



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

Recherche énergétique

Energie-Forschung 1996

Rapports de synthèse des chefs de programme
Überblicksberichte der Programmleiter

Neuer Wind...



RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE 1996

ENERGIEFORSCHUNG 1996

Rapports de synthèse des chefs de programme
Überblicksberichte der Programmleiter

Vorwort / Avant-propos	3
Fortschritte der Energieforschung 1996	4

Programmes de recherche – Forschungsprogramme

Rationelle Energienutzung in Gebäuden	7
Solararchitektur	15
Elektrizität	23
Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung	31
Solaire actif & Chaleur	39
Photovoltaik	49
Biomasse	57
Geothermie	65
Kleinwasserkraftwerke	71
Windenergienutzung	77
Solarchemie & Wasserstoff	83
Feuerung & Verbrennung	91
Stockage de chaleur	99
Kerntechnik und nukleare Sicherheit	107
Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK	115
Fusion thermonucléaire contrôlée	123
Piles à combustible & Accumulateurs	129
Verkehr	135
Energiewirtschaftliche Grundlagen	143

Annexe – Anhang

Organisation de la Recherche et P&D – Forschungs- und P&D-Organisation	150
Adresses importantes – Wichtige Adressen	151

VORWORT

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem *Konzept der Energieforschung des Bundes*. Koordination, Begleitung, Umsetzung und internationale Einbettung der Forschungsarbeiten gehören zum Aufgabengebiet des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW). Es verfügt über eigene Förderungsmittel, die subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und öffentlichen Forschungsstellen eingesetzt werden. Das BEW hat seine Arbeiten zur Förderung neuer Technologien in 15 Bereiche eingeteilt. Die Betreuung der dazugehörigen Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramme obliegt internen und externen Programmleitern. Eine Übersicht über die Organisation mit den entsprechenden Kontaktadressen findet sich im Anhang.

1996 betrugen die gesamten Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung etwa 210 Mio. Franken, wovon rund 28 Mio. Franken für Pilot- und Demonstrationsanlagen eingesetzt wurden. Der Anteil des BEW belief sich auf 42 Mio. Franken, wovon 14 Mio. Franken für Beiträge und Messungen an Pilotanlagen. Rund 47% der BEW-Gelder sind direkt in die Privatwirtschaft geflossen, 17% wurden kantonalen Forschungsstellen (Universitäten, Ingenieursschulen) zugesprochen und 36% erhielten Forschungsstätten des Bundes (insbesondere die beiden ETH und das PSI).

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der Programmleiter und ist für die breite Öffentlichkeit bestimmt. Beschrieben sind vorwiegend diejenigen Vorhaben, welche ganz oder teilweise durch das BEW finanziert wurden. Enthalten sind aber auch Hinweise auf andere mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten. Es sei hier darauf hingewiesen, dass auch die meisten Forschungsstätten in ausführlichen Jahresberichten über ihre Aktivitäten informieren.

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 beim betreffenden Programmleiter und bei ENET (Fax: 031/3500005) erhältlich.

14. März 1997

BUNDESAMT FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT

Zur Illustration auf dem Umschlag:

Neuer Wind... Die Inbetriebnahme des Wind-Kraftwerk-Parks auf dem Mont-Crosin (Bild) hat der Nutzung der Windenergie in der Schweiz einen spürbaren Impuls gegeben. (Foto: Corinne Voirol, BEW)
Neuer Wind bläst aber auch in den Forschungsprogrammen, welche seit einem Jahr neu organisiert sind.

AVANT - PROPOS

La recherche énergétique du secteur public en Suisse se conforme au *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération*. La coordination, l'accompagnement, le transfert à la pratique et l'insertion dans le cadre international des travaux de 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. L'OFEN a découpé en 15 domaines son travail de soutien aux nouvelles technologies. L'accompagnement des programmes de recherche, pilote & démonstration y relatifs incombe à des chefs de programmes, internes, voire externes, à la Confédération. Une vue d'ensemble de l'organisation est donnée en annexe, ainsi que les points de contact.

