäude-Simulationsprogrammes SUNCODE** [29] wurde eine benutzerfreundliche Bedienungsoberfläche erstellt und einige Einschränkungen des Modells wurden analysiert. An dieser Überarbeitung beteiligten sich das *US National Renewable Energy Lab.*, die *Colorado State University* und die Solararchitekturgruppe an der ETH.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

NATIONAL:

- Begleitgruppe des Öko-Bau Programmes von DIANE (BEW);
- Eidg. Kommission zur Förderung der Nutzung von Sonnenenergie (KNS).

INTERNATIONAL:

- Archiv-Fachzeitschrift *Energy and Buildings*: Mitglied des *Editorial Review Board*;
- 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 u. 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 Diplomwahlfach "Bauen und Sonnenenergienutzung" wurde im Jahr 1994 durch den Programmleiter weiterhin gelesen. Im Durchschnitt war die wöchentliche je einstündige Vorlesungen von etwa 80 Studenten und einzelnen in der Praxis tätigen Architekten besucht. 12 Studenten haben eine Diplomwahlfacharbeit abgegeben und die Prüfung bestanden. Die slowakische Studentin, die 1993 ihr Nachdiplomstudium aufnahm, wurde weiterhin betreut.

Das jährlich zweimal erscheinende Bulletin SOLARARCHITEKTUR informierte mehr als 1700 Abonnenten über Neues im Sektor Solararchitektur sowie Neuerscheinungen von Publikationen und Tagungsankündigungen.

Es wurden drei Veranstaltungen durchgeführt:

- Ein zweitägiger Workshop für Spezialisten auf dem Gebiet Hypokausten;
- Eine Tagung über transparente Wärmedämmung (zusammen mit der EMPA und der Firma SCHWEIZER);
- Ein EU-Seminar Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden mit ca. 90 Teilnehmern und 15 Referenten.

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

- Am TWD-Haus in Ormalingen ist eine erweiterte Erfolgskontrolle im Gang;
- Stahlager KÄGL, Erfolgskontrolle im Gang, vorgesehen bis Mitte 95.

5. Bewertung 1994

Das Forschungsprogramm umfasste ein breites Spektrum von Tätigkeiten. Einige dieser Projekte konnten 1994 abgeschlossen werden, sodass 1995 die angestrebte Einengung der Themenbreite problemlos realisierbar wird.

Die Arbeiten zur Modellierung des physikalischen Verhaltens teiltransparenter Latentspeicher wurden abgeschlossen. Ein Rechenmodell steht zur Verfügung [4]. Ein Überhitzungsschutz für transparente Isolation auf

der Basis von Metall-Lamellenblechen wurde optimiert. Die Herstellkosten konnten gesenkt werden [7]. Ebenfalls abgeschlossen wurde eine Studie über Lehm- und Holzbau [8].

Im Teilgebiet **Systeme und Gebäude** konnten die Messungen an zwei Objekten abgeschlossen werden [12, 13] und an einem weiteren interessanten Direktgewinnhaus wurde eine Messkampagne gestartet [14].

Auch bei der Bereitstellung von **Planungshilfsmitteln** sind erfolgreiche Abschlüsse zu verzeichnen, nämlich die Strahlungsmessungen in Genf, das instruktive Programm DIAS, das recht gut aufgenommen wurde sowie die Berechnungsalgorithmen für Hypokaustenspeicher [17, 20, 22].

Von der **internationalen Zusammenarbeit** konnte profitiert werden im Sektor Niedrigenergiehäuser, im Bereich transparenter Baumaterialien sowie auf dem Gebiet Gebäudesanierung.

6. Ausblick 1995

Erarbeitung eines Forschungskonzeptes für die Jahre 1996 bis 1999 mit folgenden drei Schwerpunkten:

Direkte Sonnenenergienutzung durch Fenster als Wärme oder Tageslichtquelle: Der Energieertrag durch Fenster soll hinsichtlich Tageslicht, Passiv-Solargewinn und Wärmedämmung optimiert werden. Die Auswirkung von Fenstern mit immer tieferen k-Werten, von geringeren internen Lasten, geregelter Beleuchtung und Tageslichtnutzung auf den Heizenergiebedarf sind zu untersuchen.

Solare Luftsysteme: Die nächste Generation von Gebäuden mit tiefem Energieverbrauch benötigt mechanische Lüftung. Mit dem gleichen System sollen die Möglichkeiten der solaren Luftvorwärmung genutzt werden. Um das Potential ausschöpfen zu können, muss die Sensitivität auf Konstruktionsänderungen sowie Regelung und Benutzerverhalten untersucht werden.

Gesamtkonzepte für Solarhäuser mit sehr niedrigem Energiebedarf: Das Gebäude soll als Gesamtsystem betrachtet werden und energiemässig unter Berücksichtigung von Architektur, Kosten und Komfort optimiert sein.

In allen Bereichen sind Messkampagnen von Pilotanlagen, Sensitivitätsstudien mittels dynamischen Simulationsmodellen und das Erarbeiten von Planungshilfsmitteln aus den Forschungsergebnissen vorgesehen.

Zwei schweizerische Veranstaltungen sind für 1995 geplant:

- Workshop *Prüfverfahren für Komponenten von Solarluftsystemen* in Rapperswil;
- Seminar *Intensive Nutzung von Tageslicht durch architektonische Massnahmen* an der ETH.

Die Mandatsfrist der ersten Begleitgruppe ist abgelaufen, im Jahr 1995 wird die Gruppe neu zusammengestellt.

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: *Rechenmodelle, Mess- und Prüfverfahren für transparente Bauteile. (IEA-SHC # 13)* (JB)
- [3] B. Nydegger, Morges: *Prototype de vitrage isolant évacué.* (JB)

- [4] P. Schneiter, ERNST SCHWEIZER, *Hedingen : Gebäude mit transparenter Isolation, Optimierung des Ueberhitzungsschutzes.* (JB)
- [5] A. Faist, LESO / EPF - *Lausanne : Façade double-peau.* (JB)
- [6] A. Faist, LESO / EPF - *Lausanne : Denkraum.* (JB)
- [7] H. Manz, KWH / EMPA, *Dübendorf : Verbesserte passive Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung mit Hilfe von teiltransparenten Latentwärmespeichern.* (SB, ENET-Nr. 9200671)
- [8] H. Hugli, IHB / ETH - *Zürich: Aspekte des Bauens mit Lehm in der Schweiz.* (JB) (SB, ENET-Nr. 9107580)
- [9] G. Zweifel, EMPA, *Dübendorf : Luftkollektoranlage und Latentspeicher in Schülpen.* (JB)
- [10] Hp. Eicher, EICHER+PAULI, *Liestal : Solare Luftvorwärmung in Atrien.* (JB)
- [11] C. Filleux, BASLER & HOFMANN, *Zürich : Solar Air Systems for Buildings (IEA / SHC # 19).* (JB)
- [12] M. BLATTER, *Reinach : Messprojekt Solarhaus Bühler.* (SB)
- [13] D. Brühwiler, DB INFORMATIK/ENERGIETECHNIK, *Volketswil : Messprojekt EFH Gwadt, St. Gallenkappel.* (JB)
- [14] W. Hässig, BASLER & HOFMANN, *Zürich : Messprojekt Direktgewinnhaus Trin.* (JB)
- [15] G. Zweifel, EMPA, *Dübendorf : Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil.* (JB)
- [16] N. Hopkirk, EMPA, *Dübendorf : Tageslicht; Tageslichtnutzung in an Atrien grenzenden Räumen.* (JB)
- [17] O. Guisan, CUEPE, *Conches : Eclairage naturel à Genève, modèles et mesures.* (JB + SB)
- [18] R. Ruch, DR. EICHER + PAULI, *Liestal : Interne Lasten in Nichtwohngebäuden: Grundlagen für den Solarplaner.* (JB)
- [19] K. FORT, *Volketswil : Auslegung von Hypokaustenspeichern.* (JB)
- [20] K. FORT, *Volketswil : Rechenmodell für Hypokaustenspeicher.* (SB, ENET-Nr. 9400821)
- [21] D. Aiulfi, SORANE, *Lausanne : Modellentwicklung für grosse Atrien.* (JB)
- [22] W. Weber, CUEPE, *Conches : Ban que de données interactive d'architecture solaire DIAS.* (JB)
- [23] N. Morel, LESO / EPF - *Lausanne: ISOLDE* (JB)
- [24] A. Faist, LESO / EPF - *Lausanne: LESOSAI 4.0* (JB)
- [25] A. Haller, E. SCHWEIZER, *Hedingen : Nutzung der Sonnenenergie bei Gebäudesanierungen.* (JB)
- [26] P. Case, EN-SOLAR, *Oberdiessbach : Verglasung von Balkonen als solare Sanierungsmassnahme.* (JB)
- [27] M.G. Trawnika, ZTL - *Horw : Nutzung der Sonnenenergie bei Sanierung des Zentralschweizerischen Technikums Luzern.* (JB)
- [28] B. Züsli, METRON, *Brugg : Bauliche und architektonische Integration von transparenter Wärmedämmung (TWD) an bestehenden Gebäuden.* (JB)
- [29] P. Steinemann, SA / ETH - *Zürich : Weiterentwicklung des Gebäudesimulationsprogrammes SUNCODE / Serires.* (JB)

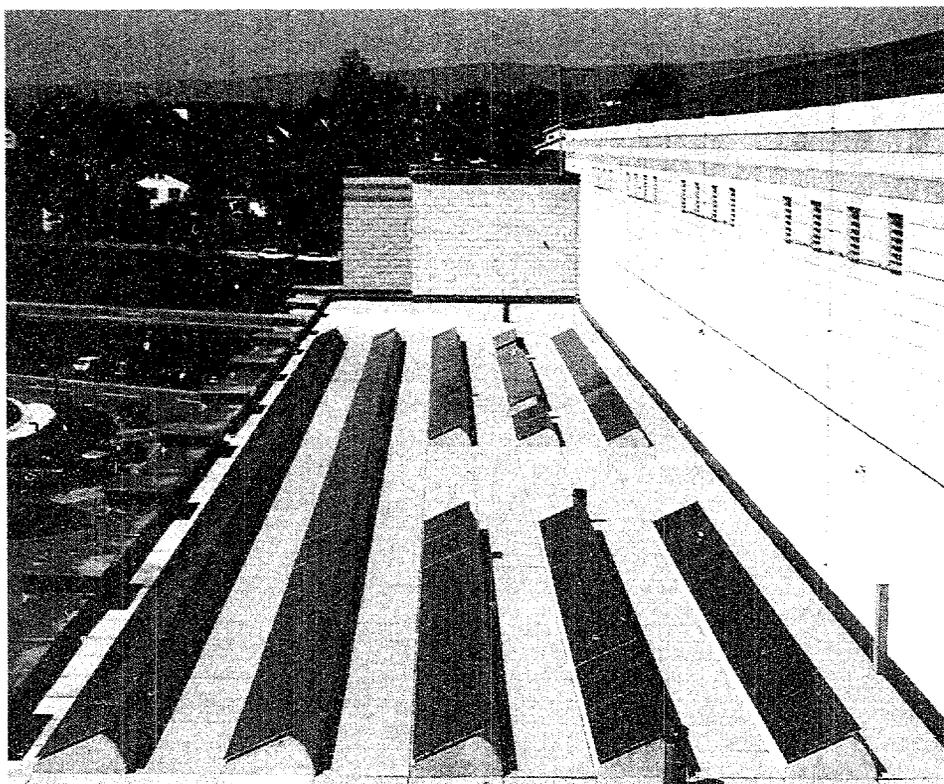
(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

PHOTOVOLTAİK

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Stefan Nowak



Photovoltaik-Gebäudeintegration

In der 5.2 kW Netzverbund-Anlage, auf einem Gebäude der ETH-Lausanne, wurden die Flachdach-Solarzellenelemente SOFREL anstelle handelsüblicher Betonplatten eingesetzt und auf einfache Weise verkabelt. (Konzept: PMS ENERGIE & LESO-EPFL)

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1994

Das Programm "Photovoltaik" verfolgte in der Berichtsperiode die wesentlichen Elemente der früheren Jahre weiter. Dabei wurde jedoch in verstärktem Mass auf die Umsetzbarkeit der Arbeiten geachtet. Ziel war zudem, die Koordinationstätigkeit mit anderen nationalen und internationalen Förderstellen zu intensivieren. Das Programm umfasst folgende Elemente:

Zellen: Schwerpunktmässig werden Dünnschicht-Siliziumzellen verfolgt. Daneben werden aber auch dünne kristalline Zellen und weitere, zum Teil neue Zelltechnologien bearbeitet.

Module: Die Entwicklung von Photovoltaikmodulen wird für neue Anwendungen auf dem Flachdach, in Fassadensystemen und im Überkopfbereich vorangetrieben.

Wechselrichter: Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf das Gebiet des Modulwechselrichters. Eine grössere Wechselrichterprüfstelle konnte in Betrieb genommen werden.

Systeme und Anlagen: Kommerzielle Systemkomponenten werden erfasst und evaluiert (PV-Module). Bei den Anlagen steht die Auswertung von wichtigen PV-Daten im Vordergrund, insbesondere im Kanton Bern, auf dem *Mont Soleil*, sowie in der gesamtschweizerische PV-Energiestatistik, welche mit dem VSE durchgeführt wird.

Gebäudeintegration: Die Integration der Photovoltaik im Gebäude und allgemein im bebauten Raum (Gebäude jeglicher Art, Peripherie von Strassen und Bahnlinien) wird als wichtigste Anwendung der Photovoltaik weiterverfolgt. Die Erschliessung des entsprechenden Potentials durch industriell gefertigte Produkte wird angestrebt.

In diversen Studien werden verschiedene weitere Aspekte bearbeitet, insbesondere die Umweltbilanz der Photovoltaik. Die Entwicklungen der Planungsinstrumente auf PC-Basis wurden abgeschlossen und werden zur Zeit validiert.

Die internationale Zusammenarbeit und Koordination innerhalb der IEA wurde intensiviert. Zudem werden mehrere internationale Projekte im Rahmen der Europäischen Union durchgeführt. Die Koordination mit dem Europäischen Forschungszentrum in Ispra wird weitergeführt.

Die Zusammenarbeit mit dem Förderprogramm Photovoltaik wurde im Berichtsjahr weiter verstärkt und bildet damit einen wesentlichen Pfeiler zur Umsetzung der F+E-Tätigkeiten. Die Fördertätigkeit umfasst dabei nebst den Pilot- und Demonstrationsanlagen auch die Qualitätssicherung und forschungsnahe Produkteentwicklung.

2. 1994 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ZELL - TECHNOLOGIE

Am Institut de Microtechnique, IMT, in Neuchâtel [1] begann 1994 die 4. Etappe mit dem Ziel, den stabilen Wirkungsgrad dünner Siliziumzellen weiter zu erhöhen. Bewusst wird hier nicht mehr allein der Begriff amorpher Siliziumschichten (a-Si:H) verwendet, da sich mittlerweile neue komplementäre Konzepte als interessant erwiesen haben. So wurde eine Solarzelle ausschliesslich auf mikrokristalliner Basis ($\mu\text{c-Si:H}$) hergestellt, wobei ein Wirkungsgrad von 4.6% erreicht wurde. Dieses Material zeichnet sich durch eine wesentlich verbesserte Stabilität aus und könnte sich als *Bottom-Zelle* einer Tandem-Zelle eignen. Eine erste solche Tandem-Zelle (a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$) mit einem Anfangswirkungsgrad von 9% wurde hergestellt. Die bisher erreichten Werte können zweifellos durch Prozessoptimierung weiter verbessert werden. Für konventionelle amorphe Solarzellen (p-i-n Struktur) wurde ein Anfangswirkungsgrad von 10.4 % erreicht.

Das IMT hat durch weitere Projekte seine Tätigkeit ausgeweitet. Im Projekt HELIOS im Rahmen der EU [2] wird ebenfalls die Stabilität der amorphen Solarzellen und deren Grenzen untersucht. Dabei stehen die Rolle der Grenzschichten und die Verwendung von SiGe-Verbindungen für die *Bottom-Zelle* einer Tandem-Zelle im Vordergrund. In einem vom NEFF geförderten Projekt [3] werden, in Zusammenarbeit mit ALUSUISSE-LONZA SERVICES, die Möglichkeiten der Deposition von amorphen Siliziumschichten auf Aluminium untersucht. Dies bedingt einen inversen Schichtaufbau (n-i-p). Die Grenzschicht zum Aluminium erwies sich erwartungsgemäss

als kritische Grösse. In Abhängigkeit des gewählten Substrates konnte ein Wirkungsgrad von 6.85% erreicht werden. Weitere wichtige Elemente dieses Projektes betreffen die Haftung, die Diffusion vom Substrat her und die Möglichkeiten des Lichteinfangs.

Am *Centre de Recherche en Physique des Plasmas* der ETHL [4] wurde in einem neuen Projekt die **grossflächige Abscheidung** (35x45cm) von amorphem Silizium in Angriff genommen. Nachdem der BALZERS-RF-Reaktor (13.56 MHz) für Diagnostikzwecke umgebaut wurde, konnten in ersten Depositionsexperimenten gute Schichthomogenitäten erzielt werden. Parallel dazu wurden erste Versuche mit alternativen Depositionskonzepten durchgeführt.

Am Paul Scherrer Institut, PSI [5] wurden die Arbeiten zu **dünnen kristallinen Zellen** mit Lichteinfang weiterverfolgt. Als Hauptthema wurde im Berichtsjahr die Frage der Passivierung der Zellen bzw. der Oberflächenrekombination bearbeitet. Zum besseren Verständnis der einzelnen Prozessschritte wurde eine kapazitive Leerlaufspannungsmessung aufgebaut, welche Messungen nach jedem Prozessschritt erlaubt. Solarzellen wurden sowohl im Niedertemperatur- (Wirkungsgrad: 15-17%) wie im Hochtemperaturverfahren (Wirkungsgrad: 18-20%) hergestellt.

Am Laboratorium für Festkörperphysik der ETHZ wurden die Arbeiten [6] zur Untersuchung von **Solarzellen aus Verbindungshalbleitern** auf der Basis von amorphen Zn_3P_2 -Schichten abgeschlossen. Nach Absenkung der Sauerstoff-Kontamination in den Schichten konnte eine stabile Photoleitfähigkeit der Schichten erreicht werden. Die Solarzelleneigenschaften blieben jedoch mit 0.5% Wirkungsgrad, vermutlich infolge von weiteren Kontaminationen, unter den Erwartungen.

Die AFIF in Zürich beteiligt sich an zwei Forschungsprojekten der EU, EURO-CIS [7] und EURO-CAD [8], in welchen Dünnschichtzellen auf der Basis von $CuInSe_2$ respektive $CdTe$ untersucht werden. Die AFIF hat in diesen beiden Projekten unter Verwendung von Molekularstrahlepitaxie und thermischer Verdampfung Schichten variabler Stöchiometrie auf Einkristallen epitaktisch aufwachsen lassen. Im Vordergrund steht das Verständnis struktureller und optischer Eigenschaften dieser Schichten, welches auf polykristalline Zellen übertragen werden soll.

Am *Institut de Physique Appliquée* der ETHL werden ebenfalls im Rahmen eines EU-Projektes [9] neue Solarzellenmaterialien auf der Basis von **Dichalkogeniden von Übergangsmetallen** (TMDC, Bsp. MoS_2 , WS_2) untersucht. Die Schichten werden durch Sputtern aufgebracht und auf Stöchiometrie und Anisotropie untersucht.

Am *Institut de Chimie Physique* der ETHL wurden die Arbeiten [10] zu Solarzellen auf der Basis von **gefärbten nanokristallinen Halbleiterschichten** (*Grätzel-Zelle*), in Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern, weiterverfolgt. Am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg (FhG-ISE) wurde für geschlossene Zellen ein Wirkungsgrad von 10.3% nachgewiesen. Ausserdem wurden hinsichtlich der Versieglung und der Stabilität Fortschritte erzielt.

SOLARMODULE

Das Projekt eines **integrierten Flachdachsystems** (*SOFREL, Solar Flat Roof Element*) [11] wurde von PMS ENERGIE weiterverfolgt und für die verschiedenen Ausführungen (offen, geschlossen) und Materialvarianten (Blech, Metall, Plastik, Beton) in Bezug auf das Ökoprofil untersucht. Die Betonvariante erscheint in diesem Zusammenhang am günstigsten. Die Umsetzung zu diesem Projekt hat mit verschiedenen Anlagen begonnen.

Die Möglichkeiten, durch Farbgebung und gezieltes Reflexionsverhalten der PV-Module **architektonisch neue Varianten** der Photovoltaik zu erzielen, wurden in einem Projekt der SOLUTION [12] erarbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass Lösungen möglich sind, welche architektonisch viel Spielraum lassen, ohne die PV-Charakteristiken zu beeinträchtigen.

Das vom NEFF geförderte Projekt [13] zur Entwicklung eines **Photovoltaik-Fassadensystems** wurde von ALUSUISSE-LONZA SERVICES weiterverfolgt. Schwerpunkt mässig wird für dieses System die Verwendung von amorphen Siliziumzellen angestrebt. Hierfür wird zur Zeit auf ein kommerzielles Produkt der Firma USSC abgestützt, bei welchem die Solarzellen auf Stahl abgeschieden wurden. Erste Prototypen von Modulen liegen

vor. Im Rahmen dieses Projektes wurde ausserdem das Konzept eines Einzellenwechselrichters entworfen und zum Patent angemeldet.

Für die Anwendungen im **Überkopfbereich** (Autobahnüberdeckung) wurden im Rahmen eines Projektes unter der Leitung von ALPHA REAL [14] die Problembereiche für Grossmodule identifiziert. Im Vordergrund stehen die Sicherheitsaspekte und das Verhalten der PV-Module unter den bei dieser Anwendung möglichen hohen Temperaturen. Entsprechende Materialprüfungen werden an der EMPA durchgeführt.

WECHSELRICHTER

In einem Projekt der Ingenieurschule Biel wurde die Entwicklung eines **Mini-Wechselrichters** [15] für einzelne PV-Module vorangetrieben. Geeignete Schaltungstopologien konnten ausgewählt werden; davon werden die beiden erfolgversprechendsten als Prototypen realisiert und in Solarmodulen integriert. Die Kosten dieser Lösungen für Module mit 200-300 Wp wurde mit 2 Fr/W angegeben. Für Grossserien sind weitere Kostenreduktionen möglich.

Das NEFF-Projekt eines Wechselrichters [16] im **Leistungssegment von 50 kWp** von INVERTOMATIC konnte abgeschlossen werden. Eine Erweiterung auf 100 kWp ist vorgesehen. Ausserdem wurden in diesem Projekt Lösungen für mehrere parallelgeschaltete Wechselrichter erarbeitet. Ein entsprechender Steuerkreis unter Verwendung eines Mikroprozessors und die Datenkommunikation via PC wurden implementiert.

Die **Wechselrichter-Testanlage** der Ingenieurschule Burgdorf [17] konnte im Berichtsjahr ihren Betrieb voll aufnehmen. Sie erlaubt es, ein 60 kWp-Solarzellenfeld entsprechend der Wechselrichterleistung aufzuteilen und zu verschalten. Zur Zeit sind mehrere Wechselrichter installiert: SOLARMAX 20 kW, ECOPOWER 20 kW, SOLCON 3400 3.3 kW und TOP CLASS 4000 3.3 kW. Die Testanlage erlaubt somit, wichtige Betriebserfahrungen mit Wechselrichtern zu sammeln.

SYSTEME UND ANLAGEN

In einem NEFF-Projekt entwickelte ALPHA REAL [18] zusammen mit der Ingenieurschule Burgdorf einen **Funkendetektor**, welcher die in einem PV-Feld eventuell auftretenden Funken (Lichtbogen) erfasst und diese mittels einer geeigneten Schaltung als solche identifiziert. Damit kann die Sicherheit von Photovoltaikanlagen auf einfache Art weiter verbessert werden. Die Arbeiten wurden vom Wettbewerb Technologiestandort Schweiz ausgewählt und werden im April 1995 an der Hannovermesse ausgestellt.

Die Arbeiten zur Entwicklung eines **optimierten Verkabelungssystems** unter Verwendung eines Steckers, insbesondere für den Gebäudeinstallationsbereich, wurden im Rahmen eines NEFF-Projektes durch ALPHA REAL verfolgt [19]. Aufgrund einer Markterhebung konnten die Eigenschaften bestehender Verbindungen erfasst und die Anforderungen an ein optimiertes System formuliert werden. Die Idee eines PV-Steckers wird zudem durch eine Firma aus dem Steckerbereich verfolgt.

SOLUTION [20] entwickelte für die Qualitätssicherung einen eigenen **Sonnensimulator**, welcher die Leistungsmessung von PV-Laminaten bis zu 2.2 m² Fläche erlaubt. Die Messgenauigkeit des Simulators liegt innerhalb 1% der Referenzmessungen der europäischen Prüfstelle JRC/ESTI. Zudem kann nebst der Leistungsmessung auch eine Isolationsmessung bis 4.5 kV durchgeführt werden. Der Simulator steht für Messungen durch Dritte über das BEW zur Verfügung.

Kommerzielle **Systemkomponenten** werden in der neu begonnenen 4. Etappe des Projektes TISO [21] an der Ingenieurschule Lugano erfasst und für ausgewählte Produkte einer eingehenden Evaluation unterzogen. Die entsprechenden vollständigen Komponentendaten sind über eine Datenbank abrufbar. Die Wahl der ausführlich zu messenden Module geschieht unter Berücksichtigung der Produkteneuheiten und deren Bedeutung und Verbreitung auf dem Markt. Im Berichtsjahr wurden die folgenden Module bezüglich elektrischer, mechanischer und thermischer Eigenschaften untersucht: H60 (HELIOS), PWX500 (PHOTOWATT), LA361K51S (KYOCE-RA), MSX120 (SOLAREX), GPV100M (GPV) und BP585 (BP SOLAR). Für Messungen des Einflusses der spektralen Zusammensetzung des Sonnenlichtes auf das Verhalten der PV-Module steht neu eine entsprechende Ausrüstung zur Verfügung. Im Verlauf des Projektes wurden zudem die Anlagen des TISO (4 kWp a-Si und 10 kWp m-Si) sowie die 100 kWp-Anlage in Riazzino analysiert.

Ausführliche **Ertrags- und Zuverlässigkeitsmessungen** wurden durch die Ingenieurschule Burgdorf [22] an Anlagen unterschiedlicher Standortcharakteristik im Kanton Bern vorgenommen. Dabei wurde der Nutzungsgrad (*Performance Ratio PR*) der verschiedenen Anlagen bestimmt. Über das Jahr gemittelt wurden Werte von $PR = 0.67$ bis 0.80 bestimmt. Besonders hervorzuheben ist das Verhalten der 1 kWp -Anlage auf dem Jungfraujoch, welches mit 1273 kWh/kWp einen erwartungsgemäss hohen Wert aufzeigte. Trotz den extremen klimatischen Bedingungen (Einstrahlung, Wind, Temperaturen, Gewitter, Schnee) dieses Standortes funktionierte die Anlage mit hoher Zuverlässigkeit. Mit einer senkrechten Anordnung der Module wurden 48% des Ertrags im Winter produziert.

Die erste Phase des Projektes **PV-Energiestatistik** wurde von ALPHA REAL [23] in Zusammenarbeit mit dem VSE abgeschlossen. Die erfassten 150 Netzverbund-Anlagen lieferten mit hoher Zuverlässigkeit elektrischen Strom. Die Wechselrichter funktionierten mit einer Zuverlässigkeit von 97% . Es wurden im Mittel 810 kWh/kWp produziert, was unter Berücksichtigung der Strahlungsabweichung vom langjährigen Mittel für 1993 im Mittel 840 kWh/kWp entspricht. Durch diese Statistik wird eine bessere Voraussage der Stromproduktion durch Photovoltaik ermöglicht. Anhand der Anlagedaten können entsprechende Simulationen erprobt werden. Die Photovoltaik ist nun, trotz bescheidenem absolutem Beitrag, ebenfalls Bestandteil der schweizerischen Gesamtenergiestatistik [42].

Die Daten des **560 kWp PV-Kraftwerks** auf dem *Mont Soleil* [24] wurde durch die EWI in Zusammenarbeit mit der Ingenieurschule St. Imier erfasst und evaluiert. Die Anlage funktionierte im Berichtsjahr ohne nennenswerte Störung und lieferte $529'000 \text{ kWh}$.

GEBÄUDEINTEGRATION

Das vom LESO betreute Projekt **DEMOSITE** [25] an der ETHL trat 1994 in seine zweite Etappe, in welcher weitere Lösungsvarianten der Photovoltaik im Gebäude präsentiert werden. Anfangs 1995 werden drei neue Pavillons eingerichtet, womit sich die Gesamtzahl auf 12 erhöhen wird. Dabei konnten aufgrund der Erfahrungen am DEMOSITE mit einem der Hersteller neue verbesserte Lösungen für die Dachintegration erarbeitet werden. Die Besucherzahl aus Fachkreisen hat sich inzwischen auf 900 erhöht. Sämtliche Pavillons werden messtechnisch erfasst und sind über Fernabfrage per Computer mit der *Software DEMOSOFT* abrufbar. Die Publikation DEMONEWS [43] informiert über die Erkenntnisse und Fortschritte des DEMOSITE. In verschiedenen Anlagen auf den Gebäuden der ETHL verfolgt das LESO zudem das Thema der Gebäudeintegration der Photovoltaik weiter. Diese Arbeiten bilden einen wichtigen Beitrag zur IEA-Projekt *PV in Buildings*.

In einem Projekt der ATLANTIS ENERGIE [26] wurde ein **PV-Schindeldach** realisiert, welches zudem die hybride Nutzung der anfallenden thermischen Energie erlaubt. Dabei wird die thermische Komponente durch Hinterlüftung der PV-Module durch natürliche Konvektion erreicht. Durch diese hybride Nutzung kann der Wirkungsgrad einer PV-Anlage wesentlich erhöht werden und so im vorliegenden Beispiel 40% erreichen, vorausgesetzt die als Niedertemperaturwärme anfallende thermische Energie kann genutzt werden.

Die SOLUTION entwickelte im Rahmen des Projektes **Denkraum** [44] an der ETHL die *Shadovoltaic Wings* [27]. Diese beweglichen Elemente, welche mit PV-Modulen versehen sind, erlauben die kombinierte Nutzung als Beschattungselement, Tageslichtreflektor und Stromproduktion. Dies wird durch entsprechende automatische Einstellung der Elemente in Funktion der Einstrahlung erzielt.

Am LESO der ETHL wurden die Möglichkeiten des Einsatzes der Photovoltaik auf der **Bedachung von Bahnhofsperrons** untersucht [28]. Nebst den für diesen Überkopfbereich zu berücksichtigenden sicherheitstechnischen Aspekten spielt die Verschmutzung durch Eisenstaub, welcher den Ertrag wesentlich beeinflussen kann, eine wichtige Rolle. Diese Verschmutzung bedingt einen regelmässigen Unterhalt zur Reinigung der PV-Module. Ein Teil einer 22 kWp -Anlage wird anfangs 1995 am Bahnhof von Morges realisiert.

TNC CONSULTING untersucht in einem NEFF-Projekt [29] neue Möglichkeiten des Einsatzes der Photovoltaik als **Schallschutzelemente** entlang von Verkehrsträgern. Dabei wird der Einsatz von zweiseitig nutzbaren PV-Modulen vorgeschlagen. Solche Lösungen könnten damit neu auch für Verkehrsträger der Ausrichtung Nord-Süd eingesetzt werden, wodurch sich ein grosses Potential erschliessen liesse. Erste Vorversuche sind ermutigend.

Zum Zielbereich der Gebäudeintegration können zudem die unter den Modulentwicklungen aufgeführten Projekte [11-14] gezählt werden. Das Buch "Photovoltaik und Architektur" [45] wurde durch die deutschen Buchhändler ausgezeichnet und gewann den amerikanischen Preis "International Architecture Book Award".

DIVERSE STUDIEN

In einem Projekt der ALPHA REAL [30] wird in Zusammenarbeit mit der EAWAG und der ETHZ versucht, zuverlässige Aussagen über die langfristige Umweltverträglichkeit der Photovoltaik zu machen. In Bezug auf die Ökobilanz und die Energiebilanz kann unter der Annahme heutiger Technologie (kristalline Zellen, Einsatz im Gebäude) bereits ausgesagt werden, dass die Rückzahlauern sämtlicher Indikatoren im Bereich von 3.7 bis 7.4 Jahren liegen, dies unter Berücksichtigung eines UCPT-Strommixes. Damit werden frühere Aussagen, welche in der Presse zu einem negativen Ökimage der Photovoltaik geführt hatten, widerlegt. Diese neuen Resultate wurden am 13. Oktober 1994 der Presse vorgestellt [46].

Die Entwicklung des PC-Planungsinstrumentes PVSYST zur Dimensionierung und Simulation von netzgekoppelten PV-Anlagen wurde in der *Groupe de Physique Appliquée* der Universität Genf [31] abgeschlossen. Das Programm arbeitet mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche unter *Windows*. Es beinhaltet nebst dem Zugriff auf relevante Meteodaten des jeweiligen Standortes (METEONORM), einer Datenbank für Komponenten (vgl. auch [21]) auch die Teilbeschattungseffekte aufgrund eines nahen Horizontes. Das Programm wird zur Zeit anhand von einigen gut dokumentierten Anlagen validiert.

Die Neuauflage der verbreiteten Software METEONORM [32] zur Bestimmung der Einstrahlung eines beliebigen Standortes in der Schweiz liegt in einer Vorversion vor und wird im Verlauf des Jahres 1995 erscheinen. Die Neuauflage bietet unter anderem folgende Änderungen: eine neue Datenbasis, neue Interpolationsverfahren, den Einbezug des Horizontes sowie ein besseres Strahlungsmodell.

Die EWI stellt in einem Projekt [33], welches vom PSEL gefördert wird, ein *Engineering-Handbuch* für grössere Photovoltaik-Systeme (≥ 50 kWp) zusammen. In einem EU-Projekt [34], an welchem EWI beteiligt ist, werden zudem aufgrund der Erfahrungen mit grossen Systemen die Designkriterien für Multimegawatt PV-Anlagen (≥ 1 MWp) zusammengestellt.

Die KOSMO SYNERGIE entwickelte den Prototypen[35] eines flächenverdichtenden PV-Konzeptes, in welchem die Sonneneinstrahlung durch 112 Spiegel auf die Solarzellenfläche überlagert wird. Es wurden die grundlegenden Parameter eines solchen Systems definiert und anhand von theoretischen Überlegungen optimiert.

Das PSI untersucht, in Ergänzung zu einem früheren Projekt auf dem *Tillis* [36], den Einfluss von Albedo-Effekten [37] in den Schweizer Alpen. Die Messstation, welche im Mittelwallis installiert wurde, umfasst die hierfür notwendigen Strahlungsmessungen.

KOORDINATION

Am TISO wird die Koordination [38] zum IEA-Projekt *Exchange and Dissemination of Information on PV Power Systems* wahrgenommen. Im Rahmen dieses Informationsaustausches wird aufgrund der nationalen Berichte [47] ein Überblicksbericht über die Anwendung von PV-Systemen in den beteiligten Ländern erstellt, welcher im Verlauf des Jahres 1995 publiziert werden soll. Ausserdem wird neu ein *Newsletter PV Power* [48] herausgegeben.

FMS ENERGIE koordiniert die Schweizer Aktivitäten zum IEA-Projekt *PV in Buildings* [39]. In diesem Rahmen wird auch eine private 2.8 kWp-Anlage [40] erfasst und publiziert.

An der Universität Genf wurde die Koordination der IEA-Projekt Spektrale Messungen der Sonnenstrahlung [41] weiterverfolgt.

3. Internationale Zusammenarbeit

Aufgrund der verfügbaren finanziellen Mittel ist die internationale Zusammenarbeit ein wichtiges Instrument der Aufgaben- und Kostenteilung. Diese Zusammenarbeit wurde im vergangenen Jahr ausgebaut. So laufen zur Zeit

bereits 5 verschiedene Forschungsprojekte [2, 7, 8, 9, 34] im Programm Joule II der Europäischen Union. Es wird angestrebt, diese internationale Zusammenarbeit im 4. Rahmenprogramm der EU fortzusetzen und nach Möglichkeit weiter auszubauen.

Im Rahmen der IEA beteiligt sich die Schweiz in den für die Photovoltaik relevanten Programmen und Projekte. Diese internationalen Kontakte erlauben, nebst der konkreten Projektzusammenarbeit, den für den Fortschritt der Photovoltaik in Forschung und Anwendung wichtigen Informationsaustausch.

4. Transfer in die Praxis

Das Programm Photovoltaik umfasst in seiner Breite sowohl Projekte, welche eine längere Zeit zur Umsetzung benötigen (typischerweise die Zellforschung) wie auch solche, welche aufgrund der Anwendungsnähe relativ rasch umgesetzt werden können (Wechselrichter, Systemtechnik, Gebäudeintegration). Die Umsetzbarkeit der Resultate in die Praxis bildet allgemein ein wesentliches Kriterium der Projektförderung. Dementsprechend wird ein früher Einbezug der Industrie angestrebt. In allen Bereichen des Programms ist dieser Praxisbezug mittlerweile gegeben und wird durch die Zusammenarbeit mit der Industrie belegt. Entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung sind einerseits der technische Fortschritt und die Reife der Lösungen sowie die Entwicklung des Marktes. Durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Förderprogramm Photovoltaik werden die Rahmenbedingungen für eine optimale Umsetzung sichergestellt.

Es darf in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass die in der Schweiz erarbeiteten Lösungen aus Forschung und Anwendung international auf grosses Interesse stossen. Dies kann ebenfalls als Teil einer erfolgreichen Umsetzung gewertet werden.

5. P + D - Projekte

Thomas Nordmann, Förderprogrammleiter

1994 wurden 12 Projekte neu gestartet, in Betrieb genommen wurden 16 Anlagen mit einer totalen Nennleistung von 263 kWp, darunter unter anderem die Anlage STAHLRAIN in Brugg mit 14.4 kWp, MIGROS Hobbycenter in Winterthur mit 65 kWp und eine PV-Anlage auf einem Doppelmehrfamilienhaus in Hedingen mit 40 kWp. An 17 realisierten Pilot- und Demonstrationsanlagen wurden die Messkampagnen weitergeführt. Damit stehen viele Messdaten und Betriebserfahrungen verschiedener Photovoltaik P+D-Anlagen zur Verfügung. Die Anstrengungen der Förderprogrammleitung gehen dahin, dass diese Messdaten durch die Projektträger normalisiert und damit vergleichbar dargestellt werden. So werden Quervergleiche und Rückschlüsse zwischen den einzelnen Projekten möglich. Erstmals wird diese europäisch vereinheitlichte Darstellung von allen Projektnehmern gefordert. Diese Erkenntnisse werden zukünftig auch in den Schweizer Beitrag zum entsprechende IEA-Projekt einfließen. Erstmals liegen auch erste Betriebserfahrungen über hybride Photovoltaiknutzung mit luftbeaufschlagter Wärmeerzeugung vor. Der Anteil der P+D-Projekte beträgt ca. 24% vom gesamten schweizerischen Anlagezubaue 1994 von ca. 1.1 MW

Die Ausrichtung der Anwendungs- und Piloterfahrung auf Ingenieurschulen und Elektro-Berufsschulen konnte 1994 weiter vorangetrieben werden. Zum Jahresende standen insgesamt 9 P+D-/Ausbildungsanlagen auf Elektro-Berufsschulhäusern in Betrieb. Die Gesamtleistung dieser Projekte erreichte 72 kWp. Die Anwendungserfahrungen bei P+D-Anlagen in der Gebäudeintegration werden zur Zeit noch ungenügend auf dem noch zu kleinen PV-Markt umgesetzt.

6. Bewertung 1994 und Ausblick für 1995

1994 wurden aus der Schweiz verschiedene völlig neue Ansätze und Resultate erarbeitet, welche das Innovationspotential der Photovoltaik belegen. So wurden mit den mikrokristallinen Zellen des IMT mögliche neue Wege für die Dünnschicht-Siliziumtechnologie aufgezeigt. Im Bereich der Systemtechnik wurden die Konzepte eines Funkendetektors sowie eines Einzellenwechselrichters präsentiert. Die Vielfalt der vorgeschlagene

nen Integrationslösungen der Photovoltaik in den bebauten Raum und entsprechende Doppelnutzungsmöglichkeiten konnten weiter ausgebaut und anhand von Anlagebeispielen konkretisiert werden. Ausserdem hat die Entwicklung zum industriellen PV-Produkt zugenommen. Wichtig für die künftige Entwicklung dürften ausserdem die neuen, günstigen Resultate zur Umweltbilanz der Photovoltaik sein, welche frühere Behauptungen wissenschaftlich widerlegen.

Die Photovoltaikforschung der Schweiz konnte 1994 ihre gute Position aufgrund breit abgestützter Förderung (Bund, Kantone, Private und internationale Zusammenarbeit) und entsprechender Koordination halten. Dies hat es erlaubt, in allen verfolgten Bereichen technologisch mitzuhalten und eine erstaunliche Vielfalt zu bewahren. Angesichts zunehmender Beschränkung der finanziellen Mittel ist diese Führungsstellung jedoch mittelfristig gefährdet.

Die Infrastruktur, die Fachkompetenzen und die entsprechenden Beziehungen, welche in allen Bereichen des Programms vorhanden sind, erlauben im allgemeinen eine effiziente und zuverlässige Abwicklung der Forschungsprojekte.

1994 fanden zwei wichtige internationale Konferenzen statt, an welchen die Schweiz gut vertreten war: Im April die 12. Europäische Photovoltaikkonferenz und im Dezember die 1. Photovoltaik-Weltkonferenz. Zusammenfassungen dieser beiden Konferenzen aus der Sicht der Schweiz wurden durch die Programmleitung publiziert [49, 50].

Für 1995 stehen in den einzelnen Programmbereichen folgende Zielsetzungen im Vordergrund:

Zellen: Erhöhung des stabilen Wirkungsgrades der Dünnschicht-Siliziumzellen unter Berücksichtigung der neuen Resultate und Möglichkeiten der mikrokristallinen Schichten, grossflächige Abscheidung von Silizium-Schichten, Optimierung des inversen Schichtaufbaus (n-i-p);

Module: Fortsetzung der Modulentwicklungen für Flachdachsysteme, Fassadensysteme und Überkopfbereich;

Wechselrichter: keine neuen Aktivitäten;

Systeme und Anlagen: Analysieren von Systemkomponenten, Sicherheitsaspekte, Erfassung der wichtigsten Anlagen;

Gebäudeintegration: Ausweitung, Optimierung und Umsetzung der entwickelten Lösungen, Doppelnutzungsmöglichkeiten, Einbezug des Gebäudesektors (Architekten, Ingenieure und Industrie), einfache Montage;

Diverse Studien: Abschluss der Projekte zur Umweltverträglichkeit und der Planungsinstrumente sowie entsprechende Umsetzung;

Koordination: Optimierung der Koordination innerhalb der Schweiz, Fortsetzung der bisherigen Aktivitäten im Bereich der internationalen Zusammenarbeit, zusätzliche Beteiligung an internationalen Forschungsprojekten, Zusammenarbeit mit Industrie und Elektrizitätswirtschaft.

Im April 1995 findet das schweizerische PV-Seminar statt, welches Forschung, Anwendung und künftige Entwicklungen der Photovoltaik in der Schweiz zum Thema hat.

7. Liste der Projekte

- [1] A. Shah, J. Meier, IMT / UNI - Neuchâtel : *Solarzellen aus amorphem Silicium, phase IV.* (JB) / ENET 9400091
- [2] A. Shah, N. Wyrsh, IMT / UNI -Neuchâtel : *HELIOS* (JB)
- [3] A. Shah, IMT / UNI - Neuchâtel : *Aluminium-Fassadenelemente mit direkt abgeschiedenen amorphen Silizium-Solarzellen.* (JB)
- [4] F. Troyon, C. Hollenstein, CRPP / EPFL - Lausanne: *Grossflächige Abscheidung von amorphen, photovoltaischen Silizium-Schichten.* (JB) / ENET 9400051
- [5] H. Kiess, PSI - Zürich : *Dünne Solarzellen aus kristallinem Silizium.* (JB) / ENET 9200271

- [6] H. von Känel, ETH - Zürich : *Dünne Solarzellen aus Verbindungshalbleitern.* (JB+SB) / ENET 9200741
- [7] S. Blunier, A. N. Tiwari, H. Zogg, K. Kessler, AFIF / ETH - Zürich : *EUROCIS.* (JB) / ENET 9400611
- [8] A. N. Tiwari, K. Kessler, S. Blunier, H. Zogg, AFIF / ETH - Zürich : *EURGCAD.* (JB)
- [9] C. Ballif, M. Regula, F. Lévy, IPA / EPFL - Lausanne : *EURO-TMDC : MoS₂ and WS₂ thin films for photovoltaic applications.* (JB)
- [10] M. Grätzel, ICP2 / EPFL - Lausanne : *Cellules solaires basées sur des films semiconducteurs nanocristallins colorés.* (JB)
- [11] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, Mönchaltorf : *SOFREL - Entwicklung eines flachdach integrierten Photovoltaiksystems.* (JB) / ENET 9200191
- [12] M. Rusterholz, SOLUTION f. SOLARTECHNIK, Härkingen : *Funktionale Materialkomponenten im architekturfähigen Photovoltaik-Bauelement.* (JB+SB) / ENET 9300871
- [13] M. Weng, ALUSUISSE-LONZA, Neuhausen : *Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen.* (JB) / ENET 9301131
- [14] C. Meier, ALPHA REAL, Zürich : *Untersuchungen für Solarzellenkraftwerk Autobahnüberdeckung.* (JB) / ENET 9400371
- [15] V. Crastan, HTL - Biel : *Mini-Wechselrichter für direkten Netzanschluss 230 Vac von Solarmodulen.* (JB) / ENET 9300831
- [16] C. Giovannini, INVERTOMATIC, Riazzino : *Solarwechselrichter mit Netzeinspeisung im 50 kW-Bereich.* (JB+SB) / ENET 8900595
- [17] F. Käser, H. Häberlin, HTL - Burgdorf : *Aufbau einer Testanlage für PV-Wechselrichter bis 60kW.* (SB) / ENET 9400561
- [18] M. Real, ALPHA REAL, Zürich : *Funkendetektor.* (JB)
- [19] C. Meier, ALPHA REAL, Zürich : *Entwicklung eines optimierten Verkabelungssystems für Solarzellenanlagen im Gebäudebereich.* (JB)
- [20] M. Rusterholz, SOLUTION, Härkingen : *Bau und Betrieb eines SUN-Simulators (Endleistungsprüfgerät).* (JB) / ENET 9400041
- [21] M. Camani, D. Chianese, S. Rezzonico, N. Cereghetti, DIP.TERRITORIO, Bellinzona : *Tests di componenti e sistemi per progetti nel campo della tecnica fotovoltaica, TISO - periodo IV.* (JB) / ENET 9400931
- [22] C. Beutler, H. Häberlin, HTL - Burgdorf : *Ertrag und Zuverlässigkeit von netzgekoppelter Photovoltaikanlagen im Kanton Bern.* (JB) / ENET 9107610
- [23] C. Meier, ALPHA REAL, Zürich : *Energiestatistik und Erfolgskontrolle Photovoltaik.* (JB+SB) / ENET 9107600
- [24] R. Minder, Konsortium PHALK MONT-SOLEIL c/o EWI, Zürich : *Photovoltaisches Kraftwerk PHALK Mont-Soleil Basis-Forschungsprogramm.* (JB+SB) / ENET 9100279
- [25] J.-B. Gay, J. Bonvin, Ch. Roecker, LESO / EPF - Lausanne : *Site de démonstration d'éléments de construction photovoltaïques intégrés au bâtiment. Phase II.* (JB) / ENET 9400261
- [26] S. Gnos, H. Hochreutener, ATLANTIS ENERGIE, Bern : *Forschungsarbeiten betr. PV-Schindeldach Rigi.* (JB+SB) / ENET 9200381
- [27] M. Rusterholz, SOLUTION, Härkingen : *Shadovoltaic Wings.* (JB+SB) / ENET 9100279
- [28] J.-B. Gay, J. Bonvin, Ch. Roecker, LESO / EPFL - Lausanne : *Installations photovoltaïques intégrées aux marquises de gare.* (JB) / ENET 9400641
- [29] T. Nordmann, TNC CONSULTING, Männedorf : *Integrale PV-Schallschutz Elemente für den Einsatz entlang von Verkehrssträgern.* (JB)

- [30] M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *Entwicklung und Validierung eines Modells zur Analyse und Prognose der langfristigen Umweltverträglichkeit verschiedener PV-Technologien.* (JB) / ENET 9400381
- [31] O. Guisan, M. Guenin, A. Mermoud, GAP / UNI - Genève : *Logiciel pour systèmes photovoltaïques.* (JB) / ENET 9200071
- [32] S. Kunz, J. Remund, METEOTEST, Bern : *METEONORM.* (JB)
- [33] R. Minder, ELECTROWATT, Zürich : *Engineering-Handbuch Photovoltaik.* (JB)
- [34] R. Minder, ELECTROWATT, Zürich : *Comparative Review of Design Criteria for Multimegawatt PV plants.* (JB)
- [35] K. Stegmüller, T. Steinemann, KOSMO SYNERGIE, Bern : *HELIOFOL II - Sonnenkollektorsystem mit Flächenverdichtung.* (JB+SB) / ENET 9300201
- [36] M. Brack, D. Wuillemin, W. Durisch, PSI, Villigen : *Albedo-Messungen und Systemuntersuchungen an der netzgekoppelten PV-Anlage auf dem Tittlis.* (SB) / ENET 8900447
- [37] W. Durisch, M. Brack, PSI, Villigen : *Albedo Measurements in the Swiss Alps.* (JB+SB)
- [38] M. Camani, S. Rezzonico, DIP. TERRITORIO, Bellinzona : *TISO : Valutazione e sorveglianza di lavori nel settore dei sistemi fotovoltaici.* (JB) / ENET 9400991
- [39] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, Mönchaltorf : *Photovoltaik in Gebäuden. in Zusammenarbeit mit dem entsprechenden IEA - SHCP # 16.* (JB) / ENET 9008009
- [40] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, Mönchaltorf : *Ausmessen der Solaranlage Schauenbergstrasse 50 in Zürich zuhanden des IEA-SHCP # 16 Projektes.* (JB) / ENET 9200121
- [41] P. Ineichen, GAP / UNI - Genève : *Coordination suisse de la Tâche 17 du Projet AIE SH&C #17 (mesures spectrales du rayonnement solaire).* (JB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

8. Referenzen

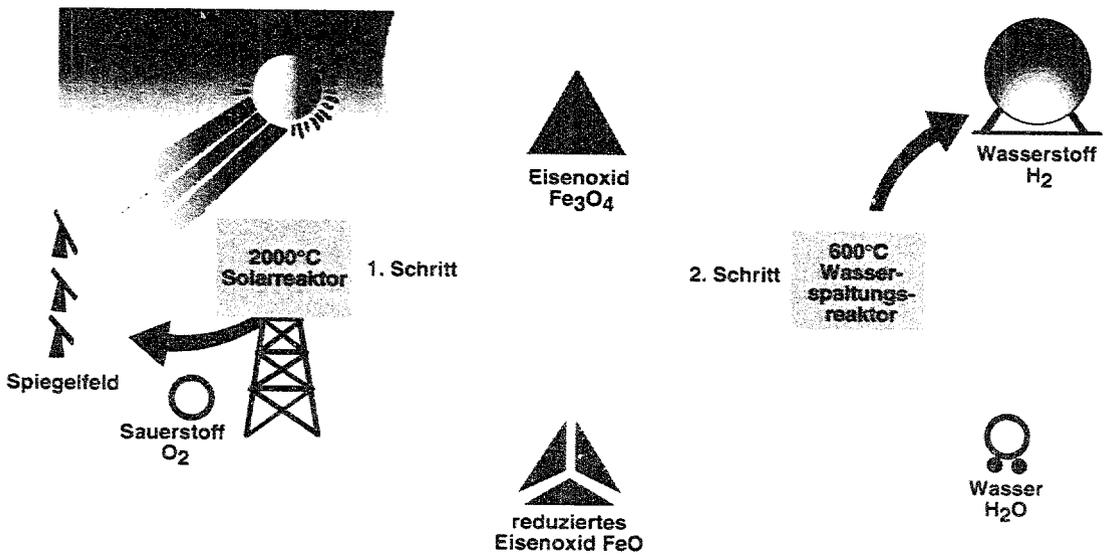
- [42] *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 1993*, BEW
- [43] *DEMONNEWS*, EPFL, LESO-PB, 1015 Lausanne
- [44] *Projekt Denkraum*, Forschungsprogramm Solararchitektur, R. Hastings, ETHZ, 8093 Zürich
- [45] *Photovoltaik und Architektur*, O. Humm und P. Toggweiler, Birkhäuser 1993
- [46] *Medienorientierung* vom 13.10.1994, Institut für Energietechnik ETHZ und Alpha Real AG
- [47] *Status review of PV power applications in Switzerland*, S. Rezzonico, Progetto TISO, STS, 6952 Canobbio
- [48] *PV Power, Newsletter of the IEA PVPS Programme*, No. 1, September 1994
- [49] *Die 12. Europäische Photovoltaikkonferenz aus Schweizer Sicht*, S. Nowak, Juni 1994
- [50] *Die 1. Photovoltaik-Weltkonferenz aus Schweizer Sicht*, S. Nowak, März 1995

SOLARCHEMIE

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Armin Keller



Kreisprozess zur solaren Erzeugung von Wasserstoff

Wasserstoff wird mittels konzentrierter Sonnenenergie durch einen zweistufigen thermochemischen Kreisprozess hergestellt. Im 1. Schritt erfolgt die stark endotherme Reduktion von Eisenoxid im Sonnenofen. Im 2. Schritt wird mit dem reduzierten Eisenoxid Wasser gespalten.

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1994

Die Forschungs- und Entwicklungsprojekte des Programms "Solarchemie" sind der effizienten, ökonomisch und ökologisch verantwortbaren Umwandlung von Strahlungsenergie mittels physikalischer, thermo- und photochemischer Prozesse in speicherbare und/oder transportfähige Energieträger gewidmet. Die dazu erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beinhalten einerseits die qualitative und quantitative Erfassung von potentiellen Strahlungsenergiequellen, insbesondere von Solarstrahlung. Andererseits werden Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie untersucht, die eine möglichst effiziente Absorption und Speicherung der Strahlungsenergie mittels gasförmiger, flüssiger oder fester Medien bzw. deren Nutzung für chemische Reaktionen ermöglichen. Schliesslich wird die Kinetik und der Mechanismus von optimal geeigneten endothermen Prozessen charakterisiert.

Weitere Aktivitäten des Forschungsprogramms sind der katalytischen und elektrochemischen Reduktion von Kohlendioxid gewidmet.

Im Bereich der physikalischen Prozesse wird die Absorption von Strahlungsenergie zur Erhitzung der Medien Luft und Wasser mittels derjenigen Absorbersystemen optimiert, die dem jeweiligen Temperaturbereich bzw. dem Konzentrationsgrad der Strahlung optimal angepasst sind. Bei den solarchemischen Prozesse werden einerseits Wasserstoff aus der Spaltung von Wasser, andererseits Methanol, Ethanol, Amine und weitere Grundchemikalien als Produkte angestrebt. Die letztgenannten Verfahren haben zum Ziel, einerseits die in Abfall, d.h. in Biomasse oder synthetischen Materialien gespeicherte Sonnenenergie mittels katalysierter Prozesse wieder in brauchbare Energieträger, andererseits das "Abfallprodukt" Kohlendioxid durch geeignete Reduktionsprozesse ebenfalls wieder in verwendbare Chemikalien umzuwandeln. 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 Projekten sowohl an technischen Hochschulen und Universitäten als auch in Zusammenarbeit mit industriellen Betrieben 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 mittels programmübergreifender Koordination gezielt verstärkt werden.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Berichtsjahr 1994 wurden folgende Projekte ausgeführt:

SIMULTANE MESSUNG AN BELEUCHTETEN, HEISSEN, MATTEN OBERFLÄCHEN

Mit konzentriertem Sonnenlicht bestrahlte Festkörperoberflächen sind sowohl hohen Belstrahlungsstärken im Bereich von $\sim 500 \text{ W/cm}^2$ als auch extremen Gradienten der Bestrahlungsstärke von $\sim 50 \text{ W/cm}^2/\text{cm}$ ausgesetzt. Daraus resultieren hohe Temperaturen bzw. Temperaturgradienten an den Festkörperoberflächen. Die simultane Messung von Emissivität, Temperatur und Beleuchtungsstärke ausgewählter Oberflächen bzw. relevanter Materialien stellt messtechnisch grosse Anforderungen [1]. Ziel des am PSI bearbeiteten Projekts ist es, einerseits ein aussagekräftiges Messverfahren zu realisieren, andererseits eine grundlagenwissenschaftlich bedeutende als auch bezüglich Anwendungspotential entscheidende Frage zu beantworten: Ist ein direkter Effekt der Photonen auf Hochtemperaturprozesse nachzuweisen oder zu widerlegen? Es wurden Experimente an Stoffsystemen durchgeführt, die in den unter [4] genannten thermochemischen Prozessen eingesetzt werden. Mittels numerischer Methoden konnte das verwendete Messverfahren simuliert und bezüglich Fehlerquellen optimiert werden. Schliesslich wurde eine Anpassung der Messmethode an die Verhältnisse am Sonnenofen

vorangetrieben, sodass für das kommende Jahr nicht nur Anwendungen für die Sonnenenergieforschung, sondern auch für materialwissenschaftliche Fragestellungen erwartet werden.

LUMINESZENZMESSUNGEN

Aufgrund thermodynamischer Überlegungen ist gezeigt worden, dass Systeme, welche Strahlungsenergie direkt in chemische oder elektrische Energie umwandeln, notwendigerweise lumineszieren. Das chemische Potential eines angeregten Zustands eines bestimmten Systems ist somit 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 Quantensystems.

Die experimentellen Arbeiten zur Bestimmung der Abhängigkeit zwischen Temperatur und Lumineszenzquantenausbeute von Festkörpern, die für eine effiziente Umwandlung der Sonnenenergie von besonderem Interesse sind, erbrachten vielversprechende Resultate [2] :

- An Zinkoxid, welches mit Methan oder verdünntem Wasserstoff im Sonnenofen auf einfache Weise zu metallischem Zink reduziert werden kann (siehe [5]), wurden unter Vakuumbedingungen Lumineszenzspektren als Funktion der Temperatur aufgezeichnet. Das Quenchen der Lumineszenz von Zinkoxid mit Methan und Wasserstoff wurde in Abhängigkeit des Drucks des Quenchgases bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass diese beiden Gase das Lumineszenzverhalten unterschiedlich beeinflussen.
- Ein sehr wichtiger Befund konnte im Zusammenhang mit der Untersuchung des Photokatalysators Titanoxid erbracht werden: Erstmals konnte nachgewiesen werden, dass an einer mit UV-Licht bestrahlten Titanoxidoberfläche aus Wasserdampf und Kohlendioxid Methan gebildet werden kann. Die Dunkelreaktion liefert hingegen erwartungsgemäss kein Methan. Diese Beobachtungen erlauben die schlüssige Formulierung eines Reaktionsmechanismus, der mittels Redoxprozessen im Photokatalysator selbst sowohl die Wasserspaltung als auch die Kohlendioxidreduktion erklärt.

OPTISCHE SCHICHTEN FÜR DIE THERMISCHE KONVERSION VON SOLARENERGIE

Das an der Universität Basel laufende Projekt [3] ist Teil des übergeordneten Verbundprojekts *Absorber 2000*. Zielsetzung ist, ein im Temperaturbereich zwischen 100°C und 500°C arbeitendes Direktabsorptionssystem zu entwickeln. Ein Schwerpunkt des Projekts ist die plasmagestützte Abscheidung sowie Charakterisierung der für den technischen Einsatz relevanten Eigenschaften von solar-selektiven Schichten. Als primäres Einsatzgebiet der Kollektorsysteme ist die Warmwasseraufbereitung für Haustechnik und Industriebetriebe vorgesehen. 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. Es konnten technologisch aussichtsreiche Resultate erzielt werden, indem anstelle des konventionellen reaktiven Sputterns verfeinerte Herstellungsmethoden entwickelt wurden, die Beschichtungen mit reproduzierbaren Eigenschaften liefern. Bei Chrom-haltigen Kohlenwasserstoff-Schichten wurden die optischen und elektronischen Eigenschaften in einem grossen Konzentrationsbereich charakterisiert. Der Einfluss von Depositionsparametern, Schichtaufbau und Oberflächenbeschaffenheit des Kollektorbleches auf die Degradation konnte weitgehend geklärt werden, sodass die Entwicklung und Produktion eines bezüglich Wirkungsgrad, Alterungsbeständigkeit und auch Preis optimalen Kollektors an die Hand genommen werden kann. Die Erkenntnisse betreffend Optimierung des Schichtaufbaus wird patentrechtlich geschützt.

REDOXPROZESSE VON METALLOXIDEN ZUR SPEICHERUNG VON SOLARSTRAHLUNG

Die Arbeiten im Rahmen dieses Projekts fokussieren sich auf experimentelle Untersuchungen von Kreisprozessen zur Wasserspaltung mittels kinetisch und thermodynamisch optimierten Redoxprozessen in reinen oder substituierten Eisenoxiden [4]. Die für Hochtemperaturreduktion bzw. Wasserspaltung wohl optimale thermochemische Reaktivität von Eisenoxid ist für eine zukünftige Anwendung bezüglich Ökonomie und

Ökologie vielversprechend. Der thermochemische Kreisprozess ist auf dem Titelblatt dieses Jahresberichts dargestellt.

Das wohl entscheidende und gleichzeitig unabdingbare Resultat der Forschungsarbeiten 1994: Es gelang erstmals, den zweistufigen thermochemischen Kreisprozess zur Wasserstoffherstellung mit Hilfe von konzentrierter Solarstrahlung unter Anwendung des Direktabsorptions-Pulverwolkenreaktorprinzips (siehe Projekt [5]) zu demonstrieren. Diese Resultate wurden erstmals am *7th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies in Moskau* vorgestellt.

Damit dieses Ziel erreicht werden konnte, bedurfte es einer Vielzahl von festkörperchemischen, verfahrenstechnischen und materialwissenschaftlichen Untersuchungen:

- Die Metalloxidreduktion wurde bezüglich wichtiger Parameter wie Zusammensetzung, Partikelgrösse, Verweilzeit im Fokusbereich, sowie Pulverwolkenlichte charakterisiert.
- Für die kinetischen Untersuchungen wurden Durchfluss-Pulverwolkenreaktoren konzipiert.
- Für die Wasserspaltungsreaktion mittels reduzierter Eisenoxidphasen wurden einerseits die apparativen Bedürfnisse realisiert, andererseits die kinetisch-mechanistischen Prozessparameter aufgeklärt und hinsichtlich eines zukünftigen technischen Einsatzes charakterisiert.

Neben der Wasserspaltung zur Erzeugung von Wasserstoff wurden zwei weitere solarenergiegestützte Prozesse studiert: Einerseits Reformierungsreaktionen zur Erzeugung von Metallen und Synthesegas aus Methan und Metalloxiden, andererseits die Herstellung von Metallen aus natürlichen Erzvorkommen mittels Reduktion mit Wasserstoff (siehe auch Projekt [5]). Bei diesen Arbeiten wurde insbesondere darauf geachtet, an unterschiedliche Regionen gebundene Einsatzpotentiale bezüglich Rohstoff- und Energievorkommen - d.h. Solarstrahlung, Metalloerze und Erdgas - zu definieren und mittels Vorversuchen deren Realisierbarkeit zu prüfen. Diese Projekte stellen eine wichtige Voraussetzung für eine mögliche technisch-industrielle Umsetzung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dar.

REAKTOREN ZUR CHEMISCHEN UMWANDLUNG PULVERFÖRMIGER STOFFE

Die Entwicklung und verfahrenstechnische Optimierung von Konzentratoren und Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung stellt einen zentralen Bereich des Programms dar [5]. Die am PSI zur Verfügung stehenden Komponenten sind:

- Zwei Konzentratoranlagen, der *McDONNELL-DOUGLAS* Parabolspiegel (*McDD Dish*) sowie der Heliostat-Parabolspiegel-Konzentrator ("Sonnenofen")
- Drei Reaktorsysteme, der Zyklon-Reaktor, ein industriell gefertigter volumetrischer Reaktor (Firma *BÜHLER, Uzwil*), sowie ein im Eigenbau gefertigter volumetrischer Reaktor.

Mit dem Zyklon-Reaktor wurden sowohl auf dem *McDD Dish* als auch im Sonnenofen eine grosse Anzahl Testreaktionen gefahren. Es konnte insbesondere gezeigt werden, dass für die thermochemische Zersetzung unterschiedlicher Carbonate und Hydroxide (Kalk, Magnesiumcarbonat, Calciumhydroxid, etc.) beachtliche Energieabsorptions-Wirkungsgrade von über 40% erreicht werden können.

Dem Bau volumetrischer Receiversysteme liegt die Leitidee zugrunde, eine Pulverwolke möglichst effizient und kontrolliert durch einen Fokusbereich zu bewegen und gleichzeitig die Reaktorwände möglichst kühl zu halten. Ausgewählte Experimente im Sonnenofen bei Strahlungskonzentrationen von über 3'000 kW/m² zeigten, dass für die thermochemische Reduktion von Metalloxiden erstaunlich hohe Wirkungsgrade im Bereich von 80% erzielt werden können. Diese Resultate sind für den angestrebten Kreisprozess der Wasserspaltung (siehe [4]) von grosser Bedeutung. Vergleichbare Resultate wurden mit dem Industriereaktor auf dem *McDD Dish* für die Zersetzung von Natriumbicarbonat erreicht. Insgesamt konnte belegt werden, dass das gewählte Reaktor-Prinzip ein sehr gut geeignetes Profil für zukünftige angewandte Prozesse aufweist.

Dem Reaktorprogramm entsprechende unterstützende Aktivitäten umfassen die Analyse von Strahlungswärmeübertragung, Laser-Diagnostik für solarchemische Reaktionen, Evaluation von geeigneten thermochemischen Prozessen wie der direkten oder mittels Methan durchgeführten Metalloxidreduktion, etc. Gerade in diesem Bereich zeigten sich im Berichtsjahr sehr erfolgreiche Entwicklungen, indem durch Zusammenarbeit mit dem Projekt [4] und dem Programmleiter eine Anzahl von industriell wichtigen Prozessen definiert und experimentell betreffend Realisierbarkeit verifiziert werden konnten. Als Beispiele solar gestützter, für eine industrielle Umsetzung relevanter Prozesse, die gegebenenfalls patentrechtlich zu schützen sind und daher nicht detailliert werden, sind hier zu nennen:

- Kombiniertes Reforming-Reduktionsprozess zur gleichzeitigen Herstellung von Metallen und Synthesegas aus Metalloxiden und Methan.
- Herstellung von Wasserstoff mittels Redoxprozessen an komplexen Metalloxiden
- Produktion von Metallnitriden mittels carbothermischer Reduktion von Metalloxiden

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-Systemen - erfordert breitgefächerte, optimal koordinierte Aktivitäten. Dementsprechend beruhen die in diesem Projekt erzielten Resultate auf einer erfolgreichen programm- und institutionsübergreifenden Zusammenarbeit.

KEREX

In diesem industrienahen Projekt werden keramische Absorbermodule für solarthermische Kraftwerke oder Anwendungen in der Hochtemperatursolarchemie entwickelt und getestet. Es wird angestrebt, feinstrukturiertes, keramisches Absorber-Material mit einem ebenfalls keramischen Träger zu verbinden. Anschliessend soll der Aufbau des Absorbers sowie eine Testreihe unter solaren Bedingungen (teils an der *Plataforma Solar de Almeria*) erfolgen [6].

THERMOCHEMISCHES REAKTIONSVERHALTEN VON METALLOXIDEN

Im Berichtsjahr wurde das Instrumentarium zur qualitativen und quantitativen Erfassung der Wasserspaltungsreaktion an Metallen und Metalloxiden, insbesondere zur Aufklärung der Kinetik, erfolgreich eingesetzt [7]. Es wurden in-situ-festkörperchemische Untersuchungen mit Hilfe der in ein Photoelektronenspektrometer eingebauten Reaktionszelle durchgeführt. Darüberhinaus wurde diese Apparatur für weitere festkörperchemische bzw. materialwissenschaftliche Untersuchungen im Zusammenhang mit Energieforschungsprojekten des Programms eingesetzt.