En 1996, les dépenses globales du secteur public pour la recherche énergétique ont atteint la somme de quelque 210 millions de francs, dont 28 millions pour les installations pilotes et de démonstration. Pour sa part, l'OFEN a attribué, en 1996, des mandats de recherche pour 42 millions de francs. Cette somme comprend 14 millions de francs de subsides pour des installations pilotes ou pour des mesures sur ces installations. 47% des moyens de l'OFEN ont été attribués au secteur privé, 17% aux organisations cantonales de recherche (Universités, Écoles d'ingénieurs), et 36% aux instituts fédéraux de recherche (en particulier aux deux EPF et au PSI).

La présente brochure contient les rapports de synthèse, pour l'année 1996, des chefs de programme et 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 la plupart des organisations de recherche informent sur leur activités par des rapports annuels détaillés.

Les rapports de synthèse des chefs de programme peuvent être reproduits, à condition que l'on mentionne la source. Les rapports annuels (RA) ou finaux (RF) relatifs aux projets mentionnés dans les rapports de synthèse, peuvent être obtenus, soit par l'intermédiaire du chef de programme, soit par ENET (Fax: 031/3500005).

14 mars 1997

OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Illustration de la couverture:

Vent nouveau... la mise en service de la ferme éolienne du Mont-Crosin (photo) a donné une forte impulsion à l'utilisation de l'énergie du vent en Suisse. (Photo: Corinne Voirol, OFEN)

Un vent nouveau souffle aussi sur les programmes de recherche depuis leur réorganisation, il y a un an.

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 1996

Gerhard Schriber, Forschungscoordination, BEW

Die Bedeutung der jährlichen Fort-Schritte in der Forschung ist in der Regel kaum abschätzbar. Erst Jahre oder gar Jahrzehnte später, wenn die neuen Erkenntnisse im Markt Eingang gefunden haben, kann ihr Wert richtig bemessen werden. So hat sich das Marktangebot im Energiesektor aufgrund der Forschungsergebnisse der letzten 20 Jahre augenfällig verändert. Beispiele sind: energieeffiziente Bauten (dichte Fenster, wirksame Wärmedämmung, Solararchitektur), ein breites Angebot von Heizungstechniken (Solarwärme, Wärmepumpen, Holzheizungen, sauberere Öl- und Gasbrenner), sparsame Haushalt- und Bürogeräte, neue Techniken zur Stromerzeugung (Brennstoffzellen,

Photovoltaik, Biogasanlagen, Wärmekraftkopplungsanlagen, Gaskombikraftwerke, effiziente Kleinwasserkraftwerke, Windkraftanlagen), neue Speichertechniken (fortgeschrittene Batterietypen, Kurz- und Langzeitwärmespeicher, chemische Energieträger (Wasserstoff, Methanol). Solche Markterfolge sind die Ergebnisse einer kontinuierlichen Forschungsförderung der öffentlichen Hand, in enger Kooperation mit der Industrie. Die Möglichkeiten sind jedoch bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Und es bleibt zu hoffen, dass trotz der in den letzten Jahren vorgenommenen Kürzungen von Forschungsmitteln der Einsatz der Forscher zur Erzielung weiterer Fortschritte anhält.

Die Energieforschung hat auch 1996 zu einer reichen Ausbeute geführt. Hier eine kleine Auswahl von Ergebnissen:

- 10 Jahre nach der schweizerischen Entdeckung der **Hochtemperatur-Supraleitung** werden in unserem Land bereits erste Anwendungen erprobt: Ein Strombegrenzer von 1,2 MW Leistung wird in einem Kraftwerk getestet und ein Transformator (dreiphasig, 630 kVA) steht für den Netzanschluss bereit.
 - Die erfolgreiche Inbetriebnahme dreier **Windkraftanlagen** auf dem Mont-Crosin (zusammen 1,8 MW Spitzenleistung) demonstriert, dass neue Windkraftanlagen auch in der Schweiz zu relativ günstigen Kosten beachtenswerte Beiträge an die Stromerzeugung liefern können.
 - Moderne Fenstergläser bringen ökologische Vorteile: **Wärmeschutzverglasungen** schützen gegenüber konventioneller 2-fach-Isolierverglasung doppelt so stark vor Verlusten und belasten damit die Umwelt entsprechend weniger. Demgegenüber fallen Unterschiede bei der Herstellung und Entsorgung wenig ins Gewicht.
 - Es liegen jetzt zuverlässige Zahlen vor über die entscheidenden Einflussmerkmale für die optimale **Tageslichtnutzung** in Atrien und angrenzenden Räumen (geometrische Verhältnisse, Glaswerte und -anteile, Reflexions-aspekte). Der Einfluss der Speichermasse ist allerdings modellmässig noch zu wenig gut erfasst. Im übrigen ist durch die schweizerischen Untersuchungen zur Tageslichtnutzung an der ETH-Lausanne ein in Europa führendes Forschungszentrum in diesem Bereich entstanden.
 - Nach intensiver Entwicklungsarbeit sind nun geräuscharme **Einzelraum-Wärmepumpen** erhältlich mit Jahresarbeitszahlen von 2. Damit lässt sich Gegenüber den Elektrospeicheröfen der Verbrauch an elektrischem Strom halbieren.
 - Für Blockheizkraftwerke wird intensiv an der Entwicklung des **Swiss-Gasmotors** gearbeitet. Er soll die strengen Vorschriften der schweizerischen Luftreinhalteverordnung erfüllen. Im Versuchsbetrieb werden (für Wellenleistungen von 100 kW) bereits Wirkungsgrade von 35 % erreicht.
 - Der Wirkungsgrad der durch Licht hervorgerufenen Spaltung von (Süss- und Meer-)Wasser konnte mit einem neuartigen Verfahren (TiO₂-/WO₃-Elektroden) auf über 4,5 % erhöht und damit verdoppelt werden. Ziel ist die direkte **Speicherung von Sonnenlicht** im Energieträger Wasserstoff.
 - Die neueste Version des Planungsprogramms POLYSUN kann quasi als **Expertensystem für Solaranlagen** (thermisch) bezeichnet werden: die besten schweizerischen Modell-Entwicklungen auf diesem Gebiet – inklusive METEONORM '95 – sind darin integriert.
 - Ein 8-Familienhaus mit einem Wärmebedarf von rund 35 MWh erreicht einen **solaren Deckungsgrad** von 65 %, was – in unserem Klima – für ein derartiges Objekt eine Weltpremiere bedeutet. Ein danebenstehendes gleiches Haus mit weiter optimierten Wärmeverhältnissen lässt noch einen wesentlich höheren Deckungsgrad erwarten.
 - Vielversprechende Weiterentwicklungen sind im Bereich der Stromerzeugung mittels **Solarzellen** zu verzeichnen: Beim Konzept der "mikromorphen" Zellen (Verbindung einer mikrokristallinen und einer amorphen Siliziumzelle) wurde ein stabiler Wirkungsgrad von 10,7 % erreicht. Und beim Konzept einer "kristallinen Siliziumzelle mit Antireflexionsschicht" wurde sogar der hohe Wirkungsgrad von 21 % gemessen.
- Viel weiter entfernt vom Markt ist das Konzept des "Lichteinfangs und -transports in supramolekular organisierten Farbstoffen" im Innern von Zeolithen. Bereits werden jedoch 150 mal schnellere Ener-

gieflüsse als z.B. im vergleichbaren System der grünen Pflanze nachgewiesen.

Das Konzept der "Farbstoffzellen (Grätzel)" andererseits wird bereits mit industriellen Lizenznehmern markttauglichen Lösungen zugeführt.