KATALYTISCHE SYNTHESEN AUSGEHEND VON MINERALISCHEN CO₂-QUELLEN

In diesem Projekt wird das Ziel verfolgt, über die Reduktion von Kohlendioxid neben den bekannten Produkten Methan und Methanol Grundchemikalien mit möglichst hoher Wertschöpfung herzustellen. Zielverbindungen sind vor allem Amine, die durch selektive katalytische Prozesse aus Kohlendioxid, Wasserstoff und Ammoniak gewonnen werden sollen. Im Berichtsjahr wurde eine Apparatur aufgebaut, in der die genannten katalytischen Prozesse kontrolliert durchgeführt und analysiert werden [8]. Die erzielten Resultate sind vielversprechend, indem es gelang Monomethylamin, Dimethylamin und Trimethylamin herzustellen. Methylamine werden kommerziell aus Ammoniak gewonnen, wobei bei dieser Reaktion das thermodynamische Gleichgewicht die Bildung von Trimethylamin deutlich bevorzugt. Die mittels katalytischer Prozessführung erreichte Produktverteilung ist deshalb sehr interessant, da in der Industrie der Bedarf an Mono- und Dimethylamin sehr gross ist. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Wahl des Katalysators sowie die Zusammensetzung des Eduktgasgemisches für die Bildung der Amine, bzw. für die Unterdrückung der Bildung von Methanol, entscheidend ist.

ELEKTROLYTISCHE & PHOTOKATALYTISCHE REDUKTION VON CO₂

Die Reduktion von Kohlendioxid, d.h. die Umwandlung dieser Verbindung in wieder verwendbare Grundchemikalien, gewinnt in Anbetracht der gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Problematik an Bedeutung. In diesem Projekt wird die elektrolytische und photokatalytische Reduktion von Kohlendioxid untersucht [9]. Für das elektrolytische Verfahren konnten Stromdichten von 200 mA/cm² erreicht werden, ein Wert, der nahe demjenigen für die industrielle Wasserelektrolyse liegt. Das Problem der Desaktivierung des Elektrodenmaterials konnte soweit gelöst werden, dass zur Zeit während fünf Tagen kontinuierlich gearbeitet werden kann. Das wichtigste Ziel dieser Arbeiten, d.h. die kontrollierte Bildung von interessanten Produkten wie Ethylen oder Ethanol, etc., wurde durch Modifikationen der Kupfer-Elektrodenoberfläche weiter verfolgt. Es konnte gezeigt werden, dass das Aufbringen von Chrom- bzw. Zirkonoxiden die Bildung von Ethylen favorisiert.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die im Forschungsprogramm laufenden Projekte werden zur Zeit in sechs Institutionen bearbeitet (PSI Villigen; Univ. Basel; FC CONSULTING, Rickenbach; ETH-Zürich; Universität Zürich und *Université de Genève*).

Mit dem Projekt ABSORBER 2000 besteht eine programmübergreifende Zusammenarbeit (zusammen mit dem Programm **Aktive Solarnutzung & Wärmespeicherung**). Aufgrund der erarbeiteten Resultate laufen mit Industriebetrieben Zusammenarbeiten, die eine mittelfristige technische Realisierung der notwendigen prozess- und verfahrenstechnischen Ansätze realisieren werden. Zur Zeit werden Verhandlungen geführt, um die entscheidenden Verfahrensschritte patentrechtlich zu schützen.

Durch die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Reaktorsysteme sowie im Bereich der solar betriebenen Prozesse konnte vermehrt das Interesse von Industrieunternehmen geweckt werden. Erfreulicherweise ist festzustellen, dass die Forschungsarbeiten durchaus sog. *spin-off* -Funktionen liefern, was ein vielversprechendes Potential gerade für eine technische Umsetzung darstellt. So können z.B. die Pulverwolkenreaktoren in ganz anderen Bereichen wie der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, oder die materialwissenschaftlichen Untersuchungen im Sonnenofen für die Prüfung von Werkstoffen und Werkstücken Anwendung finden. Diese Ansätze werden nach Kräften weiterverfolgt.

Die internationale Zusammenarbeit wurde im Berichtsjahr weiter ausgebaut. Die Tatsache, dass der Programmleiter in einem EU-Land arbeitet, soll hinsichtlich möglicher Beteiligungen an europäischen Forschungsprogrammen ausgenützt werden. Es wurden ebenfalls Kontakte zur DECHEMA geknüpft, um die Koordination zwischen den schweizerischen und deutschen Aktivitäten betreffend Umsetzung der Forschungsergebnisse zu verbessern. Dies wird auch im Rahmen der IEA-Aktivitäten von Bedeutung sein.

Als wichtigste Partnerinstitutionen sind zu nennen:

- *Solar PACES, Solar Chemistry, International Energy Agency*
- Universität Hamburg, Institut für Anorganische und Angewandte Chemie
- DECHEMA, Deutsche Gesellschaft f. Chemisches Apparatewesen, Ch.-Technik & Biotechnologie, Frankfurt
- Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln
- *Plataforma Solar de Almeria (Spanien)*
- *Sandia National Laboratories, Albuquerque (USA)*
- *Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot (Israel)*
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

4. Umsetzung der Ergebnisse

Viele Arbeiten des Forschungsprogramms wurden an nationalen und internationalen Konferenzen und Symposien mit gutem Erfolg vorgestellt. Zu erwähnen sind insbesondere die Veranstaltungen *7th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Moskau, sowie das 421. DECHEMA-Kolloquium Solare Chemie und ihre Anwendungen, Frankfurt, an denen die Programmaktivitäten in Hauptvorträgen vorgestellt und diskutiert wurden. Darüberhinaus wurden Gespräche mit Industrievertretern geführt, die in kurzer Zeit zu engen Zusammenarbeiten und dementsprechend zu Umsetzungen der Resultate führen werden.

5. Ausblicke für 1995

Die grundlagenwissenschaftlichen Arbeiten werden mit den experimentellen Untersuchungen an den potentiell wichtigen Stoffsystemen weiter koordiniert und vertieft. Da die nationalen Aktivitäten im Hochtemperaturbereich - insbesondere in bezug auf chemische Prozesse - auf internationaler Ebene einen gut etablierten und anerkannten Stand erreicht haben, muss in diesem Bereich eine internationale Zusammenarbeit gefördert werden. Dies beinhaltet einerseits die Planung und Durchführung von Experimenten an Grossanlagen, andererseits konzeptionelle Studien betreffend des Einsatzes von experimentell belegten Verfahren wie der solar betriebenen Metalloxidreduktion im industriellen Bereich.

Die Realisierung der Wasserspaltung mittels Redoxprozessen an Metalloxidsystemen erfordert weitere Optimierungsarbeiten, insbesondere seitens der verfahrenstechnischen Infrastruktur. Da der Kreisprozess an sich funktioniert, müssen nun Reaktorsysteme dahingehend modifiziert und optimiert werden, dass der Hochtemperaturprozess, also vor allem die thermochemische Reduktion des Metalloxids, im Dauerbetrieb eingesetzt werden kann, bzw. die Konstruktion einer Pilotanlage geplant werden kann.

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 bzw. dem ENET entnommen werden.

7. Liste der Projekte

- [1] H.R. Tschudi, PSI, Villigen : *Simultane Messung der Verteilung, Emissivität, Temperatur und Beleuchtungsstärke an beleuchteten, heissen, matten Oberflächen.* (JB)
- [2] M. Schubnell, PSI, Villigen : *Absolute Bestimmung des chemischen Potentials angeregter Moleküle aus Lumineszenzmessungen.* (JB)
- [3] P. Oelhafen, R. Gampp, P. Gantenbein, R. Steiner, UNI - Basel : *Optische Schichten für die thermische Konversion von Solarenergie.* (JB)
- [4] P. Kuhn, K. Ehrensberger, P. Hug, PSI, Villigen & UNI - Zürich : *Kinetische Untersuchungen an Redoxprozessen von Metalloxiden zur Speicherung konzentrierter Solarstrahlung.* (JB)

- [5] A. Steinfeld, W. Durisch, PSI, Villigen : *Entwicklung und Untersuchung von Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung.* (JB)
- [6] H. Fricker, FC CONSULTING, Rickenbach : *KEREK.*
- [7] P. Hug, H. 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)
- [8] R. Köppel, A. Baiker, ETH - Zürich : *Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen CO₂-Quellen.* (JB)
- [9] J. Augustynski, UNI - Genève : *Réduction électrolytique et photocatalytique du bioxyde de carbone.* (JB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

BIOMASSE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Martin Hinderling



Grünabfälle als Biogasrohstoff

In der Pilot-Biogasanlage Lully wurden 350 t/a Mist gemeinsam mit 50 t/a Grünabfällen (*im Bild vorne*) aus Einkaufszentrum vergoren. Daraus resultierten 26'000 m³/a Biogas sowie vergorene Abfälle, die nach einer Zwischenlagerung (*im Bild hinten*) zum Austragen auf die Felder bereit waren.

1. Programmziele für 1994

Das Forschungsprogramm Biomasse (Holz, Pflanzen, organische Abfälle aller Art) befasst sich zum kleinen Teil mit dem Ernten, Einsammeln und Aufbereiten der Biomasse, zum grossen Teil mit deren Umwandlung in Energie.

Die Programmziele für 1994 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Konkurrenzfähigkeit der Holzheizung im Vergleich zu fossilen Heizungen weiter vorantreiben
- Pilotanlage Altholzverbrennung mit NO_x -Reduktion mittels nicht-selektiver katalytischer Reduktion realisieren
- weiter an der Entwicklung von Holzvergäsern arbeiten, zur motorischen Nutzung des produzierten Gases
- Pilotanlagen bauen und erproben zum separaten oder gemeinsamen Vergären von Abfällen verschiedener Herkunft
- Abklärungen im Zusammenhang mit energetisch sinnvoller Nutzung nachwachsender Rohstoffe .

2. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Resultate

BEREITSTELLUNG VON BIOMASSE

Das Projekt *Untersuchung über die nachhaltig nutzbare Energieholzmenge, Bewirtschaftungs- und Erntemethoden in Niederwäldern* [1] ermittelt aufgrund von Literaturrecherchen und Ernteversuchen die nachhaltig nutzbare Biomasse aus Niederwaldbewirtschaftung. Erste Ergebnisse sind 1995 zu erwarten.

Beim Projekt *Vergleich der Wertschöpfung der Mittelwaldbewirtschaftung und Niederwaldbewirtschaftung mit der Wertschöpfung aus Hochwaldbewirtschaftung, durchgeführt anhand ausgewählter Standorte* [2] geht es darum, eine Grundlage für den Entscheid zu erarbeiten, welche Betriebsarten bei Laubholzstandorten im Mittelland zu wählen sind.

UMWANDLUNG VON BIOMASSE

a) *Verbrennung und Vergasung von Holz, Altholz und Altpapier*

Im Projekt *Altholzfeuerung mit Entstickung, Phase 2* [3, 4] untersuchte man bei einer 450 kW-Vorschubrostfeuerung 3 Regelkonzepte zur Eindüsung der Harnstofflösung. Die Steuerung der Reduktionsmittelmenge in Funktion der Leistung ist einfach zu realisieren und zweckmässig bei gleichbleibendem Stickstoffgehalt im Brennstoff. Bei schwankendem Stickstoffgehalt empfiehlt sich die allerdings aufwendige Regelung des NO_x -Gehaltes im Reingas. Im ersten Fall ist eine NO_x -Reduktion um 60 - 70%, im zweiten Fall um 70 bis 80% möglich. Das Projekt läuft bis Ende 1995.

Eine moderne *Klein-Holzfeuerung mit fuzzy-Regler* [5] soll nachweisen, dass mit dem Einbau einer effizienten Regelung in "fuzzy-Technik" die Schadstoffemissionen der Feuerung reduziert, der Wirkungsgrad erhöht und der Bedienungsaufwand verringert werden kann. Messdaten werden im Frühjahr 1995 vorliegen.

Im Projekt *Analyse und Optimierung der Holz-Durchbrandfeuerung* [6] wurden Abbrandverhalten und Modifikationsmöglichkeiten der Brennkammer untersucht. Es zeigte sich, dass die Holz-Durchbrandfeuerung bei richtigem Benutzerverhalten und der Anwendung von Modifikationen noch heute ihre Berechtigung hat.

Das Projekt **Warmluftofen mit automatischer Schnitzelfeuerung** [7] bezweckte eine Verbrennungsoptimierung mittels automatischer Brennstoffzuführung. Von drei verschiedenen Verbrennungssystemen schwang die Unterschubverbrennung obenaus. In bezug auf die Wärmeübertragung bewährte sich der Röhrentauscher im Gegen-Kreuzstromprinzip.

Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen [8] stellen einen neuen, zunehmend wichtigen Einsatzbereich für Holz als Energieträger im Wohnhausbereich dar. Das Projekt bezweckt, solche Heizsysteme technisch und kostenmässig zu optimieren sowie Grundlagen für Planung und Ausführung zu erarbeiten. Im Berichtsjahr wurden erste Messungen an Praxisanlagen durchgeführt und der Versuchsbetrieb in einer Laborhalle aufgenommen.

Mit dem Projekt **Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen** [9] wurde eine von dritter Seite finanzierte 110 kW-Pilotanlage mit Abgaskondensation realisiert und im Betrieb getestet. Es zeigte sich, dass bei der Verbrennung von Grünschnitzeln deren energetischer Minderwert (von 5 bis 7%) durch die Abgaskondensation mehr als kompensiert werden kann (netto + ca. 10%).

Mit der **Optimierung des Abscheideverhaltens von HCl, SO₂ und Dioxine/Furanen in einem Gewebefilter nach einer Altholzfeuerung** [10] wird das Abscheideverhalten von Schadstoffen in einem Gewebefilter nach einer Altholzfeuerung charakterisiert. Durch Optimierung der Betriebsbedingungen im Filter sollen bei minimalem Sorptionsmittelverbrauch möglichst hohe Abscheidegrade erzielt werden.

Ziel des NEFF-Projektes **Der JUCH-Vergaser, die praktische Anwendung der Holzvergasung** [11] ist es, den Holzvergaser JUCH für Dauerbetrieb auszulegen und die dafür geltenden Rahmenbedingungen bezüglich der Brennstoffeigenschaften, der Gaszusammensetzung sowie der erforderlichen Systeme zur Gasreinigung und zur Entsorgung der Nebenprodukte festzulegen.

Im Projekt **Gazogènes à bois** [12] war ein Testvergaser einem Gaskessel zu Heizzwecken vorgeschaltet und wurde in einem mehrwöchigen Dauerbetrieb geprüft. Der Vergaser, nach dem Gleichstrom-Prinzip gebaut, erzeugte ein Gas, das weitgehend teer- und partikelfrei und bezüglich Heizwert für die motorische Anwendung geeignet war. Erfahrungen mit Gasreinigung und motorischer Anwendung sind bisher nicht vorhanden.

Das Projekt **Testuntersuchungen an einem Holzvergaser** [13] bezweckte die Durchführung eines Messprogrammes im *Indian Institute of Science* in Bangalore. Ausgemessen wurde ein sog. *open-core* Gleichstrom-Vergaser mit einer (*Input*-)Leistung von 300 kW. Der Vergaser erwies sich als betriebssicher und produzierte teer- und partikelfreies Gas. Ob dieses Gas für die motorische Nutzung geeignet ist, wird in einer zweiten Projektphase untersucht.

b) Vergärung von Tier- und Pflanzenabfällen

Die sich ergänzenden Projekte **Systeme modulaire de méthanisation en discontinu** und **Méthanisation en discontinu de déchets ménagers** [14] sind im Berichtsjahr abgeschlossen worden und haben den Nachweis erbracht, dass die Co-Vergärung von "Grünabfällen" zusammen mit Mist bis zu einem Mischvolumen von 1:1 und bis zu 700 Jahrestonnen technisch möglich ist (vgl. Titelbild).

Im Rahmen des Projektes **Semikontinuierliche Vergärung von strohhaltigem Mist** wurde zunächst eine Demonstrationsanlage zur Biogasproduktion aus Festmist erstellt. Diese Arbeiten sind abgeschlossen und publiziert [15]. Die realisierte Anlage zeichnet sich durch Betriebssicherheit und Prozess-Stabilität aus; der Energiertag ist gut. Im 2. Projektteil [16] folgte der Bau der Pilotanlage "Gärkanal". Eingehende Versuche wurden auch an diesem System durchgeführt. In einem Schlussbericht sollen beide Anlage-Systeme einander gegenübergestellt werden.

Phase 1 des Projektes **Kleine, schlüsselfertige Biogasanlage** betraf die baureife Planung einer Standard-Kleinbiogasanlage für den typischen landwirtschaftlichen Familienbetrieb. In Phase 2 [17] soll nun bei einem Kaufinteressenten im Kanton St. Gallen eine Pilotanlage erstellt werden.

c) *Vergärung organischer Siedlungs- und Industrieabfälle*

Die *Etude de critères permettant l'évaluation des systèmes de méthanisation des déchets organiques ménagers, industriels, et des vieux papiers, en Suisse* (ECOBIOGAZ) [18] entwickelt anhand von 4 Szenarien im Kanton Waadt ein Instrument, womit die Gemeinwesen jenen Anlagentyp zum Vergären von organischen Abfällen bestimmen können, der je nach Art und Grösse eines bestimmten Entsorgungsgebietes energetisch, ökonomisch und ökologisch am günstigsten ist.

In der Biogasanlage der INFOENERGIE-Tänikon sind Versuche zur **Vergärung von häuslichen Abfällen im ländlichen Raum** [19] angelaufen. Sie dienen der Entwicklung und Erprobung eines Anlagekonzeptes zum gemeinsamen Vergären von Grünabfällen und Mist mit einer Jahreskapazität von 2'000 t. Dieses Projekt und die oben genannte Etude ergänzen sich gegenseitig.

Im August 1994 ist in Baar die **Regionale Kompostier- und Vergäranlage "Allmig"** in Betrieb genommen worden [20]. Sie stellt eine Neukonzeption und Nachrüstung der bestehenden Anlage dar, die infolge von Geruchsproblemen nicht mehr genügen konnte. Die Neuanlage verarbeitet das Grüngut aus derzeit 14 Gemeinden mit 110'000 Einwohnern.

Im Projekt **Kompogas-Prozess** [21] konnte mit Tracer-Versuchen das pfpfroststromartige Verweilzeitverhalten des Kompogas-Fermenters bestätigt werden. Aufgrund der Erkenntnisse von Versuchen im Zusammenhang mit der Behalt. ilung des Wasserüberschusses wurde ein Dekanter und eine aerobe biologische Abwasserreinigung eingesetzt. Die Kompostuntersuchungen belegen, dass sich der durch Vergärung gewonnene Kompost qualitativ nicht von herkömmlichem Kompost unterscheidet.

Das Projekt **Kompo-Mobil** [22] hat zum Ziel, einen dieselbetriebenen Lastwagen und einen bezinbetriebenen Lieferwagen auf Biogasbetrieb umzustellen. Neben dem eigentlichen Umbau der Motoren steht die Evaluation und der Test von technischen Apparaten zur Gasreinigung, Kompression und Lagerung des Biogases im Vordergrund.

Im Rahmen des Projektes **Zweistufige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen, Phase III** [23] konnte gezeigt werden, dass es im Batchbetrieb möglich ist, in weniger als 5 Tagen feste biogene Abfälle (im Versuch vor allem gewerbliche biogene Abfälle) praktisch vollständig zu hydrolisieren und hohe Gasausbeuten zu erzielen.

Das NEFF-Projekt **Untersuchungen zur Vergärung von festen biogenen Abfällen in den Faultürmen von kommunalen Kläranlagen** [24] wird, nach Abschluss der Etappe "ARA Frutigen", in der ARA Knonau (Aufbereitung von Speiseresten) und in Maschwanden (Schlammqualität und Hygiene) weitergeführt.

d) *Energiepflanzen*

Das Projekt **Energiegras / Feldholz** wird in neun Teilbereichen [25-33] abgewickelt:

Das Teilprojekt **Energiegras** [25] soll darüber Aufschluss geben, welche Wiesentypen und Ackerflächen sich für die extensive Erzeugung energetisch nutzbarer Biomasse eignen. Die Erträge der zweijährigen Chinaschilf-Pflanzungen lagen bei 10 t Trockensubstanz pro Hektar.

An sieben verschiedenen Standorten in sechs Kantonen wurde die Wachstumsentwicklung von **Feldholz** [26] weiterverfolgt. Diese 1992 / 93 gepflanzten Feldholzflächen sollen nach einigen Jahren Beispiele ökologischer Ausgleichsflächen mit energetischer Nutzung darstellen. Gemische schnellwachsender Baumarten vermögen auf nicht zu armen Böden bereits im 2. und 3. Jahr nach der Pflanzung beachtliche Biomasse zu bilden.

Ziel des Teilprojektes **Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz** [27] ist es aufzuzeigen, welche Anlagentechnik im Bereich von 0.5 bis 1 MW thermischer Leistung zur Energieerzeugung durch Verbrennen und Vergasen von Gras, Miscanthus und Feldholz zur Verfügung steht. Im Berichtsjahr wurden

Verbrennungsversuche mit Pellets und Briketts aus landwirtschaftlichen Brennstoffen auf Rostfeuerungen und Vergaserversuche mit biogenen Brennstoffen in Festbettvergasern durchgeführt. Die Feststoffemissionen bei der Verbrennung von Gras und Miscanthus erfordern den Einsatz von Gewebe- oder Elektrofilter.

Im Projekt **Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung** [28] wurden im Labor- und halbtechnischen Massstab biologische Grundlagenversuche durchgeführt. Es steht fest, dass sich verschiedene Verfahren für die Vergärung von Energiegras eignen. Welches Verfahren am ehesten in Frage kommt, ist noch offen.

Im Teilprojekt **Regionale Bewirtschaftung von Energiegras und Feldholz** [29] die Güter- und Stoffflüsse (Elemente C, N, P) der Biomassewirtschaft für eine durchschnittliche schweizerische Mittellandregion berechnet. Die bestehenden Biomasseflüsse wurden verglichen mit denjenigen, die sich aus dem Anbau von nachwachsenden Energieträgern (Gras, Feldholz, Chinaschilf, Wald) auf je 5% der landwirtschaftlichen Nutzfläche ergeben würden.

Die Daten zur **Ökobilanz** [30] wurden aktualisiert. Die Methode zur ökologischen Bewertung der Energiegewinnung wurde um 2 wichtige Bewertungskriterien ergänzt (Artenvielfalt und Boden). Es bestehen erste Vorschläge, um Prozesslinien-Szenarien als Grundlage für die weitere Arbeit des Gesamtprojektes festzulegen.

Wie das Teilprojekt **Ökonomie** [31] nachweist, ist die Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energien im Vergleich zur konventionellen Agrarproduktion gering. Eine (geplante) 1.2 MW-Pilotanlage zum Verbrennen von Energiegras und Holz weist wesentlich höhere Investitionskosten auf als eine vergleichbare fossile Verbrennungsanlage.

Das Teilprojekt **Logistik** [32] will geeignete Ernte-, Transport-, Aufbereitungs- und Lagerverfahren unter Berücksichtigung des Anlagestandortes, der Brennstoffqualität und eines möglichst geringen Energieaufwandes bereitstellen. Die Verfahren sollen bei Bau und Betrieb der geplanten Pilotanlage Verwendung finden.

Im Teilprojekt **Projektmanagement** [33] bildeten Koordinations- und Öffentlichkeitsarbeit sowie Planungsarbeiten für eine Pilotanlage die Arbeitsschwerpunkte.

Das Projekt *Digestion en discontinu d'herbes énergétiques* (Batchgras) [34] soll in einer Biogas-Pilotanlage in Lully die Resultate von Batchversuchen erhärten, die labormässig bei INFOENERGIE-Tänikon gefunden worden sind. Des weitern werden die Biogausbeute und die Energiebilanz in Abhängigkeit der Graslagerung und -konditionierung untersucht. Als Energiegras dienen Gemische von Festmist mit Gras, Silogras und Heu.

Die **Bioenergie-Produktionsanlage** [35] produziert seit Mitte 1994 aus Ölsaaten pflanzliche technische Öle, Schmierstoffe und Treibstoffe. Die Produkte werden für Versuchszwecke verkauft.

Beim *Projet de transformation de colza en carburant pour moteurs diesel, à Etoy* [36] handelt es sich um eine Demonstrationsanlage, in der jährlich 3'000 t Rapsschrot, gewonnen von 1'000 ha Ackerfläche, zu 1'000t Rapsmethylester (RME) bzw. Biodiesel verarbeitet werden.

SYSTEME

Ziel des Projektes **Methanol aus Biomasse (Biometh)** [37, 38] ist, die technische und wirtschaftliche Machbarkeit einer Demonstrationsanlage für Methanolproduktion aus Biomasse-Abfällen im technischen Massstab (100 Tagestonnen Trockenmasse) abzuklären. Eine erste Zwischenbilanz hat ergeben, dass mit unbelastetem Holz die Anlage nicht kostendeckend betrieben werden könnte. Die Projektarbeiten konzentrierten sich in der Folge auf ein kostengünstiges, aber mit Schadstoffen belastetes Abfallsortiment.

EINZELPROJEKTE

Der beim Vergären von organischen Abfällen entstehende Kompost kann nach geeigneter Aufbereitung als Torfersatz dienen. Zu diesem Zweck müssen ihm Holzfasern beigemischt werden. Das Projekt *Optimisation énergétique de la défibrillation du bois par un traitement biologique, en vue de la production d'amendements* [39] sucht diese Fasern auf einem neuen, energiesparenden Weg herzustellen: Spezifische Pilzkulturen sollen das Holz-Lignin abbauen.

Eine Machbarkeitsstudie legt die wissenschaftlich-technischen Grundlagen, die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit der Produktion von **Ethanol aus Biomasse** [40] dar. Die vorgeschlagenen Produktionsanlagen könnten mit relativ bescheidenen Flächenbeiträgen wirtschaftlich selbsttragend betrieben werden.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Zusammenarbeit fand mit praktisch allen landwirtschaftlichen Forschungsstellen statt, mit dem BUWAL, mit verschiedenen Instituten der Eidgenössisch Technischen Hochschulen, mit den Institutionen Koordinationsgruppe Nachwachsende Rohstoffe, IG BIO-ROHSTOFFE Schweiz, Schweiz. Bauernverband SBV, Genossenschaft Biomasse-Technologie GSB, Verband Schweiz. Hafner- und Plattengeschäfte, DIANE ; zahlreiche Firmen haben sich an der Durchführung der Forschungsprojekte beteiligt, indem sie Apparaturen und Geräte beisteuerten oder organische Abfälle zulieferten: u.a. AEBI MASCHINEN, HEGNER, MÜLLER, SAURER, SCHMID, TIBA, YGNIS, diverse Gärtnereien und Gemüsehändler sowie die MIGROS.

Die Schweizer Delegierten des IEA-Programms für die Bereiche Verbrennung, Vergasung und Vergärung haben wiederum wesentlich zum Erfahrungsaustausch in "beiden Richtungen" beigetragen: Information im Ausland über die schweizerischen Forschungsprojekte, Berichterstattung im Inland über interessante ausländische Entwicklungen.

4. Umsetzung in die Praxis und P + D - Projekte

Zahlreiche Publikationen sind erschienen, zahlreiche Vorträge anlässlich von Tagungen, landwirtschaftlichen Messen, Anlagebesichtigungen etc. sind gehalten worden. Im Oktober fand das 3. Holzenergie-Symposium statt, mit einer Beteiligung von 300 Fachleuten aus dem In- und Ausland, nicht zuletzt aus dem Sektor Industrie. Zu erwähnen ist auch das Vergaser-Seminar in Châtel-St-Denis im Juni, organisiert vom *Centre de Compétence Châtel-St-Denis*.

Etwas willkürlich seien einige konkrete Praxis-Resultate hervorgehoben: Mit dem Abschluss des Projektes SNCR-Verfahren zur Stickstoffminderung bei Holzfeuerungen liegen verlässliche Daten über die Leistung dieser Technologie vor. Es sind aber noch keine Langzeiterfahrungen vorhanden, so dass in bezug auf neue (verschärfte!) Stickstoff-Emissionslimiten Vorsicht geboten ist. Die demonstrierte Abgaskondensation von Grünschnitzelfeuerungen dürfte gute Marktchancen haben. Wichtige Erkenntnisse sind gewonnen worden in bezug auf die Gewebefilter-Technik bei einer Altholzfeuerung (u.a. Aspekte Dioxin, Furane). Recht optimistisch darf man sein betreffend die weitere Entwicklung der kleinen Holzvergaser für motorische Gasnutzung. Ein Rückschlag ist zu verzeichnen beim Projekt Energiegras/Feldholz, indem "in letzter Minute" die geplante Pilotanlage im Kanton Zürich aus Spargründen aus dem Budget gestrichen wurde. Im übrigen geht das Projekt Energiegras/Feldholz, gewissermassen ein Unterprogramm des Programmes Biomasse, regulär und plangemäss weiter (Abschluss 1996).

5. Beurteilung 1994 und Perspektiven für 1995

Die Anzahl der Forschungsprojekte ist im Vergleich zum Vorjahr etwa gleich geblieben (rund 35 Projekte). Die P+D-Projekte, deren wichtigste im Bericht erwähnt sind, nahmen zahlenmässig weiter zu (rund 20 Projekte). Im grossen ganzen wurde das Programm 1994 wie geplant durchgeführt und die gesteckten Ziel erreicht.

Im Bereich Verbrennung wird es auch im neuen Jahr weiterhin in Richtung "billiger, sauberer, effizienter" gehen; im Bereich Vergasung ist die Weiterentwicklung von motorisch nutzbarem Gas wichtig; im Bereich Vergären steht v.a. die Kostensenkung im Vordergrund; im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe schliesslich ist zu hoffen, dass im zweiten Anlauf ein geeigneter Standort für eine Pilotanlage Energiegras/Feldholz gefunden werden kann.

6. Projektliste

- [1] F. Schnider, AMBIO, Zürich : *Untersuchung über die nachhaltig nutzbare Energieholzmenge, Bewirtschaftungs- und Erntemethoden in Niederwäldern.* (JB)
- [2] B. Bally, AMBIO, Zürich : *Vergleich der Wertschöpfung der Mittelwaldbewirtschaftung und Niederwaldbewirtschaftung mit der Wertschöpfung aus Hochwaldbewirtschaftung, durchgeführt anhand ausgewählter Standorte*
- [3] R. BÜHLER, Maschwanden : *Altholzfeuerung mit Entstickung, Phase 2.* (JB)
- [4] J. GOOD, T. NUSSBAUMER, R. BÜHLER, A. JENNI, Maschwanden : *SNCR-Verfahren zur Stickoxidminderung bei einer Holzfeuerung.* (SB, kurz und ausführliche Fassung, ENET 9010013 / 16)
- [5] P. Schweizer, PASOL, Liestal : *Klein-Holzfeuerung mit fuzzy-Regler.* (JB)
- [6] C. Gaegauf, M. Scheuble, ÖKOZENTRUM-Langenbruck : *Analyse und Optimierung der Holz-Durchbrandfeuerung.* (SB)
- [7] H. P. Schaffner, SCHMID, Eschlikon : *Warmluftofen mit automatischer Schnitzelfeuerung.* (SB)
- [8] P. Siegl & K. Imbach, AG HYPOKAUSTEN-HEIZUNGEN, Weesen : *Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen.* (JB)
- [9] M. Wiget, IEU, Liestal, Th. Nussbaumer, VERENUM, Zürich & F. STEIGER, Liestal : *Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen.* (SB)
- [10] P. Hasler, VERENUM, Zürich : *Optimierung des Abscheideverhaltens von HCl, SO₂ und Dioxien / Furanen in einem Gewebefilter nach einer Altholzfeuerung.* (JB)
- [11] P. Juch, A. Fürst, HTV, Gunzgen : *Der Juch-Vergaser, die praktische Anwendung der Holzvergasung .* (SB)
- [12] L. Jaccard, ENSOFOR, Curio : *Gazogènes à bois, extension.* (SB)
- [13] H. Sharan, DASAG, Seuzach : *Testuntersuchungen an einem Holzvergaser des IISc.* (SB)
- [14] Y. Membrez, EREP, Aclens : *Système modulaire de méthanisation en discontinu / Méthanisation en discontinu de déchets ménagers.* (SB, ENET 8900653/3)
- [15] U. Baserga, K. Egger, A. Wellinger, INFOENERGIE - Tänikon : *Entwicklung einer Pilotanlage (Anacom) zur Vergärung von Festmist.* (SB, ENET 30202)
- [16] U. Baserga, INFOENERGIE - Tänikon: *Semikontinuierliche Vergärung von strohhaltigem Mist.* (JB)
- [17] K. Egger, INFOENERGIE - Tänikon : *Kleine, schlüsselfertige Biogasanlage, Phase II.* (JB)

- [18] Y. Membrez, EREP, Aclens : *Etude de critères permettant l'évaluation des systèmes de méthanisation des déchets organiques ménagers, industriels, et de vieux papiers, en Suisse.* (JB)
- [19] K. Egger, U. Meier, INFOENERGIE - Tänikon : *Vergärung von häuslichen Abfällen im ländlichen Raum.* (JB)
- [20] H. Brotschi, A. MÜLLER, Baar : *Regionale Kompostier- und Vergäranlage "Allmig".* (JB)
- [21] H. ENGELI, Bülach : *Kompogas-Prozess.* (SB)
- [22] K. Egger, INFOENERGIE-Tänikon : *Kompo-Mobil.* (JB)
- [23] M. Gradenecker, W. Edelmann, ARBI, Maschwanden : *Zweistufige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen, Phase III.* (JB)
- [24] W. Edelmann, ARBI, Maschwanden : *Untersuchungen zur Vergärung von festen, biogenen Abfällen in den Faultürmen von kommunalen Kläranlagen.* (JB)
- [25] V. Mediavilla, J. Lehmann, E. Meister, FA-Reckenholz : *Energiegras /Feldholz: Energiegras.* (JB)
- [26] J. Rüegg, FA-Wädenswil : *Energiegras/Feldholz: Feldholz.* (JB)
- [27] T. Nussbaumer, ETH-Zürich : *Energiegras/Feldholz: Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz.* (JB)
- [28] U. Baserga, INFOENERGIE - Tänikon : *Energiegras/Feldholz: Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung.* (JB)
- [29] P. Baccini, D. Müller, W. Obrist, D. Oehler, EAWAG - Dübendorf : *Energiegras /Feldholz: Regionale Bewirtschaftung von Energiegras und Feldholz.* (SB)
- [30] B. Jans, CARBOTECH, Zürich : *Energiegras /Feldholz - Ökobilanz.* (JB)
- [31] T. Trauboth, FA-Tänikon : *Energiegras /Feldholz - Ökonomie.* (JB)
- [32] J.-L. Hersener, FA-Tänikon, *Energiegras /Feldholz - Logistik.* (JB)
- [33] J.-L. Hersener, FA-Tänikon : *Energiegras /Feldholz - Projektmanagement.* (JB)
- [34] Y. Membrez, EREP, Aclens : *Digestion en discontinu d'herbes énergétiques (Batchgras).* (JB)
- [35] U. C. Knopf, AGROGEN, Freiburg : *Bioenergie-Produktionsanlage für pflanzliche technische Öle, Schmierstoffe, Treibstoffe.*
- [36] P.A. Tardy, CHAMBRE VAUD. AGRICULTURE, Lausanne : *Transformation de colza en carburant pour moteurs diesel à Etoy.* (JB)
- [37] J. Leuenberger, S. Stucki, PSI - Villigen : *Methanol aus Biomasse (Biometh).* (JB)
- [38] P. Hasler, T. Nussbaumer, R. Bühler, VERENUM / ENERGIE + UMWELT, Zürich : *Vergasung von Biomasse für die Methanol-Synthese.* (SB, ENET 30205)
- [39] M. Aragno, UNI-Neuchâtel : *Optimisation énergétique de la défibrillation du bois par un traitement biologique, en vue de la production d'amendements.* (SB)
- [40] S. GRASS, Zürich : *Techn. & wirtschaftl. Machbarkeit der Produktion von Ethanol aus Gras.* (SB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

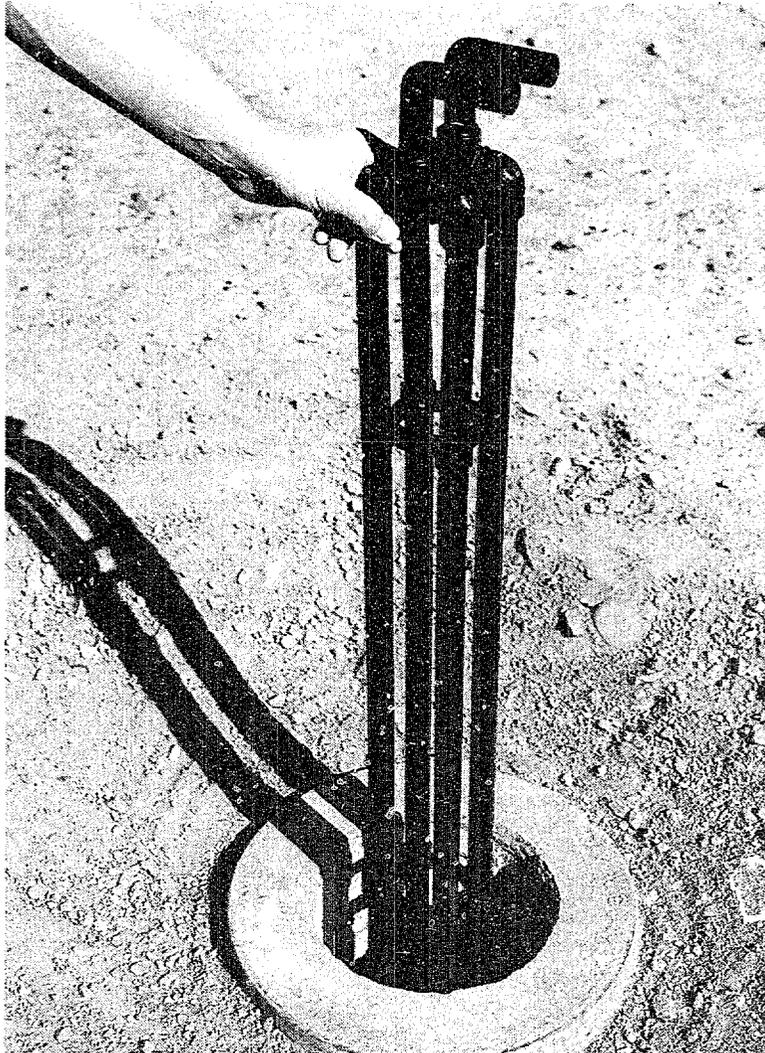
(SB) Schlussbericht vorhanden

GEO THERMIE

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Harald L. Gorhan



Energiepfahl in Altendorf

Bestücken des 23 m tiefen Pfahlhohlraumes eines Schleuderbeton-Rammpfahles (\varnothing 17-25 cm) mit der vorfabrizierten PILO THERM-Sonde der Fa. LIDWIL. Pro Laufmeter Pfahlnutzlänge kann aus dem Untergrund ca. 50 Watt Wärme- oder Kälteleistung gewonnen werden.

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1994

Auf Grund der dürftigen Erfolgsrate bei den geothermischen Tiefbohrungen, wurde die Forschung auf diesem Gebiet vorläufig auf Sparflamme gestellt. Nur ein Projekt beschäftigt sich mit dem Thema betreffend einer möglicher Verbilligungen von Tiefbohrtechniken.

Die Schwergewichte wurden auf das Gebiet der **untiefen Geothermie** bzw. auf eine mögliche Verbesserung der Energiebilanz von **tiefen Erdwärmesonden** gelegt.

Des weiteren war geplant, im Jahr 1994 ein Forschungsprojekt zur **Wärmenutzung geothermischer Energie aus Tunnels und Stollen** zu lancieren. Dies mit der Absicht, die Realisierung eines grösseren P&D-Projektes gleichen Titels in sehr gezielter Form zu unterstützen und damit zu energetisch optimalen Lösungen zu verhelfen. Aus budgetären Gründen musste jedoch der Beginn von beiden Projekten auf 1995 verschoben werden.

Basierend auf einen diesbezüglichen Workshop im Frühjahr 1994, auf einige vielversprechende, theoretische Vorstudien sowie auf die erfolgreiche Realisierung der Wärmeversorgung der Gomsen Gemeinde Oberwald (Wässer aus dem Furka-Tunnel), wurde der Nutzung von Tunnelwässern sowohl in der Forschung als auch in der Förderung **eine hohe Priorität** eingeräumt. Damit sollte es gelingen, möglichst rasch weitere Anlagen vom Typ Oberwald zu identifizieren bzw. tatsächlich auszuführen, um - gewissermassen als Ersatz zur eingangs erwähnten Tiefengeothermie - dennoch einen nennenswerten Beitrag zur ENERGIE 2000 zu liefern.

Tatsächlich konnten in diesem Zusammenhang bereits einige wichtige Forschungsbedürfnisse identifiziert werden, die anfangs kommenden Jahres zu einem Forschungsauftrag gebündelt werden sollen. In diesem Sinne wird also sichergestellt, dass hier nicht Forschung zum Selbstzweck wird!

Eine Besichtigung der **Hot Dry Rock-Anlage** in Soultz-sous-Forêt (Elsass) im Herbst 1994 hat gezeigt, dass diese Anlage knapp vor einem Probetrieb steht. Es konnte bereits heisser Wasserdampf in beachtlichen Mengen gefördert werden. Nach Fertigstellung dieser Anlage, wird eine installierte Leistung von ca. 20 MW_{elektr.} anvisiert. Natürlich soll dabei auch die Wärme für Heizzwecke genutzt werden.

Endgültigen Ergebnisse aus **Zirkulationstests zwischen Injektions- und Produktionsbohrungen** werden auf 1995 erwartet. Eine Gruppe von Elektrizitätsgesellschaften (*Électricité de Strasbourg*, ENEL, Pfalzwerke, Badenwerk) verfolgen mit grossem Interesse die Entwicklung dieser geothermischen Nutzungstechnologie zur Stromproduktion.

2. 1994 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

In der Berichtsperiode waren insgesamt sieben Forschungsprojekte in Arbeit, wobei die Schlussergebnisse von fünf Arbeiten erst im kommenden Jahr vorliegen werden.

AQUIFERBEWIRTSCHAFTUNG

Bei der Förderung mit mehreren Anlagen aus demselben Aquifer ist eine gegenseitige Beeinflussung von Förderbrunnen grundsätzlich in Betracht zu ziehen. Für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage ist von zentraler Bedeutung, ob die Temperatur des geförderten Wassers über einen genügend langen Zeitraum konstant bleibt, oder ob kühleres Infiltrationswasser die Bohrung schon nach kurzer Zeit erreicht.

Es konnte gezeigt werden, dass dreidimensionale Änderungen von Parametern einen starken Einfluss auf die durch die Förderung verursachten Temperaturen im Aquifer ausüben. Bei einem konkreten Fall, d.h. bei den Anlagen Kloten und Bassersdorf, lassen die günstigen Randbedingungen hingegen auch bei Zeiträumen von einigen hundert Jahren keinen Temperaturabfall des Förderwassers erwarten [3].

UNTIEFE GEOTHERMIE

Ein Vergleich von drei verschiedenen Erwärmesonden-Typen hat gezeigt, dass doppelte U-Rohre etwas höhere Wärmeleistungenerbringen als eine einfache Koaxialsonde mit zentralem Steigrohr [4].

Koaxial-Sonden, mit mehrfachen Rohleitungen an der Bohrlochwand und einem zentralen Steigrohr, führen zu einer geringfügigeren Leistungssteigerung im Vergleich zu den doppelten U-Rohren. Allerdings wird dieser Gewinn durch die erhöhten Kosten dieses Sondentypes wieder wettgemacht.

Bezüglich Sondentiefen von 100 m oder 200 m, zeigen vergleichende Modellrechnungen keinen verbesserten Wirkungsgrad bei den doppelten U-Rohren, da sich bei grösseren Tiefen bereits Druckverluste negativ auf die Energiebilanz bemerkbar machen (grösserer Strombedarf der Umwälzpumpe). Diese rein theoretischen Berechnungen sollen demnächst durch effektive Feldversuche verifiziert werden.

Auf Grund des verspäteten Projektbeginnes einer Studie über die Einsatzmöglichkeiten von Erwärmesonden in Karstgebieten des Kantons Jura, sind noch keine konkreten Ergebnisse vorhanden [5].

Dank der beachtlich hohen Dichte an Erwärmesonden in der Schweiz (ca. 10'000 Sonden), gilt es auch deren Gefahrenpotential auf das Grundwasser infolge mechanischer Gebrechen Beachtung zu schenken [6].

Mechanische Beschädigungen können zum Beispiel durch Hangrutsche bzw. quellfähige Gesteinsformationen hervorgerufen werden, wodurch die mit Frostschutzmittel versehenen Wärmeträgerflüssigkeiten das Grundwasser kontaminieren können. Das gilt im Speziellen für ältere Anlagen, die noch ohne behördlicher Kontrolle erstellt wurden. Aus diesem Grunde werden nun die Zusammensetzung der genannten Fluida und deren Migrationseigenschaften ermittelt.

Des weiteren besteht speziell bei tieferen Sonden die Gefahr von hydraulischen Kurzschlüssen zwischen verschiedenen Aquiferen. Da meist aus Kostengründen ohne Kerngewinnung gebohrt wird, sind derartige Kurzschlüsse oft nicht klar ersichtlich.

TIEFE ERDWÄRMESONDEN

Im Jahre 1991 wurde ein Schweizer Patent zur Nutzung geothermischer Ressourcen erteilt. Im Speziellen zielt dieses Patent auf die Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit am untersten Teil einer tiefen Erwärmesonde. Dies soll mittels Kluftaufweitungen des Grundgebirges und nachfolgender Verfüllung mit einer gut wärmeleitenden Substanz erreicht werden. Somit wird ein besserer Wärmeaustausch mit dem Wirtgestein erwartet.

Diese Technik könnte gerade bei der Erstellung von tiefen Erwärmesonden in bereits bestehende Bohrlöcher zur Erhöhung der Wärmeproduktion von Interesse sein.

In einer ersten Untersuchungsphase gilt es nun, die technische-wirtschaftliche Machbarkeit dieses Konzeptes mittels Modellversuchen abzuschätzen [7].

TIEFE GEOTHERMIE

In der Erdölexploration setzt man aus Gründen der Kostenersparnis in vermehrter Masse auf die Verwendung von möglichst kleinen Durchmessern bei Bohrlöchern (Microdrill, Slimhole, etc., verbunden mit einer inversen Zirkulation der Spülung). Selbst zum Erreichen und Testen von grösseren Tiefenbereichen werden heute Slimholetechniken zur Anwendung gebracht.

In diesem Sinne wird untersucht, ob derartige Bohrtechniken auch bei den relativ komplexen geologischen Verhältnissen der Schweiz für geothermische Tiefbohrungen verwendet werden können [8].

Bis zum Auslaufen der Risikodeckung des Bundes Ende 1997, sind diesbezügliche Erkenntnisse für die restlichen geplanten geothermischen Tiefbohrungen von grossem wirtschaftlichem Interesse.

HOT DRY ROCK - PROJEKTE

Hier ist die Mitarbeit an zwei internationalen Projekten im Rahmen von JOULE 2: *Atlas of Geothermal Resources* [9] und *Coupled Hydraulic-Thermal-Mechanical Modelling* [10] zu erwähnen. Das erst genannte Projekt betrifft den Schweizer Beitrag für einen gesamteuropäischen Ressourcen-Atlas. Wertvolle, neue erdwissenschaftliche Daten aus der Kohlenwasserstoff- und Geothermieexploration sowie von NAGRA-Tiefbohrungen konnten verarbeitet werden. Das im Zuge des zweiten EU-Projektes [10] erstellte 3D Finite Element Modell "FRACTure" wird zur Zeit bei der Auswertung von *hydraulic fracture* Testresultaten der HDR-Pilotanlage in Soultz (Elsass) eingesetzt.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

An nationaler Zusammenarbeit sind bei allen oben erwähnten Forschungsprojekten das enge Zusammenwirken von Ingenieurbüros, Hochschulen und Ingenieurschulen mit der Industrie (Bohrfirmen, Herstellern von EWS-Anlagen) hervorzuheben.

Wesentliches zur nationalen Zusammenarbeit hat sowohl die rege fachliche- als auch die unermüdete P&R Tätigkeit der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (SVG) geleistet. Als Beispiel sei hier die Erstellung von zwölf zweisprachigen, durch das BEW subventionierte Schautafeln mit allen gängigen, geothermischen Nutzungsmethoden zu erwähnen. Anlässlich des Energietages 94 in Frutigen (Oktober 94), konnten diese Schautafeln zum ersten Male einem breiten Publikum vorgestellt werden. Es ist vorgesehen, diese Schautafeln auch in Zukunft bei Mustermessen und bei diversen Energieveranstaltungen einzusetzen.

An weiteren Öffentlichkeitsarbeiten ist die Durchführung des bereits eingangs erwähnten Workshops über die **Geothermische Energiegewinnung aus Schweizer Strassen- und Eisenbahntunnels** hervorzuheben. Diese Veranstaltung, organisiert durch die ELEKTROWATT, wurde im letzten März unter grosser Beteiligung von Fachleuten aus der Praxis abgehalten.

Das Institut für Geophysik der ETH-Zürich veranstaltete am 20. und 21. Juni 1994 einen internationalen HDR-Modellier Workshop mit dem Titel *Coupled Hydraulic-Thermal-Mechanical Modelling*. Teilnehmer waren Vertreter der verschiedenen europäischen HDR-Modelliergruppen (D, CH, F, S, UK). An dieser Tagung wurden HDR-Modelliermethoden diskutiert und verglichen bzw. sollen die Tagungsergebnisse in der Schriftenreihe *GEOTHERMICS* publiziert werden.

Erfahrungen mit internationalen Forschungstätigkeiten konnten anlässlich der Teilnahme von Schweizer Geothermieexperten an folgenden Anlässen gesammelt werden:

- der Tagung "Erdgekoppelte Wärmepumpen", in Giessen,
- dem Kolloquium "Geomechanik und Beherrschung von Tunnelwässern", in Salzburg,
- der nationalen Konferenz über "das vierte Rahmenprogramm für Forschung und technologische Entwicklung der Europäischen Union".

Hinsichtlich internationaler Zusammenarbeit sei an dieser Stelle auch der Informationsaustausch zwischen französischen Fachkollegen und (ehemaligen) KGS-Mitgliedern anlässlich eines Besuches der HDR-Anlage in Soultz erwähnt.

Die Studie *Swiss Geothermal Energy Update 1990 - 1995* [1] soll beim nächsten World Geothermal Congress in Florenz (Mai 1995) präsentiert werden.

Des Weiteren wurden mehrere Schweizer Geothermieexperten von der *International Energy Agency (Working Party on Renewable Energy Technologies)* aufgefordert, aus Schweizer Sicht geothermische Forschungsschwerpunkte zu identifizieren. Letztere sollen mit den übrigen IEA-Mitgliedern am oben erwähnten Kongress diskutiert werden.

4. Transfer in die Praxis

Wie bereits eingangs erwähnt, sollen nun möglichst rasch die aus diversen Studien gewonnen Erkenntnisse über geothermische Potentiale der Alptransit-Tunnels, auch in die Praxis umgesetzt werden.

Ähnliches gilt für die Erstellung von tiefen Erdwärmesonden, wo bereits ebenfalls etliche Vorstudien auf das Wärmepotential dieser Nutzungstechnologie hingewiesen haben [2].

Tatsächlich wurde diese Idee auch schon von der Praxis aufgegriffen und zwei derartige Anlagen stehen knapp vor ihrer Vollendung (Weggis und Weissbad). Die Wärmeproduktion der Anlage in Weggis wird übrigens messtechnisch bereits erfasst.

Des Weiteren befinden sich zur Zeit zwei Förderprojekte in Arbeit, die eine gesamtschweizerische Bestandaufnahme von Tiefbohrungen zum Ziel haben. Es gilt festzustellen, welche Bohrungen auch bezüglich Wärmeabnehmer für eine nachträgliche Installation von tiefen Erdwärmesonden in Frage kämen.

Bereits vorgängig wurden die Kontakte zur Praxis mit dem Ziel von technischen Verbesserungen von Erdwärmesonden-Systemen sowie einer möglichen Verbilligung von Tiefbohrtechniken angesprochen.

An dieser Stelle erscheint wichtig darauf hinzuweisen, dass ganz generell bei allen aufgeführten Projekten eine sinnvolle, gegenseitige Ergänzung von Forschungs- und Förderprojekten erzielt werden konnte.

5. P + D - Projekte

UNTIEFE GEOTHERMIE

Das Ziel ist der Vergleich von Wirtschaftlichkeit und Effizienz bei verschiedenen Erdwärmesondentypen, sowie die längerfristige Belastbarkeit bei der Wärmeentnahme aus dem Untergrund. Das Gleiche gilt für verschiedene Energiefahltypen zur Wärme- und Kälteproduktion bei Wohn- und Industrieanlagen.

- Energiepfahlanlage Finkernweg
- Energiepfahlanlage PHOTOCOLOR
- Energiepfahlanlage LIDWIL Gewerbe
- Energiepfahlanlage PAGO
- Thermoprogramm Erdsonden
- Geothermische Wärmenutzung durch das Bade- und Kurzentrum in Scuol
- Mitteltiefe EWS, Typ GRUNDAG-SIMPLEX

TIEFE ERDWÄRMESONDEN

Bei dieser erstmalig in der Schweiz praktizierten, geothermischen Nutzungsmethode gilt es in erster Linie, Betriebserfahrungen bei einer längerfristigen Wärmeentnahme aus dem tiefen Untergrund zu sammeln (Beheizung von mehreren Wohnblöcken).

- Mess- und Planungsprogramm der Wärmeverteilung ab der Tiefenerdwärmesonde Weggis 1

NUTZUNG VON WARMEN TIEFENWÄSSERN

Wichtigstes Ziel ist hier das Sammlung von Betriebserfahrung über mehrere Heizperioden mittels eines detaillierten Messprogrammes

- Geothermische Wärmenutzung in Riehen (Wärmeverbund)

6. Bewertung 1994 & Ausblick für 1995

Bei der untiefen Geothermie konnten die gesteckten Ziele erreicht werden, obschon einige Projekte erst mit Verspätung richtig angelaufen sind.

Dank der einheitlichen Programmleitung konnte die Forschung mit der Förderung gut koordiniert werden. Dies gilt im Besonderen für die **Nutzung von warmen Tunnelwässern**, die im kommenden Jahr ernsthaft in Angriff genommen werden soll. Wie bereits erwähnt, reichte das Budget 1994 leider nicht mehr für den Start dieses Forschungsprojektes in der Berichtsperiode.

Vorausgesetzt, dass bei der ersten *Hot Dry Rock* Anlage in Europa (Soulz) erfogversprechende Ergebnisse vorgezeigt werden können, ist eine Studie zur Identifizierung von möglichen HDR-Standorten in der Schweiz geplant. In einer ersten Phase könnten zum Beispiel mögliche Standorte mit hohen geothermischen Gradienten, sowie mit günstigen Gesteinsparameter ausgeschieden werden, die ganz prinzipiell für eine HDR-Anlage in Frage kämen (Vertiefung der COLENCO-Studie "Strom aus Erdwärme"). Dies im Lichte der im Ausland gewonnenen, neuesten Erfahrungen, die eventuell nun doch die Anwendung dieser geothermischen Nutzungsmethode in greifbarere Nähe rücken.

7. Liste der Projekte

- [1] L. Rybach, ETH - Zürich & H. L. Gorhan, EWI, Zürich : *Swiss Geothermal Energy Update 1990 - 1995*
- [2] B. MATTHEY, Montezillon : *Documentation SIA D025 - Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température. Traduction en langue allemande*
- [3] L. Rybach, ETH - Zürich : *Aquifer-Bewirtschaftung für geothermische Wärmenutzung* (JB)
- [4] B. MATTHEY, Montezillon : *Recherche des paramètres d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre Central (Canton du Jura)*. (JB)
- [5] C. Rieben, MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE, Bienne : *Étude pilote. Prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le Jura Central (Canton du Jura)* (JB)
- [6] A. Parriaux, GEOLEP / EPF - Lausanne : *Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques*. (JB)
- [7] AG TIEFENWÄRME, Zürich : *Machbarkeitsstudie zu Bohrlochsonden mit "Igelkaverne" (Phase 1)*. (JB)
- [8] CRSFA, Sion : *Projet de recherche sur les forages "slimholes"*. (JB)
- [9] L. Rybach, ETH - Zürich : *Atlas of Geothermal Resources* (BBW/ 93.0348)
- [10] R. Hopkirk, POLYDYNAMICS & L. Rybach, ETH - Zürich : *Couples Hydraulic-Thermal-Mechanical Modelling*. (BBW / 93.0010)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

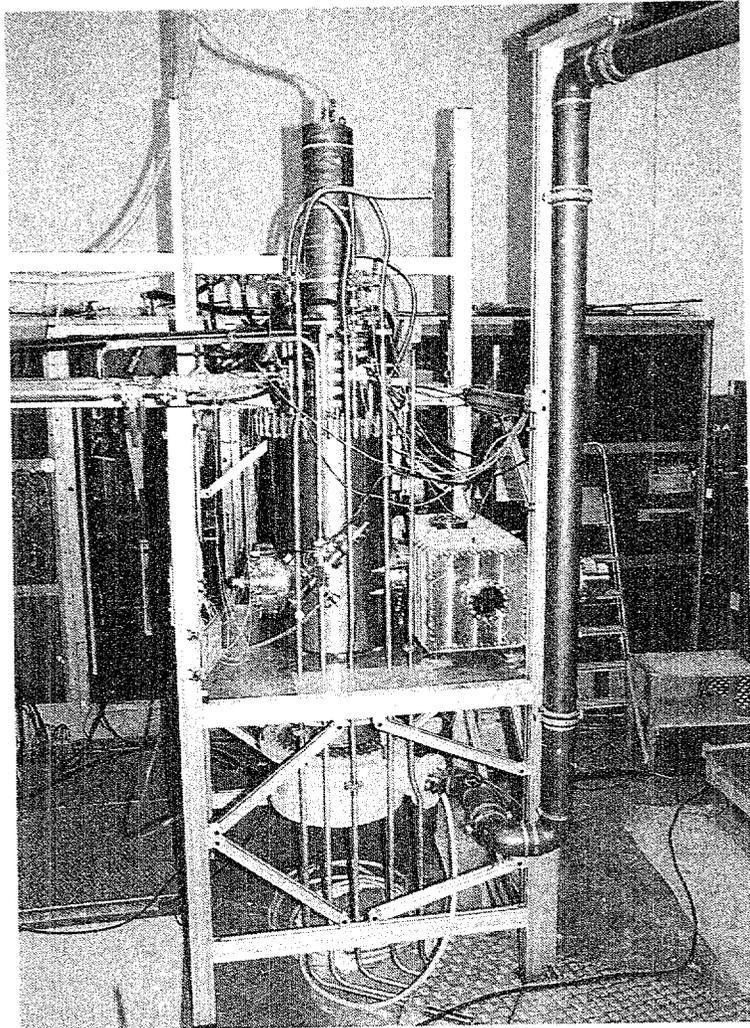
(SB) Schlussbericht vorhanden

FUSION NUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Rapport de synthèse

sur les activités 1994 du programme de recherche

Chef de programme : Stéphane Berthet



Tubes de grandes puissance pour Gyrotron

Pour le chauffage des plasmas thermonucléaires dans le gyrotron du Centre de recherche en physique des plasmas, CRPP, de l'EPF-Lausanne, des tubes électroniques délivrent des grandes puissances à des fréquences de quelques dizaines, voire centaines de gigahertz.

1. Vue d'ensemble du programme au niveau international

Sur la scène mondiale plus de 30 pays conduisent des recherches dans le domaine de la fusion contrôlée. La collaboration internationale y est principalement organisée sur des bases bilatérales et multilatérales entre l'EURATOM, le Japon et les USA. Dans le cadre du projet ITER (*International Thermonuclear Experiment Reactor*), auquel participe aussi la Russie, cette collaboration revêt naturellement une grande importance.

Le 20 mars 1994, avec la signature du protocole 2, valable jusqu'en juillet 1998, ITER est entré dans la deuxième étape de la phase EDA (*Engineering Design Activities*). Elle couvre spécialement les détails techniques du projet. Ce travail de description, design et planification est réparti et réalisé dans les *Joint Central Team (JCT)* de San Diego (USA), Naka (J) et Garching (D). Ces centres sont aussi appuyés par des *Home-Teams* qui ont la charge d'effectuer les recherches et les travaux requis pour assurer la faisabilité des activités des JCT.

Vers le milieu de 1996, une décision devra être prise, quant au choix du site de construction d'ITER. Cette décision, dont l'enjeu économique est de taille, sera l'occasion de mettre à l'épreuve le principe d'égalité qui régit la structure de gestion du projet entre les quatre parties coopérantes. Dans ce contexte, le choix européen se fera parmi les candidats allemand (Greifswald), français (Cadarache) et suédois (Studsvik ou Forsmark). Pour avoir le maximum de chances de battre les offres japonaise, américaine et russe, l'Europe - à travers EURATOM - ne proposera qu'un seul site pour ITER.

En matière de recherche sur la fusion, l'Union Européenne (y. c. la Suisse) est la seule parmi ces partenaires internationaux à posséder un programme (EURATOM). L'élément phare de ce programme est le développement du centre de recherche *Joint European Torus (JET)*, situé à Culham (Angleterre), qui est actuellement le réacteur expérimental le plus avancé au monde pour le confinement magnétique selon le principe du Tokamak. De plus, outre JET, l'Europe dispose d'un ensemble de machines cohérent et actuel (cf. fig. 1) qui ne trouve pas de contrepartie auprès de ses partenaires.

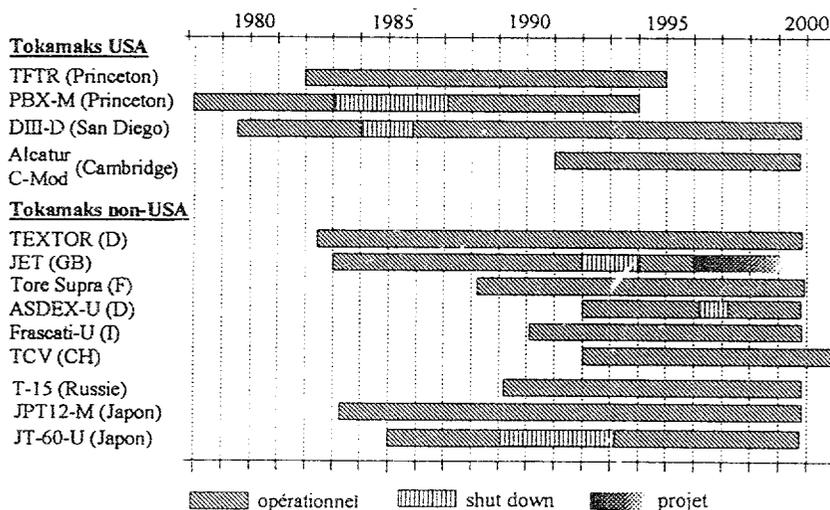


Figure 1 : Principaux Tokamaks en opération dans le monde

Au JET, l'arrêt de la machine entre 1992-1993 a permis de modifier grandement l'installation. Ainsi, plusieurs nouveaux systèmes ont été mis en opération au début de 1994 : systèmes de chauffage additionnels, pouvant atteindre 20 MW; système d'injection de faisceau neutre mis à niveau pour atteindre 22 MW; 22 nouveaux

Par son appartenance au programme européen, le CRPP a accès aux grandes installations expérimentales européennes et mondiales. En retour, il bénéficie de collaborations dans le domaine des diagnostics pour TCV avec l'association Portugal - EURATOM, et les Universités de Cork et de Prague (non-EURATOM). Un gyrotron continu de 0.5 MW et 118 GHz est développé dans le cadre d'un partenariat THOMSON-CEA-CRPP à l'aide d'un groupe de Karlsruhe (KfK) répondant à un besoin du CEA et du CRPP pour leur propre installation. Un programme plus général d'amélioration de l'efficacité des gyrotrons fait l'objet d'une collaboration formelle entre CRPP, KfK et l'Université d'Athènes. Depuis 1992, une équipe importante de l'Institut Keldish, à Moscou, développe pour le CRPP des codes de simulation numériques. Enfin, la plupart des activités en technologie de fusion sont l'objet de collaborations internationales, en particulier dans le cadre des activités R&D d'ITER.

Le financement de ces recherches est assuré par les Instituts eux-mêmes, le Fonds national pour la recherche scientifique, FNRS et par EURATOM (25% à 45%) dans le cadre du contrat d'Association entre la Suisse et l'EURATOM pour le programme de fusion thermonucléaire contrôlée et de la physique des plasmas. Le programme fusion de l'OFEN / OFES soutient deux programmes de développement technologique. Néanmoins, l'essentielle de l'activité du programme fusion en suisse a lieu au sein d'EURATOM. Deux fois par année l'Association suisse au programme EURATOM fait rapport à la direction du programme Fusion de l'Union Européenne de l'activité suisse dans ce domaine.

3. Buts et résultats des projets OFEN / OFES

Projet: *Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren*

Dans un réacteur à fusion, lorsque le plasma entre en contact avec les parois de l'enceinte de confinement, il y a des interactions et des "impuretés" (atomes) sont alors produites. Ce phénomène induit une perte de rayonnement du plasma. Celle-ci peut néanmoins être minimisée en traitant les parois. Les pertes de rayonnement sont fonction du nombre atomique des impuretés; on cherche par conséquent à recouvrir les parois du réacteur d'une couche composée d'un matériau présentant un faible nombre atomique.

Au cours des dernières années, l'emploi de revêtements de Bore-Carbone a permis d'obtenir un plasma d'une qualité sensiblement améliorée.

Plus récemment, l'attention s'est focalisée sur les revêtements de Lithium-Carbone, notamment les couches d'hydrocarbure amorphe contenant du lithium (a-C:H/Li), matériau qui présente un nombre atomique encore plus faible.

Actuellement, ce projet a permis de maîtriser divers procédés de fabrication autorisant l'obtention de tels revêtements à petite échelle [1].

Différents paramètres de fabrication ont été étudiés quant à leur effet sur la composition et la structure des liaisons chimiques caractérisant ces couches et déterminant la réactivité et les propriétés d'érosion du revêtement.

Collaboration : CRPP, Institut de Génie Atomique (EPFL), Institut für Plasmaphysik des Forschungszentrums Jülich et Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.

Projet: *Construction de gyrotrons de haute puissance destinés au chauffage des plasmas thermonucléaires*

L'efficacité d'un gyrotron dépend fortement de la vitesse des électrons. C'est pourquoi, durant l'année 1994, le projet a été focalisé sur la mesure des propriétés du faisceau d'électrons utilisés dans un gyrotron. La méthode adoptée consiste à une analyse en fréquence de l'émission cyclotronique (ECE). A partir de l'élargissement Doppler de l'ECE, la fonction de distribution en vitesse des électrons du faisceau a pu être mesurée.

Les mesures montrent que les vitesses parallèles et perpendiculaires moyennes des électrons sont en accord avec les prédictions des codes utilisés pour la conception du canon à électrons, mais que l'élargissement de la fonction de distribution est supérieure aux valeurs théoriques [2].

L'étude des propriétés des faisceaux d'électrons des gyrotrons est l'un des sujets de la collaboration entre le CRPP et le *Kernforschungszentrum Karlsruhe*.

4. **Projet pour 1995**

Les travaux dans le cadre des projets OFEN / OFES à l'Université de Bâle et au CRPP seront poursuivis. L'étude des couches minces de Lithium sera poursuivie avec la fin des recherches sur la réactivité des couches minces a-C:H / Li en fonction des différents paramètres de déposition. Les premières expériences de déposition de couches minces de Lithium auront bientôt lieu dans le TCV du CRPP. Dans le domaine des gyrotrons, il est prévu de continuer les études théoriques visant à la compréhension de l'élargissement de la fonction de distribution de vitesse observée. Une des raisons est l'excitation d'ondes dans les *beam tunnels*. Des méthodes visant à supprimer cette instabilité seront développées.

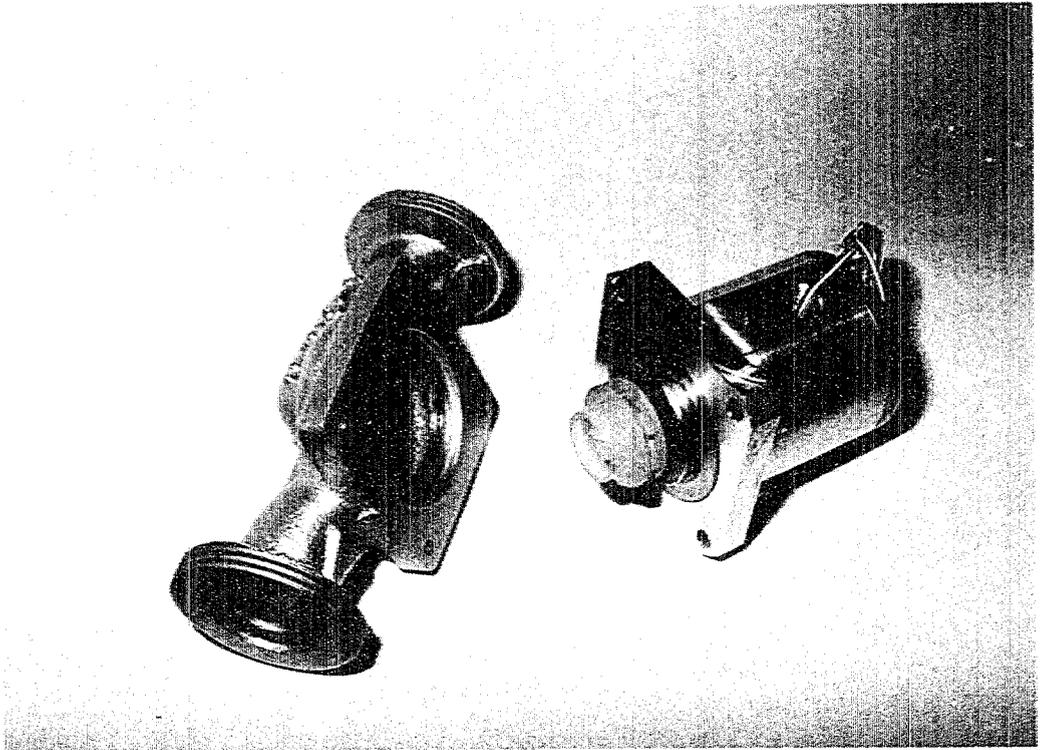
5. **Liste des projets**

- [1] P. Oelhafen, H. Künzli, J.-U. Thiele, Uni - Basel : *Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren* (RA).
- [2] M.Q. Tran, F. Troyon, CRPP / EPF - Lausanne : *Construction de gyrotrons de haute puissance destinés au chauffage des plasmas thermonucléaires* (RA).

(RA) rapport annuel 1994 disponible

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1994
Programmleiter : Roland Brüniger



Kleinumwälzpumpe mit hohem Wirkungsgrad

Durch erhebliche technische Verbesserungen herkömmlicher Kleinumwälzpumpen konnte eine Verdreifachung der üblichen Wirkungsgrade erzielt werden.

1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1994

Das Forschungsprogramm **Elektrizität** beinhaltet ein breites Tätigkeitsfeld. Das grundsätzliche Ziel einer optimierten Nutzung der elektrischen Energie von der Erzeugung über die Verteilung bis zum rationellen Einsatz bleibt nach wie vor unverändert. Einen guten Gesamtüberblick über die laufenden Projekte liefert die im April 1994 herausgegebene BEW-Liste der Projekte 92/93. Die im Jahre 1994 dominierenden Forschungsthemen umfassen die Optimierung resp. die Erhöhung der Wirkungsgrade bei der Speicherung und der Übertragung der elektrischen Energie sowie die Verminderung oder sogar Vermeidung der elektrischen Verluste beim Verbraucher. Da 1995 eine Konzeptüberarbeitung unter Einbezug des Zeitraums 1996 - 1999 ansteht, sind diesbezüglich bereits erste Grundlagenarbeiten durchgeführt worden.

Die wesentlichen Bestrebungen für das Jahr 1994 lagen neben dem Betreuen der laufenden Projekte in folgenden Arbeiten:

- Organisation und Durchführung eines Workshops zum Thema "Integralmotor", um die Industrie zu diesbezüglichen Projekten anzusprechen.
- Koordination der Forschungsaktivitäten im Bereich *Demand Side Management* unter Einbezug der internationalen Aktivitäten.
- Definition der Forschungstätigkeit im Bereich "Supraleitertechnologie".
- Erhebung der internationalen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet "Übertragung und Verteilung" als Basis für die zukünftige Programmausrichtung in diesem Bereich.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ERZEUGUNG / PRODUKTION

Im Bereich der **Wasserkraft** werden im vorliegenden Forschungsprogramm nach wie vor lediglich vereinzelte Projekte durchgeführt. Verschiedene hydraulische Problemstellungen (strömungstechnische Analysen und Optimierungen, Bearbeitung von Kavitations- und Materialproblemen, etc.) werden von den beiden ETH sowie der Industrie bearbeitet. Als Beispiel sei das NEFF-Projekt "Akustische Durchflussmessungen in Wasserkraftanlagen" erwähnt, in welchem im dritten Projektjahr nachgewiesen werden konnte, dass auch unter schwierigen Bedingungen die Messgenauigkeit zwischen $\pm 0,5$ bis $1,0$ % liegt. Mit der Thematik der **Kleinwasserkraftwerke** befasst sich nach wie vor auch das DIANE-Programm. Schwerpunktässig stehen dort die Gebiete "Technik und Potential", "Ökologie und Kleinwasserkraftwerke" sowie "Öffentlichkeitsarbeit" im Vordergrund [13].

Das Ziel des Projekts **Neue Umrichtertechnologien für erneuerbare Energiequellen am Beispiel von Kleinwasserkraftwerken** [1] liegt in der Entwicklung eines neuen Umrichters mit weitem Eingangsspannungsbereich und hohem Wirkungsgrad. Der Umrichter soll vorerst in Kleinwasserkraftwerken mit hohen Drehzahländerungen, wie sie z.B. beim Ersatz eines Druckreduzierventils in einem Trinkwassernetz auftreten, zum Einsatz kommen. Nach dem Aufbau und Testen des Umrichters wurde in Zusammenarbeit mit den *Services Industriels de la Ville de Sion* ein 50 kW Kleinwasserkraftwerk mit Trinkwasserturbinierung realisiert. Als Generator wird ein wassergekühlter 50 kW Synchronmotor mit Permanentmagneterregung und Aussenrotor eingesetzt. Zur Energieeinspeisung werden zwei neuentwickelte, wassergekühlte 30 kW Umrichtereinheiten verwendet. Die im Frühling 95 vorgesehenen Wirkungsgradmessungen sollen bestätigen, dass der Wirkungsgrad im Vergleich zu einer direkt am Netz installierten Asynchronmaschine höher liegt.

Im Projekt **Wechselrichter für erneuerbare Energien, Einsatz von DSP (Digital Signal Processor)** [2] wurde abgeklärt, inwiefern der DSP-Einsatz einen Beitrag zur Effizienzsteigerung bei Wechselrichtern leisten könnte. Die Ergebnisse zeigen auf, dass die Einsparungen gesamthaft gesehen unwesentlich sind. Auf weiterführende Arbeiten wurde deshalb verzichtet.

Mit dem *Centre de recherche expérimental pour la réhabilitation de la Mini-hydraulique, Laboratoire de Monchierand* soll ein Zentrum für die experimentelle Untersuchung von Mini-Wasserturbinen geschaffen werden. Die Ausführungsplanung konnte abgeschlossen werden und der Beginn der Bauarbeiten ist anfangs 1995 vorgesehen.

Das abgeschlossene Projekt **Thermoelektrische Stromversorgung für Haustechnikkomponenten** [3] hat aufgezeigt, dass das Temperaturgefälle an einem Heizkörper mittels thermoelektrischer Generatoren für die autarke Stromversorgung eines elektrostatischen Thermostatventils nutzbar ist. Anhand eines umprogrammierbaren Heizkörperventils wurde nachgewiesen, dass die thermoelektrische Energieerzeugung ausreicht, um einfache Regel- und Messorgane zu betreiben. Ebenso können die technischen Anforderungen und die notwendige Betriebsspannung und Energiespeicherung befriedigend gelöst werden. Die potentiellen Anwendungen der untersuchten Technologie im Energiebereich scheinen aber trotz ökologischen Vorteilen beschränkt zu sein. Eine Umsetzung der Ergebnisse in ein Produkt wäre allenfalls in Kombination weiterer Funktionen denkbar, wie z.B. der individuellen Heizkostenabrechnung mittels Datenfernübertragung. Die Suche nach möglichen Industriepartnern ist bis heute leider erfolglos verlaufen.

SPEICHERUNG

Die permanent zeitlich schwankenden Elektrizitätsbedürfnisse sowie die mobilen Anwendungen (Elektrofahrzeuge) sind auf eine effiziente und wirtschaftliche Speicherung elektrischer Energie angewiesen. Das vorliegende Forschungsprogramm deckt dabei die Gebiete Schwungräder, Supramagnetleiterspeicher (SMES), Druckluftkavernen, klassische Wasserspeicherung sowie punktuell die Batteriespeicherung ab.

Bleibatterien sind trotz verschiedenen innovativen Batteriekonzepten insbesondere im Elektrofahrzeugbereich nach wie vor verbreitet. Um deren Einsatz zu optimieren, wird im Projekt **Zyklisches Blei-Akku-Ladegerät** [4] ein neues Ladeverfahren mit dem Ziel entwickelt, mehr Energie pro Kilogramm Blei zu speichern, die Lebensdauer zu erhöhen und dank einer schonenden Ladung die Ladezeit zu verkürzen. Erste Messreihen haben gezeigt, dass die Batterien bei Langzeitversuchen durch das neue Ladeverfahren ausgehungert werden. Im nächsten Jahr sollen diese Erkenntnisse durch Korrekturen am Ladekonzept umgesetzt und in weiteren Messungen überprüft werden.

Auf dem Gebiet der **Kinetischen Energiespeicherung** (Schwungrad) befasst sich ein NEFF-Projekt mit der Stabilisierung des Versorgungsnetzes durch Abdeckung der Leistungsspitzen von Schweißmaschinen mit Anschlussleistungen zwischen 40 und 250 kVA.

ÜBERTRAGUNG / VERTEILUNG

In diesem Forschungsbereich konzentrieren sich die Anstrengungen auf Problemstellungen im Verteilnetz.

Das Forschungsprojekt **Lastbestimmungsmodell für Verteiltransformatoren** [5] stellt die Weiterführung des Projekts **Führung des Verteilnetzes und Lastbestimmungsmodell** [14] dar. In letzterem wurde der Nachweis erbracht, dass mit wenigen Messungen sowie ergänzenden Netzdaten mittels Lastmodellierung ein Abbild der realen, zeitvariablen Lasten bestimmt werden kann. In Fortsetzung dieser Arbeiten umfasst das Nachfolgeprojekt die Weiterentwicklung des Lastbestimmungsmodells durch Modellverfeinerung und Mustererkennungsalgorithmen, das Austesten der Prototyp-Software sowie die Erstellung einer modular aufgebauten Anwendersoftware. Die Arbeiten werden unter aktiver Mitarbeit dreier Elektrizitätsunternehmungen durchgeführt.

Im kürzlich angelaufenen Projekt **NIS / DMP - Ein Netzinformationssystem für Dokumentation, Monitoring und Planung elektrischer Verteilnetze** [15] wird eine Erweiterung heute verfügbarer Netzinformationssysteme (NIS) auf der Basis Geographischer Informationssysteme (GIS) um ein dem Niederspannungsnetz angepasstes Lastmodell angestrebt. Die Arbeiten basieren zu grossen Teilen auf Erkenntnissen des Lastbestimmungsmodell-Projektes.

Als Grundlage für die Ausarbeitung des Forschungsprogramms 1996 - 99 wurde eine internationale Untersuchung über die Forschungsaktivitäten von Hochschulen durchgeführt [16].

VERWENDUNG / RATIONELLE NUTZUNG

a) Kraft / elektrische Motoren

Um interessierte Institutionen zu Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Integralmotors anzuspornen, wurde in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich eine Tagung über **Neue Forschungs- und Entwicklungsansätze für umrichter gespeiste Antriebe (Integralmotor)** [17] organisiert. Von den etwa 200 angeschriebenen Personen aus Industrie und Lehrbereich folgten über 30 der Einladung. Im Workshop wurden zwar einige Ansatzpunkte herauskristallisiert, konkrete Vorschläge oder gar Projekte ergaben sich jedoch nicht. Der Programmleiter hat aber nochmals das mutmassliche Einsparpotential aufgezeigt und auf das nach wie vor vorhandene Interesse an diesbezüglichen Forschungsarbeiten hingewiesen. Vorerst bleibt aber abzuwarten, ob und wie sich die Industrie diesem Gebiet annimmt.

In enger Zusammenarbeit mit der Industrie und der ETH-Zürich wird im Projekt **Entwicklung eines Programmsystems zur Unterstützung der energieoptimierten, herstellerübergreifenden Auslegung elektrischer Antriebssysteme** [6] ein innovatives Programm für die Auslegung elektrischer Antriebe im Leistungsbereich 0,12 bis 200 kW erarbeitet. Ein erster, unter MS-Windows laufender Prototyp wurde erstellt und durch verschiedene Industriepartner ausgiebig getestet. Ebenfalls wurde an der ETH-Zürich ein Prüfstand für die Ausarbeitung eines Temperaturmodells angefertigt und erste Messungen durchgeführt.

Das Projekt **Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad** [7] konnte nach zweijährigen Forschungsarbeiten unter Beteiligung von Wissenschaft und Privatwirtschaft erfolgreich abgeschlossen werden. Die neu entwickelten und umfassend ausgemessenen Funktionsmuster von Kleinumwälzpumpen erreichen Gesamtwirkungsgrade von bis zu 40%, was verglichen mit heute gängigen Produkten einer Verdreifachung entspricht.

Bei den SBB wird Energieeffizienz grossgeschrieben. So wurde in einem gemeinsamen Projekt mit der ETH-Zürich eine Lokomotive vom Typ Re 6/6 mit einem bedarfsgesteuerten Fahrmotorventilator ausgerüstet und erfolgreich getestet. Das Ergebnis entspricht einer Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs der Lokomotive um etwa 2,5% resp. etwa 120'000 kWh. Im neuen Forschungsprojekt **Energieeinsparung durch verstärkte Ausnutzung der Rekuperationsbremse der Lokomotive Re 6/6** wird untersucht, bis zu welchem Masse eine intensivere Nutzung der Rekuperation möglich ist. Erste Überlegungen lassen Einsparungen von 2-4 % vermuten.

b) Büro- / Unterhaltungselektronikgeräte

Die Fachstelle zur **Förderung des rationellen Energieeinsatzes in der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik** [8] hat sich zu einer gewichtigen, international anerkannten Institution entwickelt. Der nationale und internationale Transfer von Forschungsergebnissen steht weiterhin im Vordergrund. So wird bei der Formulierung von Grenz- und Zielwerten von Bürogeräten beratend gewirkt. Ebenfalls werden die internationalen Harmonisierungsbemühungen bezüglich den unterschiedlichen Vorgehensweisen im Bereich *Standby*-Verluste unterstützt. Dazu erfolgten mehrere Gespräche mit einschlägigen Institutionen und Interessenvertretern verschiedener Länder (Europäische Union, Schweden, Holland, USA etc.). Auch wurde an mehreren internationalen Veranstaltungen teilgenommen [18, 19, 20].

Der nächste Schritt geht in Richtung Energie-Einsparungen in EDV-Netzwerken. Konkrete Projekte sind skizziert, müssen aber noch im Detail ausgearbeitet werden.

c) Verbrauchserfassung

Im Rahmen des Projekts **Methodik der Elektrizitätssparanalysen** [9] wird eine generell gültige und in der Anwendung kostengünstige Methodik der Elektrizitätssparanalysen erarbeitet, welche sich sowohl bei einfachen wie auch komplexen Objekten anwenden lässt. Die Arbeiten wurden durch die Bemühungen einer Anpassung an die SIA-Empfehlungen 380/4 wesentlich verzögert. Eine entsprechende Koordination hat sich aber aufgedrängt.

d) *Demand Side Management (DSM)*

Die Schweiz beteiligt sich im Rahmen des fünfjährigen **IEA-Programms Demand Side Management** [21] seit kurzem an einem zweiten Projekt: *Communications Technologies for Demand Side Management*. Die bisherige Beteiligung beschränkte sich auf das Projekt *Development of Improved Methods for Integrating Demand-Side Options into Resource Planning*.

Im Projekt **Bestimmung der prioritären Aktionsfelder im DSM** [10] sind drei Prototypinstrumente für die Bestimmung der prioritären Aktionsfelder entwickelt worden. Zwei Instrumente dienen der Grobbeurteilung und "Siebung" von Kundensegmenten, die anschliessend mit dem dritten Instrument einer Feinbeurteilung unterzogen werden. Das Feinbeurteilungs-Instrument befindet sich in einem ersten Feldversuch.

INTERDISZIPLINÄRE PROJEKTE

a) *Supraleitung*

Das Nationale Forschungsprogramm NFP 30 **Hochtemperatur Supraleitung** [22] läuft Ende 1995 aus. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprogramms soll die Kontinuität energierelevanter Arbeiten soweit möglich und sinnvoll sichergestellt werden. Dazu wurde mit mehreren Stellen Kontakt aufgenommen, diverse Gespräche geführt und Abklärungen getroffen. Die endgültige Strategie wird im Forschungskonzept 1996 - 99 festgelegt. Bereits heute steht aber weitgehend fest, dass die im internationalen Vergleich hervorragende Stellung der Schweiz im Bereich der Materialienforschung und Leiterherstellung beibehalten werden soll. Die Leiter stellen schliesslich die Basis für energietechnische Anwendungen dar. Um einerseits Forschungsgruppen das Austesten und Verhalten der Leiter in einer anwendungsorientierten Testumgebung zu ermöglichen und andererseits aber auch bereits konkrete Problemstellungen bei der Anwendung der Hochtemperatur-Supraleitung anzugehen, wurde ein neues Projekt **Hochtemperatur-Supraleiter-Transformator** unter Beteiligung der Industrie, der Hochschulen sowie der Elektrizitätswirtschaft gestartet.

Nach wie vor beteiligt sich die Schweiz aktiv an den IEA-Aktivitäten *Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [11]. Die entsprechenden Arbeiten geben einen guten Überblick über laufende und absehbare Entwicklungen auf diesem Gebiet.

b) *Leistungselektronik*

Das Schwerpunktprogramm LESIT vereinigt wichtige Schweizer Firmen und Hochschulen zu einem wegweisenden Programm, das sich mit der Forschung und Entwicklung von **hochleistungsfähigen Komponenten und Systemen der Leistungselektronik** beschäftigt. Der Schweizerische Wissenschaftsrat hat eine ergänzende Studie in Auftrag gegeben, die eine Technologieabschätzung sowie Hinweise zur energetischen Bedeutung der LESIT-Technologie vermitteln soll [23].

c) *Niederfrequente, elektromagnetische Felder*

Eine im Herbst 1994 durchgeführte Tagung hat den durch das BUWAL herausgegebenen Bericht **Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder, 2. Teil, Frequenzbereich 10 Hz bis 100 kHz** durch Fachreferate einem breiteren Publikum bekannt gemacht [24]. Ein kausaler Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und möglichen Auswirkungen auf den menschlichen Körper sowie plausible Wirkungsmodelle sind nach wie vor nicht nachweisbar. Die Schweiz beteiligt sich diesbezüglich weiterhin an der europäischen Koordination und dem Informationsaustausch im Rahmen des COST-Programms 244.

d) *Neue, innovative Projektideen*

Basierend auf einem isothermischen, hydraulischen Verfahren wird in Zusammenarbeit zwischen der Industrie und der Ingenieurschule Biel im Projekt *Compresseur hydraulique-isothermique* [12] ein neuartiger Kompressor typ erforscht. Ein erster Prototyp konnte gebaut werden und erste Messungen liegen vor. Die

erhoffte Wirkungsgradverbesserung konnte aber nicht erreicht werden. Weitere Messungen sowie Anpassungen sind vorgesehen, weshalb zur Zeit keine abschliessenden Aussagen gemacht werden können.

EDV-Rechenzentren werden oft auf 22 °C oder noch tiefer gekühlt. Ausgelöst durch ausgedehnte japanische Versuche wurde im Projekt **Grundlagen zur Erhöhung der maximal zulässigen Umgebungstemperatur in EDV-Räumen** [13] unter Einbezug namhafter Rechnerhersteller und unter Mitwirkung des Instituts für Zuverlässigkeitstechnik der ETHZ nachgewiesen, dass eine Temperaturerhöhung auf 26 °C keine signifikanten Auswirkungen bezüglich Rechnerzuverlässigkeit und -verfügbarkeit hat. Dies entspricht einer Verminderung von etwa 16% der aufzubringenden Kühlenergie.

Der Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft, PSEL, der als teilweise Ablösung des NEFFs durch den Vorstand des Verbands Schweizerischer Elektrizitätswerke, VSE, ins Leben gerufen wurde, unterstützt verschiedene Projekte im Elektrizitätsbereich [25].

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Einbindung der Industrie in Forschungsprojekte sowie die Umsetzung der Hochschulforschung in die Praxis wird in allen Projekten angestrebt. Erreicht wird dies durch verstärkte Bildung von projektorientierten, interdisziplinären Projektgruppen.

Die aktive Teilnahme an den zwei *IEA-Agreements (Demand Side Management, Supraconductivity)* sowie die Untersuchungen über die Forschungsaktivitäten von Hochschulen im Bereich **Übertragung und Verteilung** etablierten wertvolle internationale Kontakte. Im Projekt **Grundlagen zur Erhöhung der maximal zulässigen Umgebungstemperatur in EDV-Räumen** wurden ferner bestehende Kontakte mit der *TEPCO (Tokyo Electric Power Company)* vertieft. Schliesslich unterstützen die Arbeiten der **Fachstelle zur Förderung des rationellen Energieeinsatzes in der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik** die internationale Zusammenarbeit.

Durch die Teilnahme des Programmleiters an der *Distribution Automation / Demand Side Management 1994 Europe*, in Paris konnten ebenfalls wertvolle Inputs gewonnen und Kontakte für weitere Forschungsaktivitäten gesammelt werden [26].

4. Umsetzung der Ergebnisse

Da diverse Umsetzungsaktionen bereits in den Projektbeschreibungen erwähnt sind, beschränken sich die vorliegenden Ausführungen auf ergänzende Erläuterungen.

Ermuntert durch die Erzielung einer Verdreifachung des Wirkungsgrades von Kleinumwälzpumpen ist vorgesehen, durch einen gross angelegten Feldversuch einen nächsten Schritt Richtung Serienprodukt zu machen. Parallel dazu wird die Fachwelt und Industrie auf vielseitige Art und Weise sensibilisiert. So wird neben dem Publizieren von Fachartikeln und allenfalls sogar dem Senden einer Fernsehreportage dem RAVEL-Kurs ein Funktionsmuster zur Verfügung gestellt.

Das Ergebnis, dass eine Temperaturerhöhung in EDV-Räumen auf 26 °C keine signifikanten Auswirkungen bezüglich Rechnerzuverlässigkeit und -verfügbarkeit hat, wird den Betreibern von Rechenzentren mit einem vielfältigen Aktionsprogramm mitgeteilt. Vorgesehene Kommunikationsmittel sind Publikationen in Kundenzeitschriften namhafter Hersteller, das Ausstrahlen von Radio- und Fernsehsendungen sowie ein Direktmailing an EDV-Verantwortliche. Die Umsetzungsunterlagen werden in mehreren Sprachen ausgearbeitet.

5. Pilot- & Demonstrations-Projekte

Im Projekt *Route de démonstration d'éclairage public* wird eine Demonstrationsstrasse mit verschiebbaren Kandelabern erstellt. An diesen können unterschiedliche Lampentypen befestigt und unter verschiedenen Umweltbedingungen getestet werden. Damit sollen vertiefte Erkenntnisse über die optimale Nutzung der Elektrizität bei Strassenbeleuchtungen unter Einbezug von Sicherheitsanforderungen gewonnen werden.

Im Projekt *Ökokühlschrank Schweiz* wird die Entwicklung eines umweltverträglichen Kühlschranks angestrebt, der dank neuartiger Vakuuminisolation die heutigen Energieverbrauchswerte halbieren soll.

6. Bewertung 1994 und Ausblick für 1995

Die in vielen Projekten erzielte enge Zusammenarbeit mit der Industrie ist positiv zu vermerken. So hat diese gute Kooperation auch massgebend zum hervorragenden Ergebnis bezüglich der massiven Wirkungsgradverbesserung bei Kleinumwälzpumpen geführt. Auch die Zusammenarbeit mit dem PSEL hat sich im Berichtsjahr durch die gemeinsame Beurteilung und Finanzierung mehrerer Projekte erfreulich entwickelt. Diese konstruktive Zusammenarbeit hat sicher auch wesentlich dazu beigetragen, dass die gesteckten Programmziele für 1994 weitgehend erreicht werden konnten.

Im Jahr 1995 steht die Konzeptüberarbeitung des Forschungsprogramms für die Zeitperiode 1996 - 99 im Vordergrund. Diesbezügliche Vorarbeiten sind bereits erfolgt. Der aktive Miteinbezug von Hochschulen und Industrie wird dabei als wichtige Basis für die Umsetzung betrachtet. Trotz der Vielfältigkeit soll das Programm aber wiederum klare Schwerpunkte setzen, ohne die Flexibilität für unkonventionelle und innovative Ideen zu verlieren. Daneben werden die laufenden Projekte weiterhin begleitet.

7. Liste der Projekte

- [1] H. P. Biner, HTL - Sion : *Neue Umrichtertechnologien für erneuerbare Energiequellen am Beispiel von Kleinwasserkraftwerken.* (JB)
- [2] V. Crastan, M. Hettich, HTL - Biel : *Wechselrichter für erneuerbare Energien, Einsatz von DSP.* (SB)
- [3] M. Zimmermann, KWH/EMPA - Dübendorf & E. Bucher, K. Fess, W. Käfer, UNI - Konstanz : *Studie zur Anwendung thermoelektrischer Generatoren in der Regelungstechnik.* (SB)
Zusammenfassung "Thermoelektrische Anwendungen in der Haustechnik"
- [4] M. Leuenberg, GLUR COMMUNICATIONS-ELECTRONIC, Münsingen : *Zyklisches Blei-Akku-Ladegerät.* (JB)
- [5] H. Glavitsch, D. Brunner, L. Maiocchi, ETH - Zürich & T. Arpagaus, AMSTEIN+WALTHERT, Zürich : *Lastbestimmungsmodell für Verteiltransformatoren.* (JB)
- [6] R. Tanner, SEMAFOR, Basel : *Entwicklung eines Programmsystems zur Unterstützung der energieoptimierten, herstellerübergreifenden Auslegung elektrischer Antriebssysteme.* (JB)
- [7] J. Nipkow, ARENA, Zürich : *Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad.* (SB)
- [8] B. Aebischer, ETH - Zürich : *Förderung des rationellen Energieeinsatzes in der Informationstechnik und der Unterhaltungselektronik.* (JB)

- [9] H. Huber, U. Kaufmann, Hp. Eicher, EICHER+PAULI, *Liestal* : *Methodik der Elektrizitätssparanalysen*. (JB)
- [10] M. Blanck, HOLDERBANK MANAGEMENT BERATUNG, *Holderbank* : *Bestimmung der prioritären Aktionsfelder im DSM, Entwicklung der Methodik und Instrumente*. (JB)
- [11] G. Vécsey, EPF - *Lausanne* : *Assessing the Impacts of High Temperatur Superconductivity on the Electric Power Sector*. (JB)
- [12] L. SIMON, *Genève* : *Compresseur hydraulique-isothermique*. (JB)
- [13] H. Eisenhut, AEK ENERGIE, *Solothurn* : *Grundlagen zur Erhöhung der max. zulässigen Umgebungstemperatur in EDV-Räumen*. (SB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

8. Referenzen

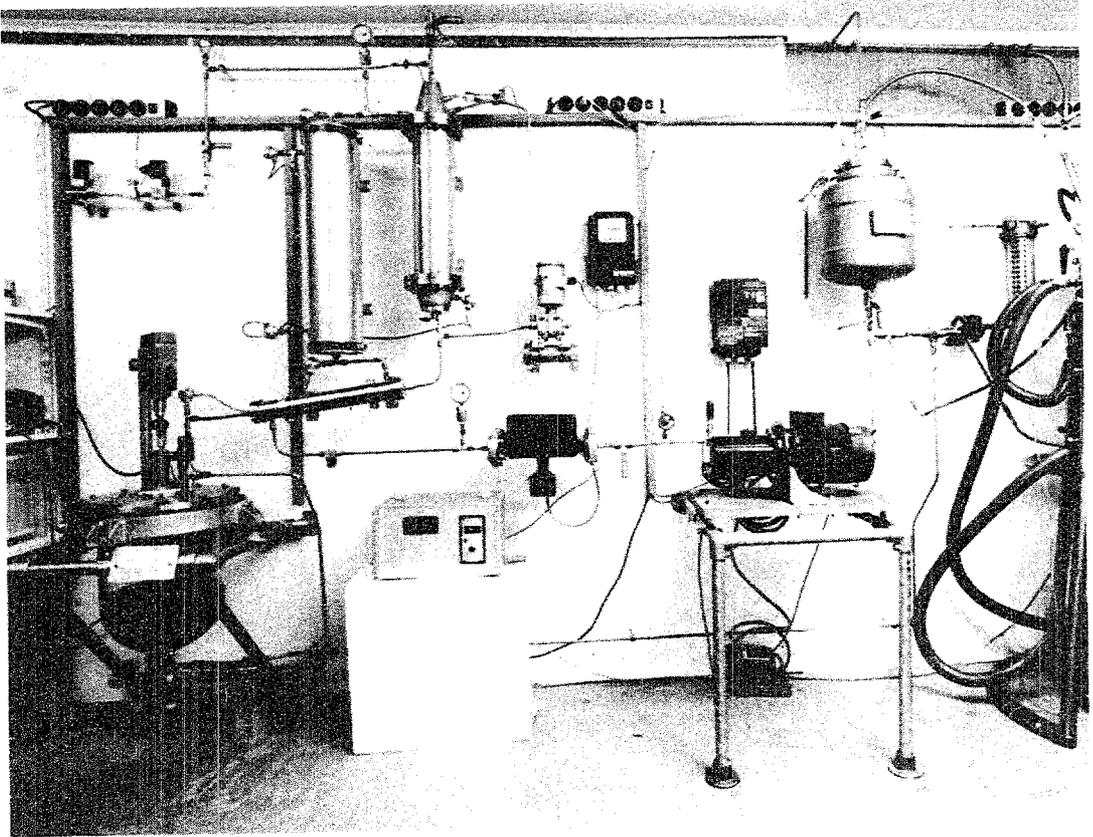
- [14] Hp. Leutwiler, ITECO : *DA/NE Projekt Kleinwasserkraftwerke 1992 bis 1996*
- [15] D. Brunner, H. Glavitsch, ETH - Zürich & G. Schnyder, ehem. AMSTEIN&WALTHERT : *Lastmodell für das Verteilnetz*, SEV/VSE-Bull. 1/94
- [16] C. Girardier, R. Marolf, COLENCO, *Baden* & H. Glavitsch, ETH - Zürich : *Ein Netzinformationssystem als Planungswerkzeug im Verteilnetz*, SEV/VSE-Bull. 23/94
- [17] R. BRÜNIGER, *Ottenbach* : *Ausgewählte Forschungsaktivitäten von Hochschulen im Bereich elektrische Energieübertragung und -verteilung*
- [18] F. Jenni, ETH - Zürich & R. BRÜNIGER, *Ottenbach* : *Zusammenfassung des Workshops "Integrator" vom 19. Okt. 1994, ETH - Zürich*.
- [19] B. Aebischer, D. Pain, ETH - Zürich : *Where do we go from here, Beitrag am Seminar Energy Efficient Office Technology 1994 in New York*
- [20] B. Aebischer, ETH - Zürich : *Bericht über die Teilnahme an zwei Anlässen im 1994, Energy Efficient Office Technology 1994 in New York & Energy Star Computer Conference in Washington*
- [21] B. Aebischer, D. Pain, ETH - Zürich : *Market-pull Actions in Switzerland for Energy efficient copiers, Beitrag an der Workshop "Market Pull Activities and Cooperative Procurement of innovative Technologies", Paris, 1994*.
- [22] *Minutes of the 2nd & 3rd Executive Committee Meeting on Demand Side Management 1994*
- [23] *Dossier der Pressekonferenz NFP 30 "Hochtemperatur Supraleitung" vom 29. Juni 1994 in Bern*
- [24] D. Spreng, ETH - Zürich & F. Varone, I.f.POLITIKWISSENSCHAFT & W. Eichhammer, FRAUENHOFER, *Freiburg i/B* : *Technologiefolgeabschätzung der LESIT-Technologien, eine Vorstudie*.
- [25] *Niederfrequente Elektromagnetische Felder (EMF), Vorstellung, Erläuterung und Diskussion des neuen BUWAL-Berichts*, VSE-Druckschrift 5.49 df
- [26] *Tätigkeitsbericht 1993 des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)*
- [27] R. BRÜNIGER, *Ottenbach* : *Reisebericht der DA/DSM 94 Europe Konf. vom 27.-29.9.1994, in Paris*.

WASSERSTOFF

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Thomas H. Schucan



Dehydrieranlage für mit Wasserstoff angetriebenen Verbrennungsmotor

In der 12 kW-Pilotanlage der HTL-Burgdorf wird eine Suspension aus Magnesium in Polyalphaolefin dehydriert. *Von links nach rechts:* Lagerbehälter für die Metallsuspension, Wärmeübertrager zur Aufheizung auf 340 °C, Dehydrierreaktor, Pumpe, Lagerbehälter für die wasserstoffreiche Suspension.

1. Anvisierte Zielpunkte für 1994

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 **Energieforschungsprogramm "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 1994 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 sollte untersucht werden, und die theoretische Modellierung sollte zu praktisch nutzbaren Erkenntnissen führen.

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 Langzeitspeicherung geeignet. Die Weiterentwicklung der entsprechenden Speichertechnik im engeren Sinne war innerhalb dieses Schwerpunktsbereichs vorgesehen, während die Realisierung des Gesamtkonzepts dem Bereich Gesamtsysteme zuzuordnen ist.

Das Ziel für das Programm 1994 im Bereich **Gesamtsysteme** 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 1994

Im August des Berichtsjahres wurde das Forschungsprogramm **Photochemie** aufgelöst und die meisten der darin für die Weiterführung vorgesehenen Projekte wurden ins Programm **Wasserstoff** integriert. Dadurch ergab sich gegenüber den ursprünglichen Zielsetzungen eine wesentliche Erweiterung, insbesondere im Bereich der Wasserstoffherzeugung. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten der 1994 durchgeführten Arbeiten und die erreichten Resultate nach Schwerpunkten geordnet zusammengestellt.

ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF

In drei der neu ins Programm integrierten Projekte wird das gemeinsame Ziel der direkten Aufspaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch photochemische Methoden, d.h. durch direkten Einfang von sichtbarem Sonnenlicht mit nachfolgender chemischer Umwandlung, verfolgt. Dazu ist eine geeignete Kombination von zwei verschiedenen Photosystemen notwendig. In den an der ETH - Lausanne entwickelten [1] dünnen Halbleiterschichten werden der grüne und rote Anteil des Sonnenspektrums sowie die am zweiten Photosystem erzeugten Leitungsband-Elektroden absorbiert. Durch Beigabe ausgewählter organischer Puffersubstanzen ist es gelungen, die Photospannung für das erste System von 800 auf 900 mV zu erhöhen. Das zweite Photosystem dient zur Absorption des blauen Anteils am Sonnenlicht, und die damit erzeugten Löcher im Valenzband ermöglichen die Freisetzung von Sauerstoff. Für das zweite System wurde bisher vor allem Wolfram-Trioxid verwendet.

Verbesserungen an dieser Photoanode sind in erster Linie [2] durch Verwendung dünnerer Schichten und durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Elektrolyten erreicht worden. Durch Kombination der beiden verbesserten Systeme ist es gelungen, den Wirkungsgrad für die Wasserspaltung auf 3 % zu erhöhen, was in Anbetracht des relativ frühen Entwicklungsstandes als sehr gutes Resultat zu betrachten ist.

An der Uni - Bern [3] wurde die experimentelle und theoretische Untersuchung von mit Silberionen angereicherten Zeolithen weiter untersucht, insbesondere in bezug auf ihre Eigenschaften, unter geeigneten Bedingungen Wasser photochemisch zu Sauerstoff zu oxidieren. Ein Hauptziel dieser Arbeiten ist die Verbesserung der oben erwähnten direkten Wasserspaltung. Ausser der Kombination mit den von den anderen beiden Gruppen entwickelten Photosystemen setzt dies voraus, dass die bei der Oxidation entstehenden Silberionen in einem Umkehrprozess wieder in die ursprüngliche photoaktive Form zurückgebracht werden können. Im Berichtsjahr wurde die Idee, dass sich Farbstoffmoleküle in Zeolithen zum Aufbau von "Farbstoff-Antennen" für die vollständige Absorption von Licht mit anschließender Energie-Übertragung in etwa 1 μm eignen, experimentell bestätigt. Dies geschieht durch geeignete Kombination eines in die Kanäle des Zeolithen eingebauten Farbstoffs, der die einfallenden Photonen absorbiert, mit einem auf die Oberflächen der Mikrokristalle gebrachten anderen Farbstoff. Als erster ist es der Berner Gruppe im weiteren gelungen, an mit Zeolith-Mikrokristallen modifizierten Elektroden eindeutig Ladungstransport innerhalb der Zeolithen nachzuweisen.

Die in den vergangenen Jahren von der Firma METKON erfolgreich durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung von Druckelektrolyseuren konnten im Berichtsjahr nicht weitergeführt werden, weil sich die Umstrukturierung mit Einbettung der neugegründeten Firma ALYZER in einen italienischen Konzern nicht bewährt hat. Die Firma wurde zwar aufgelöst, aber es ist in der Folge gelungen, das vorhandene *Know-how* sicherzustellen, indem das ganze Team in die Tessiner Firma AMMONIA CASALE eingegliedert wurde. Damit kann eine Wiederaufnahme der Arbeiten im kommenden Jahr in Aussicht genommen werden.

Die Erweiterung der mathematischen Modellierung von Elektrolyse-Zellen auf 3 Dimensionen und auf die konkreten Randbedingungen der ALYZER-Zellen wurde weiter untersucht [4]. 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. Dies ist erst teilweise geglückt, denn die erhaltenen Temperaturverteilungen sind vorläufig unbefriedigend.

In Rahmen eines dem Forschungsprogramm Solarchemie eingegliederten Projekts ist es am PSI erstmals gelungen, Wasserstoff aus Wasser zu erzeugen mit Hilfe von hochkonzentrierter Sonnenenergie. Dabei wurde die Reduktion von Eisenoxid bei etwa 2'000 °C mit der entsprechenden Umkehrreaktion zu einem zweistufigen Kreisprozess kombiniert.

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 Uni - Fribourg im Rahmen des Pro-

gramms Wasserstoff in einem NEFF-Projekt nach billigen, Wasserstoff speichernden Legierungen für stationäre Anwendungen. Nachdem bisher Verbindungen gefunden wurden, die sich entweder gut (mit Wasserstoff) beladen und schlecht entladen liessen, oder solche mit der umgekehrten Eigenschaft, ist es im Berichtsjahr gelungen, durch teilweise Substitution von Eisen durch Aluminium eine $Ce(Fe,Al)_2$ -Legierung zu finden, die sich einerseits leicht aktivieren lässt und andererseits gegenüber der unerwünschten Bildung von schlecht zerfallenden Hydriden stabil ist.

In einem vom BEW unterstützten Projekt [5] der Uni - Genf wurden 7 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). Mit $BaReH_5$ wurde dabei das Metallhydrid mit dem höchsten bisher gefundenen Wasserstoff / Metall-Verhältnis ($H/M = 4.5$) entdeckt. Die Kristallstruktur der Verbindungen 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.

Im Zusammenhang mit dem vor allem in der Schweiz entwickelten Speicherconcept (flüssige organische Hydride) wurde untersucht [6], 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, bei wirtschaftlich sinnvollem Durchsatz, getestet. Nach den in früheren Projektphasen verwendeten Rohr-Membranen innerhalb des Reaktors wurden neu auch *ex situ* (d.h. zwischen den beiden Kammern des Reaktors) Blatt-Membranen eingesetzt. Die früher erhaltenen Resultate wurden bestätigt und überdies auch erfolgreich mit Modellrechnungen reproduziert. Im Rahmen des NEFF-Projekts "Saisonale Speicherung von Elektrizität mit chemisch gebundenem Wasserstoff" ist es in der am Paul Scherrer Institut aufgebauten, PC-gesteuerten, automatischen Labor-Reaktor-Anlage gelungen, durch geeignete Wahl der Betriebsbedingungen und der Aktivierungsverfahren die Ausbeute an Toluol auf 98,5 % zu erhöhen. Parallel dazu wurde der Anteil an unerwünschten Nebenprodukten vermindert. Insbesondere gelang es, den Anteil an Benzol auf weniger als 0,1 % zu reduzieren. In einer Zusammenarbeit zwischen der ETHZ und dem PSI sind heterogene Katalysatoren aus homogenen Clusterverbindungen hergestellt worden, deren Dehydrierungsaktivität und Stabilität diejenige von kommerziell erhältlichen Katalysatoren erreicht hat.

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 den beiden Vorjahren in einer Versuchsanlage als erstes Beispiel eine Suspension von $LaNi_5$ in n-Undecan bei 50-90 °C erfolgreich mit Wasserstoff beladen und wieder entladen worden war, und nachdem auch mit Polyalphaolefin (PAO 6) eine Trägerflüssigkeit gefunden worden war, die sich bei 300 °C gegenüber Wasserstoff und Magnesium inert verhält, konnte im Berichtsjahr mit dem Bau einer Versuchsanlage für die *on-board* Dehydrierung (mit einer thermischen Leistung von 12 kW) begonnen werden. Die Prozessführung wurde festgelegt, und die wesentlichen Anlagekomponenten wurden bestimmt (vgl. Titelbild).

Die am Laboratorium für Kristallographie der ETHZ vorhandenen Messeinrichtungen, insbesondere für Röntgenbeugung und Raster-Elektronenmikroskopie, konnten auch im Berichtsjahr für Strukturuntersuchungen an Materialien eingesetzt werden [8], welche in verschiedenen Projekten der Programme Elektrochemie,

Photochemie, Solarchemie und Wasserstoff eine Schlüsselrolle spielen. So wurde zum Beispiel untersucht, wie für nanokristalline Titandioxid-Schichten der Wirkungsgrad von Solarzellen von der Grösse der Nanopartikel und von der strukturellen Zusammensetzung der dünnen Schichten, d.h. von der relativen Häufigkeit und Stellung verschiedener Moleküle, abhängt.

Das vom PSI angeregte Grossprojekt BIOMETH zur Umwandlung von Biomasse über die Vergasung mit Sauerstoff und Dampf in den flüssigen Energieträger Methanol wurde im Berichtsjahr ebenfalls weitergeführt. Das Ziel dieses Projekts ist der Bau einer Demonstrationsanlage für die Biomasseumwandlung in Methanol bis zum Ende des Jahrzehnts. In der ersten Phase (seit 1992) wird vom PSI mit einer Reihe von Industriepartnern die technische und ökonomische Machbarkeit untersucht. Über dieses Projekt wird im Überblick des Programms Biomasse berichtet. 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.

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 [9]. Dafür wurde die innere Gemischbildung gewählt, bei welcher die Einblasung des Wasserstoffs direkt in den Kompressionstakt erfolgt. Mit dem im Vorjahr umgebauten 12 l - Dieselmotor wurden erste Kennfelder aufgenommen. Dabei hat sich gezeigt, dass das neu entwickelte, elektrohydraulisch gesteuerte Einblasesystem sehr gut funktioniert, bis auf gewisse Ungleichheiten zwischen den Ventilen. Der bestehende mobile Prüfstand wurde soweit nachgerüstet, dass erste Abgasmessungen durchgeführt werden konnten. In bezug auf die Stickoxidemission sind die Resultate noch unbefriedigend. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wahl der geeigneten Betriebsparameter noch nicht optimiert worden ist.

Bei der Elektrolyse von Wasser entsteht neben dem Wasserstoff immer auch eine achtmal grössere Menge von sehr reinem Sauerstoff. Nachdem im Vorjahr in einer Studie die verschiedenen Möglichkeiten zum Absatz dieses Sauerstoffs in der Schweiz evaluiert worden waren, wurde die beste dieser Möglichkeiten im Berichtsjahr in einer Folgestudie [10] weiter untersucht. Es handelt sich dabei um das neue, für die Kehrichtverwertung entwickelte Thermoselect-Verfahren. Dabei hat sich herausgestellt, dass aus ökonomischen Überlegungen der umgekehrte Weg vorzuziehen ist, nämlich die mit entsprechender Nachrüstung der Synthesegasaufbereitung denkbare Verwendung einer Thermoselect-Anlage als Wasserstofflieferant.

3. Internationale Zusammenarbeit

In der Internationalen Energie-Agentur, IEA werden im Bereich Wasserstoff ab 1995 drei neu definierte Projekte aufgenommen werden. An allen drei (Photoproduktion, Integrierte Systeme, Transport & Speicherung) ist die Schweiz aktiv beteiligt. Die Tatsache, dass wir auf die Neuformulierung des Forschungsprogramms einen bestimmenden Einfluss ausgeübt haben, spiegelt sich darin wieder, dass die Schweiz in zwei Unterprogrammen den Vorsitz übernommen hat.

Im Juli 1994 wurde in Interlaken die *10th Int. Conference on Photochemical Transformation and Storage of Solar Energy* mit grossem Erfolg durchgeführt. Unter dem Präsidium von G. Calzaferri (Uni - Bern) diskutierten über 300 Wissenschaftler aus 31 Ländern die auf allen Gebieten der Photochemie erreichten Fortschritte. Bei dieser Gelegenheit wurden auch die im Rahmen des Programms Wasserstoff erzielten Resultate zur Herstellung von Wasserstoff durch direkte Spaltung von Wasser unter Einsatz von Sonnenstrahlung erstmals einer internationalen Öffentlichkeit vorgestellt.

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 Uni - 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 stand in bezug auf ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in engem Kontakt und Erfahrungsaustausch mit anderen führenden europäischen Herstellern. Es ist zu hoffen, dass sich diese Anerkennung auf die AMMONIA CASALE übertragen wird.

4. Umsetzung

Beinahe alle im Rahmen des Forschungsprogramms unterstützten Projekte werden in enger Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie durchgeführt, um einen gleitenden Übergang in eine spätere rein industrielle Entwicklung sicherzustellen. Ob und in welchem Ausmass die frühere Aktivität der Firmen METKON bzw. ALYZER auf dem internationalen Markt von der Firma AMMONIA CASALE wiederaufgenommen werden wird, ist im heutigen Zeitpunkt noch unklar.

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 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, und Pläne zum weiteren Ausbau der Gesamtanlage wurden zur Diskussion gestellt.

Die Firma ATEL hat in einer Wasserstoff-Demonstrationsanlage in Niedergösgen eine vollständige Kette von Erzeugung bis Nutzung implementiert. Neben der mit Hilfe des PSI instandgesetzten Membrel-Elektrolyse-Anlage (mit einer Produktionsleistung von 100 kW, bzw. 20 Normkubikmeter Wasserstoff pro Stunde), Gasreinigung und -kompression auf 200 bar 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. Parallel zum seit 1992 laufenden regulären Betrieb wurde auch im Berichtsjahr die wissenschaftliche Analyse des zeitlichen Verhaltens der 120 Zellen des Elektrolyseurs durch das PSI weitergeführt.

5. Pilot- und Demonstrations - Projekte

Im Rahmen der Förderung von Pilot- und Demonstrations-Projekten im Energiebereich für Bundesbauten wurde im Berichtsjahr ein konkretes Bauprojekt zum Abschluss gebracht. Dabei wurde eine Anlage erstellt, in welcher der für die Füllung der Wettersonden-Ballone der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt in Payerne benötigte Wasserstoff mit Hilfe von solar erzeugtem Strom aus Wasser hergestellt wird, anstelle des bisher üblichen Bezugs aus Gas-Druckflaschen. Mit dem Bau der von der EWI vorgeschlagenen Anlage zur

autonomen solaren Erzeugung des Wasserstoffs ist 1993 begonnen worden. Nachdem das Solarzellenfeld und das Bedienungsgebäude bereits im Vorjahr erstellt worden sind, wurden im Berichtsjahr auch die wasserstoff-spezifischen Komponenten (Elektrolyseure und Lagertanks) abgeliefert. Sie stehen zurzeit in der Erprobungsphase. Auch die während der ersten beiden Jahre im Rahmen eines NEFF-Projekts vorgesehene messtechnische Begleitung in Zusammenarbeit mit der HTL-Yverdon ist aufgenommen worden.

6. Geplante Forschungsarbeiten 1995

Die meisten Projekte innerhalb des Forschungsprogramms sind auf eine mehrjährige Entwicklung angelegt, die über die Laufzeit der aktuellen Phase hinausgeht. Im Bereich der Erzeugung steht die Fortführung der erfolgreichen Arbeiten an der photochemischen Wasserspaltung mit Sonnenlicht und an der damit verknüpften Weiterentwicklung von Zeolith-Systemen im Vordergrund. Es wird im weiteren abzuklären sein, ob die in den letzten Jahren durchgeführte Entwicklung von Elektrolyseuren nach der Neustrukturierung der entsprechenden Firma wieder aufgenommen werden kann, indem eine neue Anlage gebaut und mit solar erzeugtem Strom betrieben wird. Die beiden an der Entwicklung von neuen Metallhydriden zur Speicherung von Wasserstoff tätigen Hochschul-Forschungsgruppen werden ihre Arbeiten weiterführen mit Verstärkung von Industriebezug und direkter internationaler Zusammenarbeit. Wesentlich erweitert werden soll insbesondere auch die Zusammenarbeit zwischen diesen Gruppen und der HTL - Burgdorf auf dem Gebiet der Metallhydride in Suspension.

Drei Projekte stehen in direktem Zusammenhang mit dem EUREKA-Projekt HYPASSE, und die entsprechenden Arbeiten werden ins Gesamtprojekt eingegliedert. In diesem Zusammenhang wird vor allem 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. Im Laufe des Jahres 1995 wird über die Einzelheiten der Durchführung der Phase 2 dieses Projekts (1996-1999) Beschluss zu fassen sein.

7. Liste der Projekte

- [1] M. Grätzel, EPF - Lausanne : *Photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire.*
- [2] J. Augustynski, UNI - Genève : *Photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire.* (JB)
- [3] G. Calzaferri, UNI - Bern : *Photochemische und photoelektrische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie.*
- [4] H. Froidevaux, EPF - Lausanne : *Modélisation de réacteurs de type Alyzer par la méthode des éléments finis.* (JB)
- [5] K. Yvon, UNI - Genève : *Synthèse et caractérisation de nouveaux hydrures métalliques ternaires et quaternaires.* (JB)
- [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.* (JB)
- [8] V. Shklover, ETH - Zürich : *Structural Studies of Materials for the Chemical Storage of Energy.* (SB)

- [9] J. Jäger, LARAG, Wil : *Weiterentwicklung des Wasserstoffmotors für das MTH-System.* (SB, JB)
- [10] H. Hofer, HTH - VERFAHRENSTECHNIK, Winterthur : *Kombinationsmöglichkeiten des Wasserstoffesinsatzes für Stadtbusse und einer nach dem Thermoselect-Verfahren konzipierten Kehrlichtverbrennungsanlage* (Studie)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

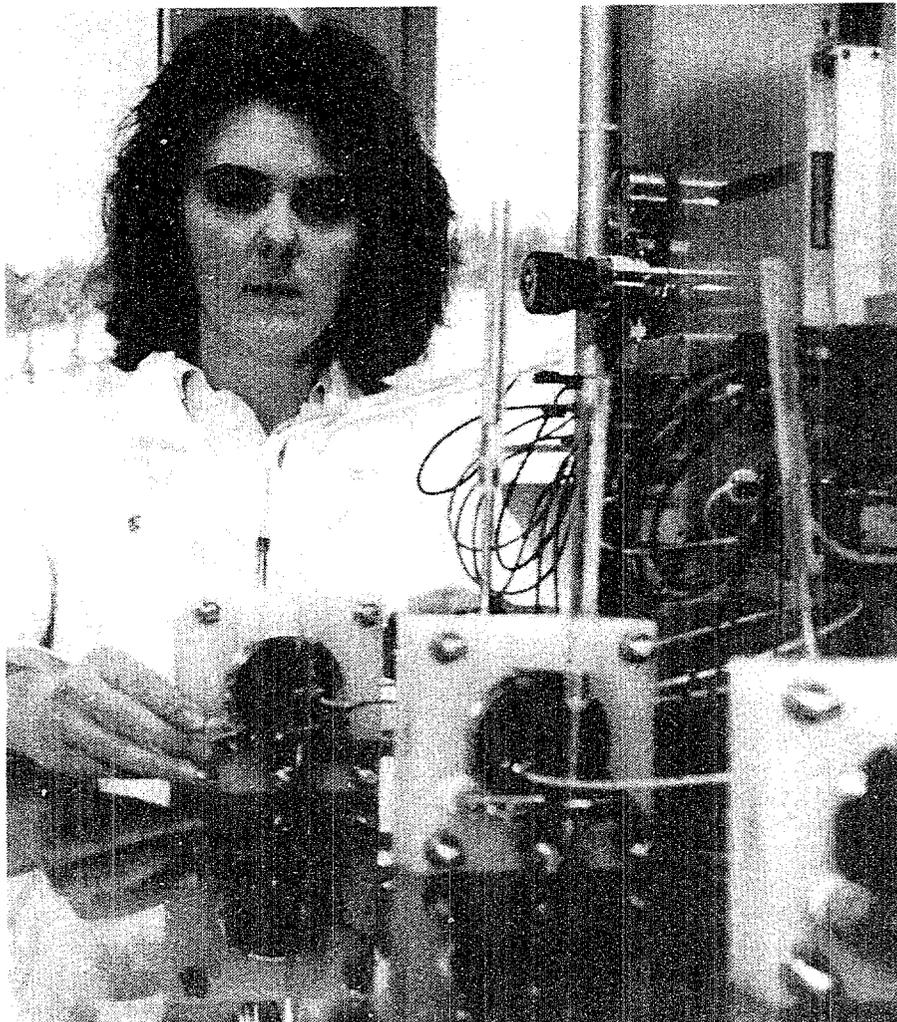
(SB) Schlussbericht vorhanden

ELEKTROCHEMIE

Überblicksbericht

zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Otto Haas



Zink-Luft-Batterie: eine berechtigte Hoffnung für das Elektromobil

Die Zink-Luft-Batterie besteht aus billigen Komponenten: Lufterlektrode, Zinkpastenelektrode und alkalischer Elektrolyt. Das Bild zeigt eine Forscherin des Paul Scherrer Instituts, Villigen, beim Experimentieren mit drei Testzellen. Es wurde eine Lebensdauer von 3'000 Stunden und 400 Zyklen erreicht.

1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1994

Ziel des Forschungsprogramms ist die Entwicklung elektrochemischer Energiespeichersysteme mit grosser Energie- und Leistungsdichte für das Elektromobil, die Solarstromspeicherung und den Spitzenstromausgleich. Als Überblick sind hier die im Programm bearbeiteten Batteriesysteme, um die sich die einzelnen Forschungsprojekte gruppieren, aufgelistet.

<u>Batterie-System</u>	<u>Motivation</u>	<u>Ziele 1994</u>
Metall / Luft - Batterie	Hohe Energiedichte Billig	Bifunktionelle O ₂ -Elektrode, Lebensdauer >1000 h Bipolare Zn/O ₂ -Batterie mit mehr als 100 Zyklen
Ionentransfer-Batterie	Reine Festkörperbatterie Nächste Batterie-Generation	Kationen-Einlagerung in Metalloxide Spez. Ladung >200 Ah/kg Test neuer Elektrolytsysteme
Ni / Metallhydrid	Ersatz für Ni / Cd Zusammenarbeit mit der Industrie	50 Ah-Batterie Messen der Selbstentladung an technischen Elektroden Neue MH ₂ -Elektroden mit spez. Ladung >300 Ah/kg
Bipolarer Bleiakku	Hohe Leistungsdichte Zusammenarbeit mit der Industrie	Bipolare Pb / PbO ₂ -Versuchszelle Abschluss der Battelle-Studie

2. 1994 durchgeführte Arbeiten

MEFALL / LUFT - BATTERIEN

Metall / Luft - Batterien sind wegen der hohen Energiedichte und der billigen und weitgehend ungiftigen Materialien sehr attraktiv für die Anwendung im Elektromobil. Heute sind erst primäre (nichtaufladbare) Zink / Luft - Batterien für Hörapparate und Weidezäune kommerziell erhältlich. Die Forschungsaktivitäten des Projekts alkalische wiederaufladbare Zink / Luft-Batterie [1] konzentrierten sich dieses Jahr auf die Konstruktion und das Testen von kompletten monopolaren Zellen (vgl. Titelbild) und bipolaren Batterien mit bis zu drei Elementen. Auf der Basis der im Vorjahr entwickelten Herstellungsverfahren von bifunktionalen Sauerstoffelektroden und Zink-Pastenelektroden mit einer Nennkapazität von 100 mAh/cm² wurden 25 cm² Elektroden hergestellt und in monopolaren Zellen getestet. Es konnten erfreulicherweise mit dieser Zelle bereits 450 Lade / Entladezyklen (3'000 h Betriebszeit) demonstriert werden, womit das Jahresziel bei weitem übertroffen wurde. Für diesen Versuch wurde allerdings noch reiner Sauerstoff an Stelle von Luft verwendet. Die durchschnittliche Energieausbeute für den Lade / Entladeprozess betrug 50 %. Aufgrund der Elektrodenmassen, der Elektrolytmasse und einer angenommenen Masse für das Zellengehäuse (ca. 15 % der kompletten Zellenmasse) lassen sich je nach Entladebedingungen spezifische Energien von 60 Wh/kg (einstündige Entladung) bis 120 Wh/kg (dreistündige Entladung) berechnen. Die experimentell bestimmte maximale spezifische Leistung der Zelle beträgt je nach Ladezustand 130 - 160 W/kg (mit Sauerstoff). Für die bipolare Batterie wurden hochporöse Cu-Schwämme als Träger für das Zink eingesetzt. Batterien mit drei Elementen ergeben Ladespannungen von ca. 6 V und Entladespannungen von 3 V.

Im Zusammenhang mit diesem Projekt wurde an der EPFL ein benutzerfreundlicher Computercode zur **Simulation der Stromdichteverteilung** in elektrochemischen Systemen entwickelt [2]. Der Computercode basiert auf der *Boundary-Element-Methode*. Es können damit elektrochemische Reaktionen der Metallabscheidung unter kontrollierten hydrodynamischen Bedingungen mit beliebiger Zellengeometrie simuliert werden. Die Programmierarbeiten und der Test des Codes wurden dieses Jahr abgeschlossen. Das Programm steht nun auch den andern Projektleitern zur Verfügung.

IONENTRANSFER-BATTERIE

Ionen-transfer-Batterien benötigen teurere Materialien als die Zink / Luft - Batterien, sie haben aber den Vorteil, dass komplett geschlossene Batterien gebaut werden können. Da bei Ionen-transfer-Batterien die an einer Elektrode frei werdenden Ionen direkt in die Gegenelektrode eingebaut werden und die Ionen nicht als Salze im Elektrolyten gespeichert werden müssen, kann das Elektrolytvolumen stark reduziert werden. Ionen-transfer-Batterien können daher prinzipiell höhere spezifische Energien erreichen als herkömmliche Akkumulatoren. Japanische Firmen haben bereits kleinere wiederaufladbare Li-Batterien mit einer spezifischen Energie von mehr als 100 Wh/kg für Videokameras kommerzialisiert. Grosse Batterien für das Elektromobil sind noch nicht erhältlich.

Im Programm **Elektrochemie** konzentrierten sich die Arbeiten zur Ionen-transfer-Batterie in den letzten Jahren auf die Magnesium-Ionen-transfer-Batterie. Im Hinblick auf die Entwicklung der positiven Elektrode einer wiederaufladbaren **Mg-Batterie** [3] wurde die Mg^{2+} -Einlagerung in Oxide und Sulfide untersucht. Reversible Mg^{2+} -Einlagerung wurde mit folgenden Verbindungen beobachtet: V_2O_5 , V_6O_{13} , MeV_3O_8 ($Me = Li, Na, K, Ca_{0.5}$ und $Mg_{0.5}$), MoO_3 und MoS_2 . Die höchsten spezifischen Ladungen von bis zu 380 Ah/kg (bezüglich Oxid) wurden mit nichtstöchiometrischem V_6O_{13} erzielt. Die Ladung des V_6O_{13} nahm jedoch mit der Zyklenzahl rasch ab. Mit Vanadiumbronzen konnten spezifische Ladungen von >80 Ah/kg während 60 Zyklen aufrecht erhalten werden. Mit MoO_3 erreichte man im ersten Zyklus spezifische Ladungen von bis zu 160 Ah/kg, mit Vanadiumbronzen 150 Ah/kg. Leider ist die elektrochemische Abscheidung des Magnesiums in diesen Elektrolyten nicht genügend gut, weshalb das Projektziel in Richtung **wiederaufladbare Lithium-Batterien** [4] abgeändert wurde. Das Zustandekommen einer Zusammenarbeit im Rahmen eines europäischen Projekts ist mit diesem neuen Projektschwerpunkt eher möglich. Die Einlagerung von Magnesiumionen in eine geeignete Kohle sollte jedoch noch versucht werden. Die Verwendung einer Magnesium / Kohle - Insertionselektrode könnte eventuell das Problem der metallischen Magnesiumelektrode entschärfen.

Die Einlagerung von Lithiumionen in Metalloxide ist schneller und reversibler als die Magnesiumionen-Einlagerung. Im ersten Zyklus konnten jeweils mit Vanadiumbronzen $NaV_3O_8(H_2O)_{1.5}$ spezifische Ladungen von 330 Ah/kg gemessen werden. Auch hier nimmt die spezifische Ladung im allgemeinen mit steigender Zyklenzahl ab. Nach 25 Zyklen wurde noch eine spezifische Ladung von 250 Ah/kg bestimmt. Mit MoO_3 konnte in einem ersten Zyklus eine spezifische Ladung von 300 Ah/kg erreicht werden, welche während 30 Zyklen auf 150 Ah/kg sank. Mit V_6O_{13} erreichte man während 80 Zyklen stabile spezifische Ladungen von 200 Ah/kg. Höhere spezifische Ladungen wurden mit V_2O_5 -Xerogel und $Cu_{0.2}V_2O_5(H_2O)_y$ erzielt. Graphit wurde als Material für die negative Elektrode gewählt. Es wurde während der ersten 20 Zyklen eine stabile spezifische Ladung von >160 Ah/kg (bez. Kohlenstoff) gemessen. Somit wurden die für 1994 gesetzten Ziele weitgehend erreicht, in einigen Fällen sogar etwas übertroffen. Die Erhöhung der Zyklenzahl hat 1995 Priorität. Dazu ist eine Optimierung des Elektrolyten erforderlich. Untersuchungen mit verschiedenen Alkylcarbonaten sind im Gange.

Das Projekt Ionen-transfer-Batterien schliesst auch die Arbeiten über **leitende Polymere** ein. Ähnlich wie in Metalloxide können auch in elektroaktive Polymere Ionen eingelagert werden. Im allgemeinen tauschen diese Polymere Anionen aus. In einem NF-Projekt [16] konnten aber durch Einführen von Sulfonsäuregruppen Polymere mit kationentauschenden Eigenschaften hergestellt werden. Damit konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich wäre, mit diesen Polymeren Ionen-transfer-Batterien zu bauen. An der Universität Bern wurden zur Untersuchung solcher Polymere **Rastertunnelmikroskop- und Rasterkraftmikroskop-Untersuchungen** sowie **Impedanzspektroskopie-Messungen** durchgeführt [5, 6]. Es ist gelungen, damit Schichtdickenänderungen in elektrolytischer Umgebung bis auf ca. 1-2 nm genau zu ermitteln. Das Filmwachstum der Polyhydroxyphena-

zinfilm konnte auch während der Polymerisation direkt verfolgt werden. Die Dissertation über **leitende Polymere für wiederaufladbare Batterien** [7] konnte 1994 abgeschlossen werden. In dieser Arbeit wurde Polyanilin als potentieller Anwärter einer wiederaufladbaren Polymerbatterie eingehend untersucht. Insbesondere wurden Untersuchungen über den Nukleationsmechanismus sowie die Verdichtung der Polymerstruktur durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass durch Vernetzen des Polymers die Stabilität und die Tertiärstruktur des Polymers wesentlich verbessert werden kann. Die spezifische Ladung des Polyanilins ist jedoch trotz Verbesserung der Struktur zuwenig attraktiv.

Im Rahmen des Projekts **Anwendungen von Polymeren in elektrochemischen Zellen** wurden Polymere durch Polykondensation von 4,4'-Bipyridin mit Dibromalkanen und von 4,4'-Bipyridin mit tosyliertem Aethylenglykol an der Universität Fribourg hergestellt und elektrochemisch charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, dass dabei interessante Elektrodenmaterialien mit hoher Zyklenstabilität synthetisiert werden können. Diese Elektrodenmaterialien können aber nur als Anionen-Insertionselektroden gebraucht werden. Die dabei gemessenen Anionen-Diffusionskoeffizienten sind sehr wertvolle Daten für die Simulationsrechnungen von Polymerelektroden. In einem Nachfolgeprojekt über **redoxaktive Polymere für elektrochemische Zellen** [9] sind erste Messungen an Polydithiocarbamaten durchgeführt worden. Thioverbindungen sind elektrochemisch noch wenig untersucht. **Literaturrecherchen** [17] haben gezeigt, dass mit solchen Verbindungen Polymere mit sehr hoher Ladungsdichte hergestellt werden können, welche als Kationen-Insertionsmaterialien für Lithium-Batterien von Interesse sind.

Das quantitative Verständnis der zeit- und raumabhängigen Prozesse in Batterien mit elektroaktiven Polymer-Elektroden ist wichtig für die Auslegung solcher Systeme. Dazu wurde in Fribourg ein Computercode für die **Modellierung einer Dünnschichtzelle mit zwei polymerbeschichteten Elektroden** entwickelt [10]. Diese Arbeiten haben gezeigt, dass es möglich ist, experimentell ermittelte Lade / Entladekurven solcher Systeme zu simulieren. Mit dem Code können erreichbare Stromdichten für vorgegebene Schichtdicken und Diffusionsparameter vorhergesagt werden

3. Pilot & Demonstrationsprojekte

NICKEL / METALLHYDRID - BATTERIEN

Nickel/Metallhydrid-Batterien haben eine zwei- bis dreimal grössere Energiedichte und wesentlich höhere Zyklenzahlen als der Bleiakkumulator. Ausserdem kann diese Batterie ohne Schaden 100%ig entladen werden und ist hinsichtlich Leistungsdichte auch sehr attraktiv. Besonders in den USA hat man deshalb grosse Hoffnungen, dass diese Batterie mittelfristig für das Elektromobil eingesetzt werden kann. Ob die erwähnten Vorteile den hohen Preis der Elektrodenmaterialien aufwiegen, muss allerdings noch gezeigt werden.

Im Nickel-Metallhydrid-Projekt der Firma LECLANCHÉ [11] ging es dieses Jahr um den Bau von Batterien mit über 150 in Serie geschalteten Elementen. Nach den guten Resultaten an Nickel-Metallhydrid-Einzelelementen mit Kapazitäten von 5 bis 90 Ah erwies sich diese Aufgabe als unerwartet schwierig. Insbesondere ergaben sich mit Monoblocks (z.B. 6 Elemente in einem Kunststoffgehäuse) thermische und mechanische Probleme, wie übermässige Erwärmung am Ladeschluss und somit geringe Ladeeffizienz, Gehäuseverformung und Probleme aufgrund der Konizität von Spritzgussgehäusen. Daher wurde ein neuartiges modulares Design entwickelt, bei dem die Elektrodenplatten über die ganze Höhe des Gehäuses parallel sind. Mit diesem Design wurden einige Prototypen-Batterien von 24 V / 10 Ah gebaut, die schon erfolgreich für Elektrofahrräder getestet werden und für elektrische Rollstühle von Interesse sind. Die ersten noch nicht optimierten Modelle ergaben bereits eine Energiedichte von 43 Wh/kg. Um die Funktionsweise von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren noch grundlegender zu verstehen und weiter optimieren zu können, wurden Lade - Entladekurven mit eingebauter Referenzelektrode aufgenommen, sowie Gasanalysen in Abhängigkeit vom Ladezustand durchgeführt.

Parallel zum LECLANCHÉ-Projekt werden in Fribourg Forschungsprojekte zur Entwicklung von kostengünstigen **Metallhydriden als Elektroden in reversiblen Batterien** bearbeitet [12, 13]. Dabei wurden Elektroden aus

den intermetallischen Verbindungen ZrV_xNi_{2-x} (AB_2 -Laves Phase) und $MmNi_{5-x}Si_x$ ($LaNi_5$ oder AB_5 -Phase) mit Mischmetall (Mm) anstelle des reinen Lanthans hergestellt und auf ihre Kapazität, zyklische Lebensdauer, Aktivierung, Selbstentladung, Lebensdauer bei erhöhter Temperatur und mögliche Kompaktiermethoden untersucht. Es wurden reversible Kapazitäten von bis zu 375 mAh/g erreicht, womit das angestrebte Ziel hinsichtlich spezifischer Ladung für 1994 deutlich übertroffen wurde. Mit Multikomponentenlegierungen auf der Basis von billigem Mischmetall und durch partielle Substitution von Ni durch Si, Al und Mn konnten korrosionsstabile AB_5 -Elektroden mit einer Anfangskapazität von 250 mAh/g entwickelt werden. Oberflächenanalytische Untersuchungen weisen auf die wichtige Rolle von Ni-Anreicherungen zum Erreichen hoher Austauschstromdichten hin. Weiter wurden Veränderungen der Oberflächenzusammensetzung von AB_5 -Metallhydelektroden der Zusammensetzung $MmNi_{3.6}Co_{0.7}Mn_{0.4}Al_{0.3}$ getestet. Der Einfluss von Fe-Substitution in kobaltfreien AB_5 -Legierungen auf die Lebensdauer und Oberflächenzusammensetzung wurde mit dem Ziel untersucht, durch Ersatz des Kobalts preisgünstige Legierungen zu erhalten. An AB_2 -Legierungen vom Typ $Ti_xZr_{1-x}Ni_{2-x}V_x$ wurde der Einfluss von Titansubstitutionen auf die Kapazität, Aktivierung und Lebensdauer der Elektroden untersucht.

Ein Problem der Nickel / Metallhydrid - Batterien ist die Selbstentladung dieser Batterie speziell bei höheren Temperaturen. Am PSI wurden deshalb im Projekt **Selbstentladung von Nickel / Metallhydrid-Batterien** [14] die Selbstentladung der Nickelelektrode erforscht. Diese wurde sowohl an Modellelektroden als auch an technischen Elektroden der Firma LECLANCHÉ als Funktion verschiedener Parameter untersucht. Modellelektroden zeigen eine deutliche Abnahme der Selbstentladungsrate mit der Dicke des Nickeloxidfilms. Die Selbstentladungsrate verdoppelt sich bei einer Temperaturerhöhung von 20°C auf 40°C. Lithiumzusätze zum Elektrolyten (<10 g/l) wirken sich positiv auf die Kapazität von realen Elektroden aus, zeigen aber keinen Einfluss auf die Selbstentladungsrate. Zn- und Co-Beimischungen zur aktiven Masse vermindern die Selbstentladungsrate erheblich. Mittels Atomkraft-Mikroskopie wurde das Quellverhalten von $\alpha-Ni(OH)_2$ bestimmt. Während des Ladevorgangs (Oxidation) schrumpft der Film um ca. 40 %.

BIPOLARER BLEIAKKUMULATOR

Der am BATTELLE-Institut in Genf entwickelte Prototyp eines **bipolaren Bleiakкумуляtors** [15] konnte dieses Jahr fertiggestellt werden. Als Trägermaterial wurde eine korrosionsbeständige PbCaSn-Legierung verwendet. Die Elektrode wurde mit einer von der Firma ELECTRONA gelieferten Aktivmasse pastiert, nachdem zur besseren Haftung und Kontaktierung beidseitig ein Gitter in das Trägermaterial geprägt wurde. Darauf wurden die bipolaren Elektroden in einer gasdichten Zelle getestet. In diesem Projekt konnte somit die Machbarkeit eines bipolaren Bleiakкумуляtors demonstriert werden. Die Batterie ergab die erwartete Spannung und die Kapazität der Summe der Einzelelemente. Die erreichte Leistungsdichte war jedoch wesentlich kleiner als die eines normalen Bleiakкумуляtors, was auf einen zu grossen Elektrodenabstand und eine zu dicke Aktivmasse sowie eine nicht optimale Elektrodenstruktur zurückzuführen ist. Zur Erhöhung der Leistungsdichte müsste auch das Gewicht der Trägerstruktur drastisch verringert werden. Das Projekt zeigt, dass vor allem noch materialtechnologische und konstruktive Probleme zu lösen sind.

4. Nationale und internationale Zusammenarbeit

NATIONALE ZUSAMMENARBEIT

Die nationale Zusammenarbeit innerhalb des Programms wird durch die Durchführung von Workshops, an denen die einzelnen Projekte vorgestellt und diskutiert werden, gewährleistet. Diese Workshops werden regelmässig auch von Vertretern der Batterieindustrie besucht. Es ergeben sich auch Kontakte zu anderen Programmen, die eine gewisse thematische Überlappung mit dem Programm Elektrochemie haben, so z.B. mit den Programmen Wasserstoff, Brennstoffzellen, Thermochemie, Photovoltaik, Elektrizität und Rationelle Energienutzung im Verkehr. Im Rahmen des schweizerischen Werkstoff-Forschungs-Programms besteht die Absicht der

schweizerischen Industrie, zusammen mit dem PSI ein **Superkondensatoren**-Projekt zu lancieren. Zur Abklärung, ob die Zielvorstellungen in diesem Projekt überhaupt realisierbar sind, wurden von der Programmleitung einige vielversprechende Vorversuche an geeigneten Elektrodenmaterialien durchgeführt [18]. Falls das Superkondensatoren-Projekt zur Ausführung kommt, wird ein beträchtlicher Teil des im Programm Elektrochemie erarbeiteten Know-hows auch von diesem Projekt genutzt werden können.

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT

Im Rahmen der Projekte Zn / Luft- & Li-Batterien (Ionentransfer-Batterien) bahnen sich nationale und internationale Zusammenarbeiten mit der Industrie und mit ausländischen Instituten, wie z.B. dem Zentrum für Sonnenenergie in Ulm und der Universität Graz, an. Für beide Projekte werden gegenwärtig mit inländischen und ausländischen Partnern EU-Gesuche ausgearbeitet.

5. Transfer in die Praxis

Der Transfer in die Praxis ist naturgemäss mit dem P&D-Projekt Nickel / Metallhydrid-Akkumulator am ehesten gegeben. Hier werden gewisse Arbeiten direkt in der Industrie oder mit deren Infrastruktur durchgeführt. Auch beim Lithium-Batterie-Projekt ist eine enge Zusammenarbeit mit LECLANCHÉ und eventuell anderen Batterie-firmen vorgesehen. Zur optimalen Umsetzung der erarbeiteten Resultate des Projekts über den bipolaren Bleiak-kumulator wurde dieses Projekt von Vertretern der Firma ELEKTRONA und der ACCUMULATOREN- FABRIK OERLIKON begleitet. Die mehr grundlagenorientierten Arbeiten werden in Form von Publikationen und durch die Organisation von Workshops verwertet. Am 16. Juni 1994 wurde zu diesem Zweck auch das 10. Tagessymposium *Elektrochemische Energiespeicherung* am PSI durchgeführt.

6. Ausblick für 1995

Im Verlaufe des Jahres 1995 wird das Programm **Elektrochemie** ins Programm **Brennstoffzellen** eingegliedert. Infolge der finanziellen Verhältnisse werden die Aktivitäten des Programms etwas reduziert werden. Es wird jedoch versucht, die Reduktion der BEW-Beiträge durch EU-Beiträge innerhalb des 4. Rahmenprogramms auszugleichen. Die Projektleiter sind deshalb aufgefordert, sich mit ausländischen Partnern zusammenzutun und gemeinsame Anträge für EU-Projekte zu stellen. Dies ist, wie oben erwähnt, zumindest in zwei Projekten bereits der Fall. Die europäische Zusammenarbeit wird in der Zukunft einen entscheidenden Einfluss auf das Programm ausüben. Für das Projekt über wiederaufladbare Zn / Luft-Batterien [1] sucht man gegenwärtig industrielle Partner und hofft, gemeinsam mit der Industrie und anderen Forschungslabors die Arbeiten in einem grösseren Rahmen, wenn möglich als EU-Projekt, weiterführen zu können. Die Arbeiten auf dem Gebiet der Ionentransfer-Batterien werden im nächsten Jahr mit Industriebeteiligung, wenn möglich auch im Rahmen eines EU-Projektes auf dem Gebiet der wiederaufladbaren Lithium-Batterien, fortgesetzt [4]. Die Entwicklung der Nickel-Metallhydrid-Batterien wird durch das P+D - Projekt der Firma LECLANCHÉ sowie durch die zwei Forschungsprojekte, welche sich den beiden Einzelelektroden widmen, mindestens bis Mitte 1995 weitergeführt [11, 13, 14]. Es ist zu hoffen, dass aufgrund der durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bald eine für mobile Anwendungen taugliche Batterie auf den Markt gebracht werden kann. Es wäre auch sinnvoll, wenn für den bipolaren Bleiakumulator gewisse materialtechnologische Probleme gelöst werden könnten. Ein Folgeprojekt müsste jedoch von der Industrie definiert werden.

7. Liste der Projekte

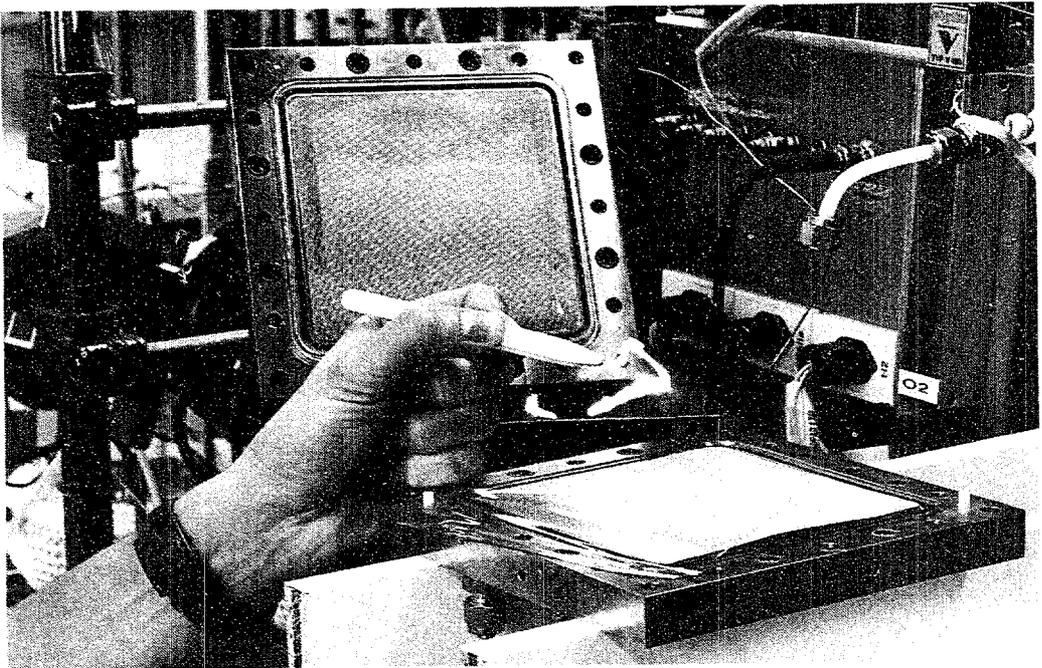
- [1] S. Müller, et al., PSI - Villigen : *Alkalische wiederaufladbare Zink / Luft-Batterie.* (JB)
- [2] D. Landolt, EPF - Lausanne : *Modellierung von elektrochemischen Systemen angewandt auf die Abscheidung und Auflösung von Metallen.* (SB)
- [3] P. Novák, PSI - Villigen : *Einlagerung von Mg²⁺ aus nichtwässrigen Medien in Metalloxide.* (SB)
- [4] P. Novák, PSI - Villigen : *Wiederaufladbare Lithium-Ionentransfer-Batterien.* (JB)
- [5] H. Siegenthaler, UNI - Bern : *In-situ Rastertunnelmikroskopie an nichtmetallischen Elektrodensubstraten.* (JB)
- [6] E. Schmidt, UNI - Bern : *Elektrochemische Impedanz-Spektroskopie an stromleitenden und Redox-Polymeren.* (SB)
- [7] A. McEvoy, EPF - Lausanne : *Conductive polymers for rechargeable batteries.* (SB) und J. C. Michaelson, Dissertation n° 1211
- [8] C.W. Schläpfer, UNI - Fribourg : *Anwendung von Polymeren in elektrochemischen Zellen.* (SB)
- [9] C.W. Schläpfer, UNI - Fribourg : *Redoxaktive Polymere für elektrochemische Zellen.* (JB)
- [10] C. Daul, UNI - Fribourg & E. Deiss, PSI - Villigen : *Simulation einer Dünnschichtzelle bestehend aus zwei Polymerelektroden.* (SB)
- [11] J. Desilvestro, P. Ruetschi, LECLANCHÉ, Yverdon : *Nickel-Hydrid-Akkumulator.* (JB)
- [12] L. Schlapbach, UNI - Fribourg : *Metallhydride als Elektroden in Batterien II.* (SB)
- [13] F. Meli, A. Züttel, L. Schlapbach, UNI - Fribourg : *Metallhydride als Elektroden in Batterien III.* (JB)
- [14] R. Michaelis, R. Kötz, PSI - Villigen: *Selbstentladung von Nickel /Metallhydrid.* (JB)
- [15] R. Schmitt, BATTELLE - Genève : *Bipolare Batterien.* (SB)
- [16] O. Haas, R. Kötz, PSI - Villigen : *Charakterisierung von leitenden Polymeren und Redoxpolymeren.* NF 20.32504.91 (SB)
- [17] K. Müller, BATTELLE - Genève : *Literaturrecherche und Analyse über schwefelhaltige Polymere und Polymere mit kleiner Äquivalentmasse.* (SB)
- [18] O. Haas, PSI - Villigen : *Programmleitung Elektrochemie.* (ZB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden
(ZB) Zwischenbericht vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

PILES À COMBUSTIBLE

Rapport de synthèse
sur les activités 1994 du programme de recherche

Chef de programme : Léo Dubal



La pile polymère du PSI

L'Institut Paul Scherrer est parvenu à construire une pile polymère de 100 cm^2 , de haute performance ($0,3 \text{ W/cm}^2$). La membrane est fabriquée par greffage radiatif sur une feuille d'HOSTAFILON ET de $100 \mu\text{m}$ d'épaisseur et la charge de platine de chaque électrode est de $0,8 \text{ mg/cm}^2$.

1. Centres de gravité du programme

Une pile à combustible est un générateur, convertissant directement en électricité l'énergie libérée lors d'une réaction chimique. Les réactants sont, d'ordinaire, l'oxygène (de l'air) et l'hydrogène (produit par reformage du gaz naturel). Ils doivent être tenus séparés par une membrane étanche aux gaz, non conductrice pour les électrons. Cette membrane doit posséder les propriétés d'un électrolyte, c'est-à-dire être conductrice pour certains ions (par ex.: O^{2-} pour un électrolyte *céramique* ou H^+ pour un électrolyte *polymère*). L'assemblage cathode Positive, Electrolyte, et anode Négative est appelé structure *FEN*. Le module élémentaire d'une pile à combustible est constitué d'une PEN complétée de chaque côté par un "diffuseur" (traditionnellement appelé interconnexion) et un collecteur de courant (réticulé, en l'absence de diffuseur). Une PEN produit typiquement un courant de plus de $0,5 \text{ A/cm}^2$, sous une tension de l'ordre de $0,5 \text{ V}$. La mise en série par empilement (*stack*) permet d'obtenir la tension d'utilisation souhaitée. Les utilisations envisagées des piles à combustible sont les installations chaleur-force au gaz naturel et l'alimentation des véhicules électriques.

Le programme de recherche "Piles à combustible" est axé sur les systèmes et nouveaux procédés de fabrication, en se basant sur des matériaux connus, compatibles avec une température opérationnelle comprise entre 800 et $850 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les piles céramiques et entre 70 et $120 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les piles polymères. La dimension industrielle des activités du programme et son solide ancrage dans la collaboration internationale constituent ses meilleurs atouts. Le rôle *subsidaire* du programme de recherche de la Confédération dans ce domaine vise à: *i*) offrir au plan national une tribune pour l'élaboration d'une stratégie de recherche cohérente; *ii*) stimuler l'activité du secteur privé par des mandats de recherche sur des problèmes-clés; *iii*) mettre en place au sein des Hautes Écoles et Instituts de recherche des centres d'excellence afin de soutenir les efforts de l'industrie; *iv*) créer des conditions favorables pour des initiatives de la part des Écoles polytechniques fédérales; *v*) assurer l'insertion des efforts suisses dans la collaboration internationale; et, *vi*) favoriser la promotion de cette technologie en tenant ses compétences à disposition de l'ensemble du secteur public. Le programme de recherche est en voie d'être complété par le programme Pilotes & Démonstration "Piles à combustible", activité essentielle pour établir la crédibilité de cette technologie sophistiquée.

2. Évaluation 1994

1994 a été une année charnière pour le programme de recherche. Dans le domaine des piles céramiques, le banc d'essai **HEXISTM** (*Heat EXchanger Integrated Stack*) de **SULZER Innotec**, à Winterthur est le seul qui soit à même de tester en autarcie thermique des PEN de provenances diverses. Le projet **HEXIS** est parvenu à surmonter les principales difficultés technologiques rencontrées, dans la réalisation d'un modèle fonctionnel de pile au gaz naturel de 1 kW . Ceci a permis, du même coup, d'avancer dans la réalisation d'un modèle de 7 kW . Citons en particulier la fabrication réussie, chez **MEDICOAT**, à Niederrohrdorf, à l'aide de la technologie de projection sous vide au chalumeau à plasma (**VPS**), de PEN ne présentant pas de dégradation après $1'000$ heures d'opération. Ces PEN pourraient être combinées avec les très prometteurs "diffuseurs-air" développés aux EPF de Lausanne et Zürich. La localisation de la fonction "diffuseur-air" dans un élément bon marché, devrait enfin permettre l'utilisation d'une cathode mince et d'un collecteur de courant non réticulé avec une barrière de diffusion anti-chrome de bonne adhésion. Les activités sur les piles polymères à l'Institut Paul Scherrer (**PSI**), à Villigen, ont connu, elles, un bond en avant dans les procédés de fabrication des membranes grâce à l'utilisation d'un nouveau substrat de départ, **HOSTAFLOX ET®** (produit par **HOECHST**, à Frankfurt), qui se laisse greffer en un polymère conducteur avec une dose de radiation trois fois plus faible que le **FEP**, et qui présente des propriétés mécaniques très intéressantes.

La tenue à Lucerne du 1er Forum européen sur les piles céramiques [12] a constitué un incontestable point d'orgue des réunions scientifiques de cette année. On ne peut cependant passer sous silence la tenue à Dübendorf de la réunion du Comité exécutif du programme piles à combustible de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et celle, à Horgen, de l'atelier sur les piles polymères [9].

L'activité Pilotes & Démonstration a été centrée sur l'installation chaleur-force GAZEL des Services Industriels de Genève. Il s'agit d'une pile à électrolyte liquide (acide phosphorique) de la firme américaine ONSI, alimentée au gaz naturel et d'une puissance de 0,2 MW_{el}. Le bilan d'exploitation est réjouissant: fin décembre GAZEL [7] totalisait 13'980 heures de fonctionnement. Elle a produit - avec un taux de disponibilité de 90% - un total de 2'645 million de kWh. Le rendement de conversion du gaz en électricité, calculé sur le pouvoir calorifique inférieur, a été de 40,5%. La chaleur produite sert à prévenir le givrage en préchauffant le gaz naturel à l'entrée du poste de détente et de comptage, ainsi qu'au chauffage d'un bâtiment.

Dans le secteur privé, le projet Pilote d'ATEL, à Niedergösgen, porte sur l'expérimentation de deux piles polymères de la firme canadienne BALLARD, de 3,5 kW_{el} chacune. Elles sont alimentées en hydrogène produit par un électrolyseur. Des résultats préliminaires ont été présentés à l'atelier d'Horgen [9].

3. Buts visés et succès en 1994

PILES CÉRAMIQUES

Pour le projet HEXIS, il s'agissait de développer, pour le côté air, une couche de protection contre la diffusion du chrome à l'interface entre la cathode et le collecteur de courant en alliage DUCROLLOY® - Cr₅Fe₁Y₂O₃, produit par METALLWERK PLANSEE, Reutte (A), dont le coefficient de dilatation est ajusté à celui de la zircone - ainsi que de poursuivre l'amélioration de la mise en contact des PEN pour quintupler la puissance de pointe de la pile.

En autarcie thermique, la puissance atteinte par le prototype a été de 320 W, soit le triple de celle du modèle construit l'an dernier; progrès moins rapide qu'espéré, mais accompagné de très importants gains de savoir-faire à tous les niveaux du système HEXIS.

Pour le projet Réalisation de PEN HEXIS-compatibles, il s'agissait: a) d'atteindre une puissance à 920°C de plus de 150 mW/cm², sur plusieurs centaines d'heures avec des collecteurs de courant réticulés en HAYNES2-30®, b) de démontrer à l'aide d'un stack de cinq PEN de 12 cm Ø, que la taille pouvait être élargie jusqu'à une dimension pratique.

Seule la technique VPS a permis de fabriquer des échantillons maintenant leurs performances pendant l'000 heures d'opération, ainsi que des éléments de 12 cm Ø se laissant facilement assembler; le premier stack de cinq PEN n'a cependant pas fonctionné correctement suite à l'obturation accidentelle du "diffuseur-combustible".

PILES POLYMÈRES

Les objectifs étaient d'augmenter la surface des membranes fabriquées par greffe radiative jusqu'à 100 cm² et d'assembler une PEN donnant 350 mW/cm² (en opérant sous Air / H₂).

Alors que la taille maximum des membranes utilisant comme base le FEP a été de 81 cm², avec l'HOSTAFLON ET, mécaniquement plus souple, l'objectif des 100 cm² a pu être atteint. En ce qui concerne la puissance visée, une surpression de 2 bars est nécessaire. Avec une charge de platine de 0,8 mg/cm² par électrode, l'augmentation de la résistance de la membrane après l'000 heures de fonctionnement est restée inférieure à 5%.

4. Travaux de recherche effectués et résultats obtenus en 1994

PILES CÉRAMIQUES

a) Fabrication de PEN et Micromodélisation

À l'EPF-Zürich, s'est déroulé un atelier [10] pour faire le point sur le savoir-faire en matière de cathodes et collecteurs de courant. Il ressort que la polarisation cathodique, observée lors du fonctionnement d'une PEN, dépend fortement de la morphologie des cathodes de $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSM), et présente un minimum en fonction de leur température de frittage. Pour une PEN à "domaine-cathode" (électrolyte dopé au manganèse par voie chimique), la spectroscopie d'impédance a permis de démontrer le caractère irréversible des modifications intervenant à l'interface lors de l'activation électrochimique. Le rôle du dopage au manganèse comme inhibiteur de formation de $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ a aussi été avancé. Ces résultats confortent le rôle favorable de l'oxygène pur lors de la première mise en opération et l'importance de la fonction "bon diffuseur-air" pour éviter que l'enrichissement local en azote n'étouffe l'interface.

Chez SULZER Innotec [1], un modèle d'élément de pile de 12 cm Ø, astucieusement instrumenté, a pu être caractérisé pour la première fois en présence d'une alimentation en méthane reformé. Ces mesures constituent une des rares contributions industrielles au projet SOFC de l'AIE; elles représentent un ingrédient décisif pour la validation en cours du modèle numérique développé dans le cadre de la collaboration internationale. Les collecteurs de courant ont dû être spécialement préparés pour laisser passer les diverses sondes; faute de mieux, le choix du métal s'est porté sur l'alliage HAYNES230. L'incompatibilité des coefficients de dilatation thermique a provoqué des fissures qui ont limité la puissance de la PEN à 4 W. Résultat important: que ce soit en terme de puissance ou de profil de température, le passage de l'alimentation en hydrogène à celle en méthane reformé, n'a pas induit de différence significative.

À partir de 830°C, le chrome des alliages métalliques "haute température" tend à s'évaporer. SULZER Innotec a mis en évidence le mécanisme de formation d'une couche isolante de Cr_2O_3 , à l'interface cathode-électrolyte, par le transport de CrO_3 en phase gazeuse [8], d'où nécessité d'une barrière de diffusion. Citons, entre autres, la couche protectrice "antichrome" en LSM, déposée par VPS, chez MEDICOAT, sur le collecteur de courant réticulé. Pour contrer l'effet d'ombre de cette structure, la projection est polygonale.

À l'EPF-Lausanne [3], la recherche d'une solution pour l'utilisation pratique du concept de "domaines catalytiques" s'est avérée plus difficile que prévue. En collaboration avec l'EMPA, à Dübendorf, une technique de préparation du domaine-cathode, reproductible et compatible avec de grandes surfaces, a été explorée (*spray*), mais la morphologie de la surface ainsi traitée diffère de celle obtenue manuellement. Ceci peut être considéré comme étant la raison de la très médiocre performance électrochimique. Par ailleurs, le frittage à 1150°C d'une cathode de LSM sur le domaine-cathode donne des résultats bien inférieurs à ceux obtenus lorsque ce dernier est mis en contact avec le collecteur de courant par des grains de LSM juxtaposés, et activé électrochimiquement à 850°C. Pour sa part l'EMPA [5] a mis au point un procédé de fabrication d'un mélange bi-modal de poudre de LSM, dans l'espoir de stabiliser les grains (*necking*) à 850°C, mais la différence, réalisée dans la taille des grains (facteur 10), s'avère ne pas suffire pour provoquer l'effet souhaité. Une alternative ingénieuse a été trouvée à l'EPF-Lausanne: on utilise comme diffuseur-air un feutre de zircono rendu conducteur par imprégnation au $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.98}\text{Ni}_{0.02}\text{O}_3$ (LSCN), fritté au collecteur de courant, et mis en contact au domaine-cathode. Par ailleurs, l'actuelle procédure, en condition de court-circuit, d'activation simultanée du domaine-cathode et du domaine-anode est incompatible avec l'assemblage en stack: sous un courant trop élevé, l'anode des PEN les moins performantes tend à s'oxyder. Aucun des échantillons livrés à SULZER Innotec n'ayant réussi à passer le test de compatibilité avec HEXIS, l'utilité pratique des domaines catalytiques n'est pas démontrée. Par contre, les essais d'utilisation du diffuseur-air avec les PEN produites par VPS peuvent être qualifiés de très encourageants.

À l'EPF-Zürich [4], le projet d'un module élémentaire pour les *stacks* HEXIS a connu un premier succès avec la fabrication d'un diffuseur-air en mousse dure de LSM. Son coût de fabrication est minime et avoisine celui du matériel. Ce diffuseur de 3 mm d'épaisseur et contenant 20 pores/cm, devrait pouvoir être fabriqué avec un diamètre de 30 cm. Sa rigidité lui permet de servir de support mécanique pour la construction d'une PEN: un diffuseur de 6,5 cm Ø a été fritté avec succès, par l'intermédiaire d'une cathode en LSM, à un disque d'électrolyte zircone de 7,5 cm Ø sans que le cyclage thermique n'affecte l'étanchéité de la membrane. Après imprégnation avec une solution de LSCN, la conductivité du diffuseur à 850°C peut dépasser 13 S/cm. Cependant, les échantillons de PEN livrés à SULZER Innotec n'ont pas réussi le test de compatibilité avec HEXIS, l'anode présentant une résistivité de surface trop importante.

MEDICOAT, à Niederrohrdorf [2] a fourni à SULZER Innotec des PEN de 8 cm². Après 1'000 heures de fonctionnement, aucune dégradation des performances n'était encore à signaler. Bien que la puissance spécifique, (mesurée avec les collecteurs réticulés HEXIS), ne fut au départ que de 110 mW/cm², après 400 heures elle atteignait la borne milliaire des 150 mW/cm², donnant droit au label "HEXIS-compatible". Forte de ce succès, MEDICOAT s'est lancée dans la fabrication de modules élémentaires HEXIS de 12 cm Ø. En utilisant comme substrat de départ un feutre de nickel brasé à haute température au collecteur bipolaire, à l'aide du procédé VPS, on a pu déposer, sans interruption du vide, l'anode, l'électrolyte, la cathode puis, sur la face réticulée du collecteur de courant, la couche antichrome. Pour assurer la planéité, le substrat est, si nécessaire, fraisé; l'analyse topographique de la surface de la cathode révèle des variations de hauteur inférieures au millimètre, et, même, dans le meilleur des cas, à 0,2 mm. Les cinq meilleurs modules élémentaires ont été livrés à SULZER Innotec où ils ont été, sans peine, assemblés en *stack* et testés. L'analyse *post mortem* a montré que, lors du découpage au laser et de la projection polygonale de la première couche, le bord du feutre de nickel avait accidentellement été en grande partie obturé, entravant la libre circulation du gaz et provoquant l'oxydation de l'anode.

Il faut encore signaler ici, le programme de SULZER Innotec d'essai de longue durée de divers échantillons de PEN (dont ceux de MEDICOAT), qui s'est déroulé au Laboratoire de la SSIGE à Schwerzenbach et qui a été financé par le Fonds de l'industrie gazière, FOGA. Dans le cadre du Programme Prioritaire sur les Matériaux, lancé par le Conseil des Écoles polytechniques, les travaux de recherche exploratoire des équipes de SULZER Innotec, de l'EPFL et de l'EPFZ ont démontré que l'oxyde de cérium pouvait représenter un matériau alternatif à la zircone pour des piles fonctionnant à 700°C.

b) Système HEXIS

Avec une pile de 46 PEN produisant 320W à 938°±32°C, l'objectif de SULZER Innotec [1] de résoudre l'ensemble des problèmes rencontrés l'an dernier était trop ambitieux: le fait de tripler en 12 mois la puissance et démontrer un écart maximum de température de 64°C doit être considéré comme un net succès. Il est à rappeler qu'il n'est toujours pas possible de trouver sur le marché, des PEN répondant à des critères préétablis de performance électrochimique et de planéité. Le gain de puissance obtenu peut donc être en grande partie attribué à l'utilisation des collecteurs de courant réticulés en DUCROLLOY avec barrière de diffusion côté air. La difficulté d'assemblage de PEN insuffisamment planes est la cause de la limitation de ce gain. Preuve en est, l'excellent résultat obtenu avec un *stack* de 5 éléments sélectionnés, où l'ensemble du *stack* a produit exactement le multiple des performances des PEN individuelles.

À signaler ici le soutien apporté par le Fonds national pour la recherche énergétique, NEFF à l'ingénierie de la pile HEXIS, chez SULZER Innotec (*Projet 500.1: Adaptation du concept HEXIS à un modèle de 7 kW*) et chez MEDICOAT (*Projet 611: Adaptation du procédé VPS aux conditions de fabrication de PEN de 200 mm Ø*).

PILES POLYMÈRES

a) Procédé de fabrication des membranes

Alors que les membranes fabriquées, au PSI [6], par greffe radiative à partir de FEP, n'ont pas la tenue mécanique suffisante pour être assemblées en PEN avec un distributeur-air de plus de 80 cm², celles obtenues à partir d'HOSTAFON ET conviennent parfaitement jusqu'à 14 cm de côté. De plus, pour obtenir un taux de greffe de 57%, une dose de radiation de 20 kGy suffit, soit 3 fois moins que pour le FEP. En irradiant avec des électrons à l'aide de l'installation de la maison STUDER, à Dänikon, quelques secondes suffisent pour délivrer cette dose, alors que plusieurs heures étaient nécessaires avec les rayons gamma au PSI; cette réduction du temps d'irradiation permet de sauvegarder les propriétés mécaniques du polymère. L'augmentation de la résistivité de la membrane après 1'000 heures n'est que de 5%. Il a été ainsi possible d'assembler une PEN de 100 cm² (voir photo de l'en-tête) atteignant la borne milliaire des 350 mW/cm² (avec une surpression d'air de 2 bars). Ce développement fait l'objet d'un brevet.

b) Caractérisation électrochimique des structures PEN

Sur le banc d'essai du PSI [6], la caractérisation de diverses membranes montées en PEN a été effectuée. L'effet de contamination de l'hydrogène avec CO a été évalué, ainsi que l'influence de la pression partielle d'oxygène, et de la charge en platine des électrodes sur les performances tension-courant.

5. Activités pour 1995

a) Système HEXIS

Développer un module de reformeur du gaz naturel, intégrable à l'enceinte thermique du système HEXIS; analyser le gaz reformé et établir le bilan énergétique détaillé.

b) Fabrication de PEN par VPS

Rattraper rapidement la borne milliaire des 200 mW/cm² à 850°C, en révisant chaque étape de la fabrication des PEN (nombre de passage pour l'électrolyte, composition des électrodes, assemblage avec un diffuseur-air en feutre céramique et collecteur de courant métallique), puis passer à 20 cm Ø.

Établir les conditions optimales d'activation électrocatalytique des PEN lors de leur mise en service initiale (*Revised Recommended Practices*).

c) Micromodélisation

Explorer la production d'électrolytes zircone extra-minces (5 µm d'épaisseur) à l'aide du procédé PVD, en utilisant comme substrat, le diffuseur en mousse dure de l'EPF-Zürich.

Évaluer quantitativement les diffuseurs-air céramiques, et l'effet de privation de combustible en effectuant le diagnostic *in situ* d'un élément HEXIS de 12 cm Ø.

d) Piles polymères

Rendre les membranes PSI eurocompatibles et leur trouver place dans les *stacks* des partenaires, et poursuivre l'établissement, au PSI, d'un centre d'excellence pour l'évaluation des membranes et des *stacks*.

Explorer le développement d'un système de gestion de l'eau pour les *stacks* des partenaires européens.

Contribuer à résoudre le problème de la production d'un combustible de qualité suffisante.

6. Collaboration internationale

En octobre, sur l'initiative de U. Bossel, a eu lieu à Lucerne le "1^{er} Forum européen sur les piles céramiques". La participation de 190 experts venus du monde entier (dont 11 pays européens), et les 94 communications consignées dans 1'053 pages de comptes-rendus [12], témoignent de l'important succès remporté par cette rencontre.

Dans le cadre de la préparation du 4^{ème} Programme-cadre de l'Union européenne, la Suisse a été invitée à participer à Bruxelles, en novembre, à l'atelier sur la stratégie européenne en matière de piles à combustible. Suite à cet atelier, une journée de travail sur l'opportunité d'un projet sur le calandrage s'est tenue en décembre à Dübendorf avec des partenaires potentiels anglais et allemands, et a conclu au caractère prématuré d'un tel projet. Dans le cadre du projet piles polymères du programme-cadre JOULE II, une réunion d'experts du projet a eu lieu en octobre à Villigen. Les contacts s'intensifient afin de donner un caractère formel à la poursuite de cette collaboration .

Dans le programme de collaboration dans la recherche en matière de piles à combustible sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) la Suisse participe à deux projets. En mars, la 8^{ème} réunion du Comité exécutif de ce programme a eu lieu à Dübendorf. Dans le projet sur les piles céramiques, la Suisse conduit l'activité sur le diagnostic des *stacks* [11]. Tous les groupes de recherche suisses ont présenté des contributions à l'atelier de Rome [8]: celle de SULZER Innotec portant sur la contamination de la cathode par le chrome en phase gazeuse fera date. Dans le domaine des piles polymères, le PSI assume le rôle de *Lead-country* pour les activités AIE concernant les membranes avancées. Mentionnons encore qu'en mars, profitant de la présence en Suisse de l'Agent exécutif de ce projet, le 1^{er} atelier suisse sur les piles polymères a été organisé à Horgen, et a pu compter sur l'hospitalité de DOW Europe [9].

7. Information & Coordination

Le groupe de travail Piles à combustible est ouvert aux personnes prêtes à partager leur expérience dans un climat de confiance mutuelle. Son activité est complétée chaque année par un atelier ciblé sur un point chaud de la recherche, ainsi que par les ateliers AIE et autres rencontres internationales. Des groupes *ad hoc* d'experts sont mis sur pied pour renforcer les projets en difficulté. Pour établir un consensus sur la stratégie à suivre jusqu'en 1999, un groupe d'accompagnement du programme est en voie de formation. Pour assurer la coordination avec le programme prioritaire sur les matériaux pour piles à combustible, le chef de programme a participé à des réunions de travail. Au niveau international, il représente la Suisse dans les organismes de gestion des programmes de collaboration. Pour évaluer les priorités immédiates, il est secondé par un expert.

8. Liste des projets

- [1] R. Diethelm, SULZER Innotec, Winterthur : *SULZER-HEXIS SOFC SYSTEM*. (RA)
- [2] H. Gruner, MEDICOAT, Niederrohrdorf : *HEXIS-kompatible PEN Strukturen durch VPS*. (RA), ENET 9200351
- [3] A. McEvoy et al., ICP2 / EPF - Lausanne : *Piles céramiques avancées*. (RA)
- [4] A. Mitterdorfer, K. Sasaki, NMW / ETH - Zürich : *Integrierte Stack Repeat Element für HEXIS*. (RA), ENET 9400061/9400511

- [5] B. Gut et al., EMPA - *Dübendorf: Werkstoffe & Komponenten für SOFC.* (RA), ENET 9400521
- [6] G. Scherer, PSI - *Villigen: Material- und Strukturaspekte von Membran-Brennstoffzellen.* (RA), ENET 9200551

(RA) rapport annuel 1994 disponible

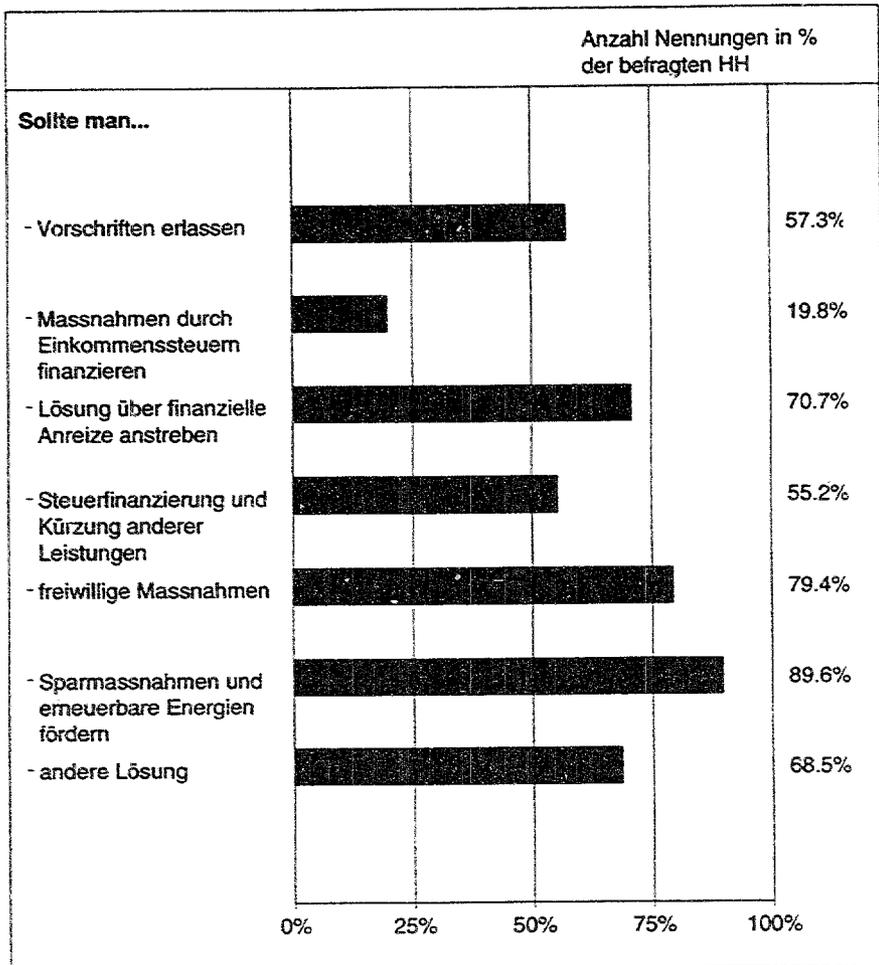
9. Références

- [7] *GAZEL - SIG, Pile à combustible au gaz naturel*, Fiche signalétique au 31 oct.1994 établie par Nguyen Dinh Lan, SI-Genève
- [8] *Advanced SOFC, Roma*, February 22-24, 1994, Proceedings of the 6th IEA SOFC Workshop, ed. ENEA, June 1994.
- [9] *Polymer Electrolyte Fuel Cells, Horgen*, March 18th, 1994, Summary Notes of the 1st Swiss Workshop, éd. OFEN, mars 1994
- [10] *Cathodes and Contacts, Zürich*, June 15th,1994, Workshop's Proceedings, ed. EPFL 1994.
- [11] *Instrumentation & In-situ Diagnostics, Chexbres*, September 30th,1994, Proceedings of the IEA SOFC activity meeting, ed. EPFL, Jan. 1995.
- [12] *1st European SOFC Forum, Luzern*, October 3-7, 1994, Proceedings, ed. Ulf Bossel, Oct. 1994

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1994

Programmleiter : Ruedi Meier



Was soll man im Umweltschutz machen ?

Zustimmung zu Umweltschutzmassnahmen: Förderungsmassnahmen und freiwillige Massnahmen besitzen bei den befragten Haushalten (HH) eine sehr hohe Akzeptanz.

1. Zielsetzung und Programmübersicht

Mit dem Forschungsprogramm "Energiewirtschaftliche Grundlagen" wird die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen für eine effiziente und umweltverträgliche Energiepolitik der Unternehmen und Haushalte, vor allem aber auch der öffentlichen Hand angestrebt. So ist im abgelaufenen Jahr die Datengrundlage für energiepolitische Entscheide weiter verbessert worden: Zusammenhänge der CO₂-Problematik sind vertieft untersucht worden und mit Hilfe der erarbeiteten Ökoinventare lassen sich die Umweltauswirkungen von Energiesystemen transparenter erfassen.

Dank den erstellten **Energieperspektiven** werden Aussagen zur zukünftigen Energienachfrage und zu den Auswirkungen von bereits ergriffenen sowie beabsichtigten energiepolitischen Massnahmen in fundierter Weise möglich. Zudem werden Angebotslücken sichtbar, welche für die weitere Investitionspolitik in neue Energiesysteme von erheblicher Bedeutung sind. Weiter ist es gelungen, die Verteilungseffekte verschiedener Varianten von CO₂-Abgaben zu erfassen.

Die Bewertung von **Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung** hat einen vorläufigen Abschluss gefunden: Aufgrund von Schadensberechnungen werden externe Kosten von 4 - 7,2 Milliarden Franken ausgewiesen. Es werden spezifische Preiszuschläge für die verschiedenen Energieträger empfohlen. Die Unfallrisiken der Stromerzeugung (Staudammbrüche, KKW-Unfälle) und die Vermeidungskosten eines möglichen Treibhauseffektes werden separat ausgewiesen. Als besonders domenvoller Bereich hat sich u.a. die Bewertung der Risiken der Kernenergienutzung herausgestellt. Weitere Vertiefungen sind unabdingbar, um zu breiter abgestützten Resultaten zu gelangen. Mit der Studie **Risikobewertung von Energiesystemen** ist zumindest ein erster Einstieg gelungen, indem sich verschiedene Fachdisziplinen zu den anstehenden Risiko-Fragen geäußert haben.

Mit Pressekonferenzen, Veranstaltungen, Workshops und Fachartikeln sind die erarbeiteten Resultate einer breiteren Öffentlichkeit bekannt gemacht worden.

Die Programm-Begleitgruppe nahm eine Standortbestimmung vor und legte die Arbeitsschwerpunkte für die nächsten Jahre fest.

2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

DATEN

Mit dem Projekt **Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und Klima-Untersuchungen durch Analysen an polaren Eisbohrkernen** [1] lässt sich die Klima- und Umweltgeschichte der letzten 250'000 Jahre rekonstruieren. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die grossen Klimaschwankungen immer von einer Änderung der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen begleitet waren und dass es auch kurzfristig sehr schnelle Klimaübergänge gab, welche in wenigen Jahrzehnten Temperaturschwankungen von mehreren Grad C zeigten.

Das **Swiss FACE-Projekt** [2] zeigt, dass der CO₂-Anstieg in der Atmosphäre nicht nur potentielle Auswirkungen auf das Klima hat, sondern auch das Pflanzenwachstum beeinflusst. So ergaben sich im laufenden Freilandversuch bedeutende Ertragszunahmen bei Weissklee und Gras-/Weissklee-Mischungen, während in Gras-Reinbeständen nur eine geringe Ertragszunahme zu verzeichnen war. Beim Gras wurde eine über 50%-ige Zunahme der Wurzelmasse gefunden.

Bei der Untersuchung **Klimabereinigung Energieverbrauch Raumwärme: Gebäudemodell Klima** [3] wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem der effektive Erfolg von Energiesparmassnahmen oder die klimaneutrale Entwicklung des Energieverbauchs erfasst werden kann. Die Resultate werden direkt für die Energieperspektiven

eingesetzt, sie können aber auch von Kantonen, Gemeinden oder Besitzern von grösseren Gebäudebeständen verwendet werden.

Die Analysen **Basisdaten und Perspektiven zur Entwicklung des Gebäudeparks 1990-2030** [4] beinhalten Modellrechnungen zu den Flächenveränderungen und zur Bautätigkeit für die Energieperspektiven. U.a. wird ausgewiesen, dass im Jahre 2030 die Energiebezugsfläche 750 Mio. Quadratmeter betragen soll, was gegenüber 1992 einer Zunahme von 190 Mio. Quadratmetern oder 41% entspricht.

MODELLE, PERSPEKTIVEN

Die Erarbeitung von **Energieperspektiven** mit einem Zeithorizont bis ins Jahr 2030 stellt einen gewichtigen Schwerpunkt des Forschungsprogramms dar: Energieperspektiven sind für eine rationale Energiepolitik eine unabdingbare Voraussetzung. Nur so können allfällige Angebotslücken frühzeitig erkannt werden, um nötige Investitionsentscheide rechtzeitig zu initiieren. Auswirkungen von bestehenden und beschlossenen Energie-Massnahmen werden in einem Gesamtzusammenhang aufgezeigt. Weitergehende Massnahmen werden sichtbar. Die Energieperspektiven erlauben es zudem, die Emissionen des Energieverbrauchs aufzuzeigen; eine wichtige Grundlage für eine effiziente Umweltpolitik wird geliefert. Zudem wird auf die wirtschaftlichen Effekte der verschiedenen Szenarien eingegangen.

Insgesamt werden vier Szenarien erstellt, wobei der Energieverbrauch aufgrund von vier Teilmodellen (Haushalte, Dienstleistungen/Landwirtschaft, Industrie und Verkehr) aggregiert wird. Für die einzelnen Bereiche wird mit dem *Bottom-up*-Ansatz (Aggregation der effektiven Verbrauchsentwicklung einzelner Funktionen wie Heizung, industrielle Verfahren und Prozesse) gearbeitet. Koordination, Kontrolle, Bewertung und Synthesearbeit liegen bei der Firma PROGNOSE [5]. Im Jahre 1994 konnten die Szenarien 1 und 2 abgeschlossen werden.

Das Szenario 1 zeigt die Trendentwicklung unter Beachtung bereits beschlossener Energiemassnahmen (z.B. individuelle Heizkostenabrechnung, Energiesparnormen). Dabei zeigt sich, dass längerfristig eine grosse Deckungslücke bei der Elektrizitätsversorgung besteht und der Bruttoenergieverbrauch vor allem zwischen 2000 und 2010 kontinuierlich zunehmen wird.

Das Szenario 2 schliesst beabsichtigte Massnahmen wie neue bzw. verschärfte Verbrauchsstandards oder eine CO₂-Abgabe mit ein. Damit fällt gegenüber dem Szenario 1 der gesamte Energieverbrauch um 21 PJ oder 8,5% geringer aus. Der Stromverbrauch ist um 5% geringer.

Das **St-GALLER ZENTRUM** für **ZUKUNFTSFORSCHUNG** erarbeitet für die laufenden Energieperspektiven die **Rahmendaten** [6] (Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, Wertschöpfung pro Branche usw.), die in den Verbrauch Eingang finden. Grundlage für die Datensätze bildet ein makroökonomisches Grundscenario, welches von den gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Verhaltensveränderungen der letzten Jahre ausgeht. Der erarbeitete Bericht beschreibt die dem Szenario zugrunde liegenden Annahmen und das gewählte Vorgehen.

Der Teilbereich **Perspektiven des Energieverbrauches der Privaten Haushalte** [7] umfasst eine Reihe von Einzelmodellen. Als Elemente sind beispielsweise der Wohnungsbestand nach Gebäudetypen, Baualterklassen, Beheizungssystemen, Warmwassersystemen sowie der Gerätebestand nach Gerätetypen zu erwähnen. Als weitere Parameter werden Energie-Massnahmen (u.a. SIA-Normen) berücksichtigt.

Die **Perspektiven des Energieverbrauches in der Industrie** [8] gehen von 31 Branchen aus, wobei eine weitere Differenzierung nach Funktionen (Büro oder Produktion), nach Produktelinien, Produktionsprozessen und Produktionsanlagen vorgenommen wurde. Ausgehend vom spezifischen Energieverbrauch auf Anlagenebene wird auf den gesamtschweizerischen Energieverbrauch hochgerechnet.

Die **Perspektiven des Energieverbrauches in Dienstleistungsbetrieben und Landwirtschaft** [9] unterscheiden zwei *Bottom-up*-Modelle für den Wärme- bzw. den Elektrizitätsverbrauch. Dabei wird der Elektrizitätsverbrauch für

wirtschaftlich homogene Aktivitäten bestimmt, um ihn mit dem spezifischen Elektrizitätsverbrauch und dem wirtschaftlichen Wachstum zum Gesamtverbrauch hochzurechnen.

Die **Perspektiven des Energieverbrauchs im Verkehr** [10] erfassen die verschiedenen Verkehrsträger (Personenwagen, Lastwagen, Lieferwagen, Flugzeuge, öffentlicher Verkehr usw.) mit ihrem Treibstoffverbrauch (Benzin, Diesel, Kerosen).

Drei Arbeiten wurden im Bereich Modelle abgeschlossen bzw. weitergeführt. Sie stellen eine wichtige Ergänzung und Weiterführung der Energieperspektiven dar. So können etwa Auswirkungen von Energie-Massnahmen auf die Wohlfahrt oder die Verteilung weit besser erfasst werden.

Mit einem allgemeinen Gleichgewichtsmodell wurden die **Verteilungseffekte einer CO₂-Energieabgabe** gemäss den Vorstellungen der EU bzw. des Bundesrates (Euro-CH-Szenarien) sowie einer weit höheren Abgabe (Beachtung einer Internalisierung der vorliegenden externen Kostenschätzungen - Szenario Kostenwahrheit) analysiert [11]. Folgende Formen der Einnahmeverwendung wurden unterschieden: Höhere Staatsausgaben, Rückerstattung pro Kopf an die Bevölkerung und eine Senkung der Einkommenssteuern. Die Auswirkungen wurden mit einem Gleichgewichtsmodell für die Schweiz untersucht (41 Produktionssektoren, 6 Haushaltsgruppen, detaillierte Desaggregation des Energieverbrauchs und -angebotes). Die Berechnungen zeigen, dass bei tiefen Energie-Abgabesätzen (Euro-CH-Szenario) kein oder höchstens ein geringer Preis zu bezahlen ist (Wohlfahrtsverluste). Nur vereinzelt treten spürbare Veränderungen der inländischen Produktion auf. Bei den Kostenwahrheits-Szenarien kann von positiven gesamtwirtschaftlichen Effekten nur gesprochen werden, wenn die vermiedenen externen Kosten mitberücksichtigt werden. Bei einzelnen Sektoren treten bedeutende Produktionseinbussen auf. Die ökologischen Auswirkungen der Abgaben sind praktisch unabhängig von der Einnahmeverwendung. In den "Euro-CH"-Szenarien gehen der Gesamtenergieverbrauch um ca. 10%, der CO₂-Ausstoss um ca. 8% zurück, während bei den "Kostenwahrheits"-Szenarien ein Rückgang von ca. 30% bis 40% zu verzeichnen ist. Im Szenario mit den höheren Staatsausgaben führt die kombinierte Abgabe zu deutlichen Einkommensverlusten für die unteren Einkommensklassen. Ebenfalls eher regressiv wirken die Szenarien mit einer Senkung der Einkommenssteuern. Eine neutrale oder progressive Verteilungswirkung kann dagegen mit der Pro-Kopf-Rückerstattung erreicht werden. Alle Auswirkungen haben sich in Sensitivitätsrechnungen als stabil erwiesen.

Im Projekt **Antizipation von Energieabgaben: Methodische Vorstudie** [12] zeigte sich, dass bereits die Ankündigung von Energieabgaben im Energiesektor Reaktionen auslöst, die mit der Einführung einer Energieabgabe vergleichbar sind. Eine Vertiefung und Konkretisierung der Arbeiten wird vorderhand nicht angestrebt.

Im Rahmen des Projektes *Evaluation en équilibre général des mesures de politique énergétique en Suisse* [13] konnten erste Schätzungen von Energie-Massnahmen durchgeführt werden.

KOSTEN UND WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ENERGIESYSTEME

Es gilt als unbestrittene Tatsache: von funktionierenden Energiemärkten kann u.a. nur gesprochen werden, wenn gewichtige externe Kosten erfasst und internalisiert werden, das heisst ihren Verursachern angelastet werden.

Deshalb stellt es einen weiteren prioritären Bereich dar, externe Effekte der Energienutzung zu beurteilen und ihre Kosten monetär zu bewerten. Mit verschiedenen Arbeiten konnten gewichtige Fortschritte erzielt werden und erste tragfähige Handlungsempfehlungen (zum Beispiel in Form von Energiepreiszuschlägen) sind abgegeben worden. Es darf aber nicht übersehen werden, dass noch nicht alle Fragen im Zusammenhang mit den externen Kosten genügend geklärt werden konnten.

Mitte 1994 erfolgte der Abschluss des Projektes **Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung - Ermittlung von Energiepreiszuschlägen** [14] mit der Veröffentlichung eines Syntheseberichtes, einer Kurzfassung und von

6 Teilberichten. Die externen Kosten für die Wärme- und Stromversorgung werden mit 4 bis 7.2 Mrd. Fr. ausgewiesen. Die Monetarisierung ist zur Hauptsache durch Schadenskostenschätzungen vorgenommen worden. Beim Treibhauseffekt wurden die Vermeidungskosten beigezogen. Die Bewertung von Einflüssen auf Natur- und Landschaftsräume stützt sich auf die individuelle Zahlungsbereitschaft ab.

Die extrem seltenen Grossereignisse bei Kernkraftwerken und Staudämmen werden separat behandelt. Dabei sind sogenannte Risikozuschläge auf Elektrizität errechnet worden, die aber noch verschiedene offene Fragen aufgeworfen haben, wie zum Beispiel die Bewertung der ermittelten Risiken bei ungenügender Kenntnis der effektiven Risikoaversion der Bevölkerung.

Einen vorläufigen Abschluss hat ebenfalls das Projekt **Zahlungsbereitschaft für die Verhinderung einer globalen Klimaänderung** [15] gefunden (vgl. *Titelbild*). Eine repräsentative Umfrage hat dabei ergeben, dass für eine teilweise bzw. volle Lösung des Treibhauseffektes 37 bzw. 54 Franken pro Haushalt und Monat geleistet würden (nur zahlungswillige Haushalte). Ein Teil der Haushalte weist überhaupt keine Zahlungsbereitschaft auf, wäre aber zu anderen Opfern bereit. Die Zahlungsbereitschaft für die Lösung weiterer Umweltprobleme (Abbau der Ozonschicht, Luftverschmutzung) liegt in einer ähnlichen Grössenordnung. Hochgerechnet auf die Schweiz ergibt sich eine Zahlungsbereitschaft von 750 bis 1'250 Mio Franken p.a. zur Vermeidung des Treibhauseffektes bzw. von 1,6 bis 2,1 Mrd. Franken p.a. für die Lösung weiterer Umweltprobleme. Diese Resultate wurden stark durch den Zeitpunkt der Umfrage beeinflusst. Daneben wurden der Informations- und Kenntnisstand der Befragten erfasst sowie ihre Einstellung zu verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten. Dabei zeigte sich eine erstaunlich tiefe Akzeptanz für eine Energiesteuer mit Rückzahlung pro Kopf, was auf einen entsprechenden Informations- und Aufklärungsbedarf hinweist. Weitere Abklärungen zu den externen Kosten sind mit dem Projekt **Die externen Kosten der Verkehrs- und Energiewirtschaft in der Schweiz** [16] im Gang, indem (u.a. aufgrund der Gutachten von Experten) die Ergebnisse zu den Kernenergiegrossrisiken überprüft und umfassender berücksichtigt werden. Ebenfalls soll der Verkehrsbereich angemessen beachtet werden.

Das Projekt **External Costs of Transport and Internalisation** [17] nimmt ausgewählte Schätzungen für den Verkehr mit dem Vermeidungskostenansatz auf nationaler und internationaler Ebene vor und in einer zweiten Phase werden Strategien zur Internalisierung der externen Kosten - unter Einschluss der europäischen Ebene - entwickelt.

Das Projekt **Risikobewertung im Energiebereich** [18] ist von einem interdisziplinären Projektteam abgeschlossen worden. Es hat vor allem das Problemverständnis für Risikofragen aus Sicht verschiedener Fachdisziplinen (u.a. Ökonomie, Umweltnaturwissenschaften, Soziologie) geschärft. Erste Teilantworten - etwa bezüglich relevanter Schadenskategorien oder des Vorgehens bei der Risikobewertung - sind mit Konsens erarbeitet worden. Eine umfassende Synthese ist aber - u.a. aufgrund der Komplexität der Fragestellung, den spezifischen Paradigmata der Fachdisziplinen sowie Defiziten in der Theorieentwicklung - nicht erreicht worden.

Im Rahmen des Projektes **Vergleichende Untersuchung von Grossunfällen im Energiebereich** [19] ist die Datenbasis für die Beurteilung verschiedener Energiesysteme (Öl, Gas, Wasser, Kernenergie, Kohle) weiter verbessert worden. Inzwischen sind insgesamt 8'212 Unfall-Ereignisse erfasst worden. Die Risiken werden mit verschiedenen Methoden beurteilt, wobei probabilistische Methoden und die Bewertung von Gesundheitsschäden bzw. Todesfällen im Vordergrund stehen.

ENERGIEPOLITISCHE MASSNAHMEN (Ausgestaltung, Vollzug, Akzeptanz, Wirkung)

Energiepolitische Massnahmen werden teilweise im Rahmen der Modelle und Perspektiven untersucht, wobei vor allem die globalen Energie- und Umwelteffekte sowie makroökonomische Aspekte im Vordergrund stehen (Wohlfahrt, Beschäftigung, Verteilung usw.). Im vorliegenden Bereich **Energiepolitische Massnahmen** stehen primär die Mikroeffekte zur Diskussion: Ausgestaltung von Massnahmen, Praktikabilität, Akzeptanz usw. In den vergangenen Jahren sind dazu erst relativ wenige Projekte durchgeführt worden. Es besteht ein grosser Bedarf nach weiteren Abklärungen.

Mit der Quantifizierung SIA 380/4 [20] läuft ein Projekt, das die möglichen Spareffekte von Normen im Bereich Elektrische Energie im Hochbau erfassen will. Bisher hat es sich gezeigt, dass das Sparpotential - bezogen auf den gesamten Elektrizitätsverbrauch in der Schweiz - zwischen 4% und 6% liegt.

Ein Workshop Sozioökonomische Energieforschung in der Industrie [21] ergab, dass die EMAS-Verordnung / ISO 14001 einen grossen Einfluss auf das Energie-Management hat. Wissenslücken bestehen über das effektive Verhalten in Industriebetrieben in Bezug auf energiebezogene Investitionsentscheide, Energieaspekte im Rahmen der Produktgestaltung und das Energiemanagement.

ERFOLGSKONTROLLE

Erfolgskontrollen zu Energie-Massnahmen können wichtige Hinweise über die Ausgestaltung, die Wirksamkeit oder die Effizienz von Massnahmen ergeben.

Im Projekt Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage [22] wurde der IHA-Datensatz mit Angaben zu Haushalten aus Zürich, Bern und Basel zu einer Stichprobe erweitert, die Haushalte aus allen Schweizer Städten umfasst. Ziel der Erweiterung war die Erstellung eines Datensatzes, mit dem sich der Einfluss sowohl des Preises als auch von anderen wichtigen Grössen wie Gerätebestand und Klima auf die Elektrizitätsnachfrage bestimmen lässt. Ausserdem wurden die 1993 aus den Schätzungen mit aggregierten Städtedaten erhaltenen Resultate zur zeitdifferenzierten Elektrizitätsnachfrage anhand von Schätzungen mit weiteren Daten und Modellspezifikationen überprüft und bestätigt.

INTERDEPENDENZEN, MARKTORDNUNGEN, INTERNATIONALE BEZIEHUNGEN

Die Interdependenzen (Energie, Verkehr, Umwelt) und Fragen der Energiemarktordnungen sowie der internationalen Beziehungen sind bisher kaum untersucht worden. Die wachsenden Verflechtungen erfordern aber klärende Entscheidungsgrundlagen.

PILOT- UND FELDVERSUCHE

Das Forschungsprogramm hat bisher keine eigenständigen Pilot- und Feldversuche ins Leben gerufen. Im Rahmen von ENERGIE 2000 und der Unterstützung von Demonstrations- und Pilotanlagen entsteht aber für die energiewirtschaftliche Grundlageforschung die Aufgabe, soziale und wirtschaftliche Aspekte systematisch zu analysieren und nach wissenschaftlichen Kriterien auszuwerten.

3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Forschung ist durch eine intensive Zusammenarbeit geprägt: In den meisten Projekten sind mehrere Forschergruppen involviert. Internationale Kontakte sind eine Selbstverständlichkeit. Die EU-Forschungsprogramme haben bereits eine gewisse Bedeutung erlangt. In Zukunft sind sie noch stärker zu beachten.

4. Umsetzung

Die Umsetzung hat im Rahmen von verschiedenen Veranstaltungen, Pressekonferenzen und Workshops stattgefunden. Ebenfalls sind die guten Kontakte zu den Hochschulen und den verschiedenen Forschungsinstituten nicht zu unterschätzen.

Im Rahmen der Beantwortung politischer Vorstösse und der Redaktion von Botschaften werden die Resultate des Programms unmittelbar politisch umgesetzt. Es besteht von dieser Seite ein ausgewiesener Bedarf an seriösen energiewirtschaftlichen Grundlagen.

5. Bewertung 1994 und Ausblick 1995

Mit den abgeschlossenen Projekten konnten gewichtige energiewirtschaftliche Fragen einer Klärung näher gebracht werden. In entscheidenden Punkten wie den externen Kostenberechnungen und den Umwelteffekten von Energiesystemen, den Energieperspektiven und teilweise der Beurteilung von Massnahmen konnten die Entscheidungsgrundlagen verbessert werden.

Energieperspektiven und Modelle sowie Massnahmenevaluationen sind prioritär weiter zu vertiefen sind. Als neue Bereiche sind die Fragen der Wettbewerbsordnung sowie der Regulierung der Energiemärkte aufzugreifen und in ihren vielfältigen Dimensionen auszuleuchten. Die wachsenden internationalen Verflechtungen erfordern fundierte Grundlagen für zukunftsgerichtete Entscheide. Ein weiterer Themenbereich werden die vielfältigen Einflussfaktoren des Energiebewusstseins und des Energieverhaltens einzelner Akteure sein. Es werden vertiefte Hinweise erwartet, welche eine effiziente Umsetzung einer optimalen Energiepolitik erlauben. Zudem besteht die Absicht, die Umsetzung der Forschungsergebnisse weiter zu verbessern.

6. Liste der Projekte

- [1] H. Oeschger, UNI - Bern : *Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und Klima-Untersuchungen durch Analysen an polaren Eisbohrkernen.* (JB)
- [2] J. Nösberger, ETH - Zürich : *Swiss FACE Projekt (Phase 1).* (JB).
- [3] E. A. Müller : *Klimabereinigung Energieverbrauch Raumwärme: Gebäudemodell Klima.* (JB)
- [4] U. Rey, WÜEST&PARTNER : *Basisdaten und Perspektiven zur Entwicklung des Gebäudeparks 1990-2030* (JB).
- [5] PROGNOSE, Basel : *Koordination der Modellierungs- und Perspektivarbeiten.* (JB)
- [6] H.G. Graf, Zf. ZUKUNFTSFORSCHUNG, St-Gallen : *Rahmendaten für Energieperspektiven.* (JB)
- [7] PROGNOSE, Basel : *Perspektiven des Energieverbrauchs in der Privaten Haushalte.* (SB)
- [8] W. Baumgartner, IBFG, Zürich : *Perspektiven des Energieverbrauchs in der Industrie.* (SB).
- [9] B. Aebischer, ETH - Zürich : *Perspektiven des Energieverbrauchs in Dienstleistungsbetrieben und Landwirtschaft.* (SB)
- [10] M. Keller, INFRAS & PROGNOSE, Bern : *Perspektiven des Energieverbrauchs im Verkehr.* (SB)

- [11] ECOPLAN, Bern : *Allgemeine Gleichgewichtamodelle - Verteilungseffekte.* (SB)
- [12] ECOSYS, Carouge : *Antizipation von Energieabgaben : Methodische Vorstudie.* (SB)
- [13] F. Carlevaro, CUEPE - Genève : *Evaluation en équilibre général des mesures de politique énergétique en Suisse.* (JB)
- [14] ECONCEPT, Zürich : *Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung - Ermittlung von Energiepreiszuschlägen.* (SB)
- [15] INFRAS, Zürich : *Zahlungsbereitschaft für die Verhinderung einer globalen Klimänderung.* (SB)
- [16] ECONCEPT, Zürich : *Die externen Kosten der Verkehr- und Energiewirtschaft in der Schweiz.* (JB)
- [17] S. Suter, ECOPLAN, Bern : *External Costs of Transport and Internalisation.* (JB)
- [18] W. Kröger, PSI - Villigen : *Risikobewertung im Energiebereich.* (SB)
- [19] PSI - Villigen : *Vergleichende Untersuchung von Grossunfällen im Energiebereich.* (JB)
- [20] E.A. Müller, C.U.BRUNNER, Zürich : *Quantifizierung SIA 380/4.* (JB)
- [21] M. Willemsen, T. Bürki, BASLER&PARTNER, Zollikon : *Sozio-ökonomische Energieforschung Industrie-Workshop.* (SB)
- [22] P. Zweifel, M. Filippini, S. Bonomo : *Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage.* (JB)

(JB) Jahresbericht 1994 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ADRESSES DES CHEFS DE PROGRAMME

ADRESSEN DER PROGRAMMLEITER

Utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments

Rationelle Energienutzung in Gebäuden

Markus ZIMMERMANN, 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

bis 30.4.1995

Bruno ALBRECHT, Bau-Ing. ETH, ALBRECHT+PARTNER AG, Murbacherstr.19, 6003 Luzern

Tel 041 / 23 90 92 Fax 041 / 23 05 71

ab 1.5.1995

Martin PULFER, Chem.-Ing. HTL, BEW, 3003 Bern

Tel 031 / 322 49 06 Fax 031 / 382 44 03

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. 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, Phys. ETH, HSK, 5232 Villigen

Tel 056 / 99 39 36 Fax 056 / 99 39 95

Solaire thermique et stockage de chaleur

Aktive Solarnutzung & Wärmespeicherung

Pierre BREMER, ing. méc. EPF, SEDE S. A., Rue du Midi 33, 1800 Vevey

Tel 021 / 921 05 15 Fax 021 / 921 95 57

Chef de programme adjoint à partir du 1.7.1995 / Stv.-Programmleiter ab 1.7.1995:

Jean-Christoph HADORN, ing. civ. EPF, 5, chemin des Fleurettes, 1007 Lausanne

Tel 021 / 617 1766 Fax 021 / 617 1780

Architecture solaire

Solararchitektur

Robert HASTINGS, Arch., M. Sc., HBT / ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

Tel 01 / 633 29 88

Fax 01 / 371 55 48

Photovoltaïque

Photovoltaik

Stefan NOWAK, Dr., Phys., POLYGON, Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg

Tel 037 / 29 73 30

Fax 037 / 29 97 28

Chimie solaire

Solarchemie

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 63 48

Biomasse

Biomasse

Martin HINDERLING, Bau-Ing. ETH, BEW, 3003 Berne

Tel 031 / 322 56 24

Fax 031 / 382 44 03

Géothermie

Geothermie

Harald L. GORHAN, Dr., Geol., EWI, Bellerivestr. 36, Postfach, 8034 Zürich

Tel 01 / 385 27 33

Fax 01 / 385 26 54

Fusion nucléaire contrôlée

Kontrollierte Kernfusion

Stéphane BERTHET, Dr., astrophys., OFES, 3003 Berne

Tel 031 / 322 99 67

Fax 031 / 322 78 54

Électricité

Elektrizität

Roland BRÜNIGER, EL-Ing. ETH, Isenbergstr. 30, 8913 Ottenbach

Tel 01 / 760 00 66

Fax 01 / 760 00 68

Hydrogène

Wasserstoff

jusqu'au 30.6.1995 / bis 30.6.1995:

Thomas SCHUCAN, PD., Dr., Phys., PSI, 5232 Villigen PSI

Tel 056 / 99 27 43

Fax 056 / 99 21 99

à partir du 1.7.1995, sera intégré au programme "Chimie solaire"

wird ab 1.7.1995 ins Programm "Solarchemie" eingegliedert

Électrochimie

Elektrochemie

jusqu'au 30.6.1995 / bis 30.6.1995 :

Otto HAAS, Dr., Chem., PSI, 5232 Villigen PSI

Tel 056 / 99 24 72

Fax 056 / 99 21 99

à partir du 1.7.1995, sera intégré au programme "Piles à combustible"

wird ab 1.7.1995 ins Programm "Brennstoffzellen" eingegliedert

Piles à combustible
Brennstoffzellen
Léo DUBAL, Dr. phys., OFEN, 3003 Berne
Tél 031 / 322 56 44 Fax 031 / 382 44 03

Économie énergétique
Energiewirtschaftliche Grundlagen
Ruedi MEIER, Dr. oec. publ. Raumplaner ETH, Bolligerstr. 14b, 3006 Bern
Tel 031 / 633 36 22 Tel+Fax 031 / 333 24 69

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, Thunstr. 9, Postfach, 3000 Bern 6
Tél 031 / 352 19 00 Fax 031 / 352 77 56

Éditeur / Redaktor : Léo Dubal, OFEN, 3003 Berne
Distribution / Bezugsquelle : ENET