- Umfangreiche Abklärungen (über Anbau, Verbrennung, Vergasung, Vergärung, Stoffflüsse, Ökobilanzen, Logistik, etc) haben ergeben, dass heute die Verwendung von **Gras und Feldholz für Energiezwecke** noch nicht wirtschaftlich ist. Im Vergleich zur konventionellen Energie-Bereitstellung (Erdöl, Gas) führt die energetische Nutzung von Gras, Chinaschilf, Feldholz u.a. jedoch zu einer deutlich geringeren Umweltbelastung. Internalisiert man die externen Kosten, so liegt sowohl die Vergärung wie auch die die Verbrennung solcher Biomasse deutlich günstiger als die Erdölnutzung.
- Eine erste Phase der Entwicklung einer selbsttragenden modular aufgebauten Kunststoffkarosserie für **Leichtmobile** ist erfolgreich abgeschlossen worden. Die Masseeinsparung gegenüber einer Metallkarosserie beträgt 200 kg. Zugleich resultiert eine einfachere und schnellere Montage.
- Der **Elektromobil-Flottenversuch** in Mendrisio erfährt international grosse Beachtung. Das Ziel, bis zur Jahrtausendwende 8 % aller dortigen Fahrzeuge durch Leicht-Elektromobile (LEM) zu ersetzen dürfte erreicht werden [Seit Ende 1996 zirkulieren in Mendrisio bereits 67 LEM (1,5 %)]. 50 verschiedene Fördermassnahmen sind eingeführt, deren Wirksamkeit und Übertragbarkeit auf andere Standorte laufend ausgewertet werden.
- Die Phänomene der **Verbrennung** hat man um einiges Stücke besser im Griff: Neue Simulationsmodelle erlauben umfassende Vorhersagen der Schadstoffbildung in Flammen und neue laseroptische

Messmethoden ermöglichen die Visualisierung solcher Vorgänge und die Prüfung der theoretischen Berechnungen. Die Ergebnisse werden immer sofort der Industrie bereitgestellt.

- Die **Brennstoffzellen** haben sich näher zum Markt entwickelt: Bei den Polymer-Brennstoffzellen (Wasserstoff-Luft-System) wird für mehrere Membran-Dicken eine gute Langzeitbeständigkeit erreicht. An einem 12 Volt-Demonstrationsmodell konnte die Funktionstauglichkeit bewiesen werden. Bei den Keramik-Brennstoffzellen (Erdgas-Luft-System) konnte bei einem neuartigen Zellelement (physikalisch dampfbeschichtet) nach 100 Betriebsstunden eine Leistung von über 600 mW/cm² (bei 814 °C) erreicht werden, dreimal mehr als erwartet.
- Verschiedene Analysen des **Anlageverhaltens schweizerischer Kernkraftwerke** bei Unfallsituationen, Beschädigungen, Material-Alterung, etc haben gezeigt, ob und welche Verkehren getroffen werden müssen, um den sicheren Betrieb der Anlagen noch besser zu gewährleisten. Die vorhandenen rechnerischen Simulationsmöglichkeiten zeigen fast durchwegs sehr gute Übereinstimmungen mit experimentellen Werten.
- Mit dem neuen Tokamak mit variabler Konfiguration an der ETH-Lausanne besitzt die Schweiz einen gewichtigen Trumpf im internationalen **Kernfusions-Programm**. Auch die vielschichtigen Kenntnisse und Möglichkeiten der numerischen Simulation – z.B. des Plasma-Einschlusses – sind in der Schweiz vorhanden.
- 1996 sind gut fundierte Analysen über die **Auswirkungen hängiger energiepolitischer Initiativen** (Energie/Umwelt- und Solar-Initiative) sowie anstehender politischer **Entscheide** (Energiegesetz und CO₂-Abgabe) erarbeitet worden.

Es ist erfreulich, dass der Umfang der Zusammenarbeit mit den Energieforschungsprogrammen der EU schnell wächst. In den Programmen JOULE/THERMIE und FISSION (ohne die längst eingespielte Zusammenarbeit bei der FUSION) sind für 1996 45 Schweizer Beteiligungen zu vermelden. Das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft unterstützte diese mit 4,6 Mio. Franken. Der ETH-Bereich (vorwiegend das Paul Scherrer Institut) hält mit 50 % der Programm-Beteiligungen den Spitzenplatz vor der Privatwirtschaft mit 45 %. Daneben laufen die Beteiligungen im Rahmen der Internationalen Energie-Agentur IEA uneingeschränkt weiter.

Die Eidg. Energieforschungskommission CORE – welche den Bundesrat und das EVED bezüglich der Energieforschung berät und die entsprechenden Leitlinien setzt – hat auf Beginn 1997 einen neuen Präsidenten

erhalten: Herr Dr. H.R. Zulliger (GRETAG, Regensdorf). Er löst Herrn Prof. P. Suter (ETH-Zürich) ab, welcher der Kommission während 5 Jahren vorstand.

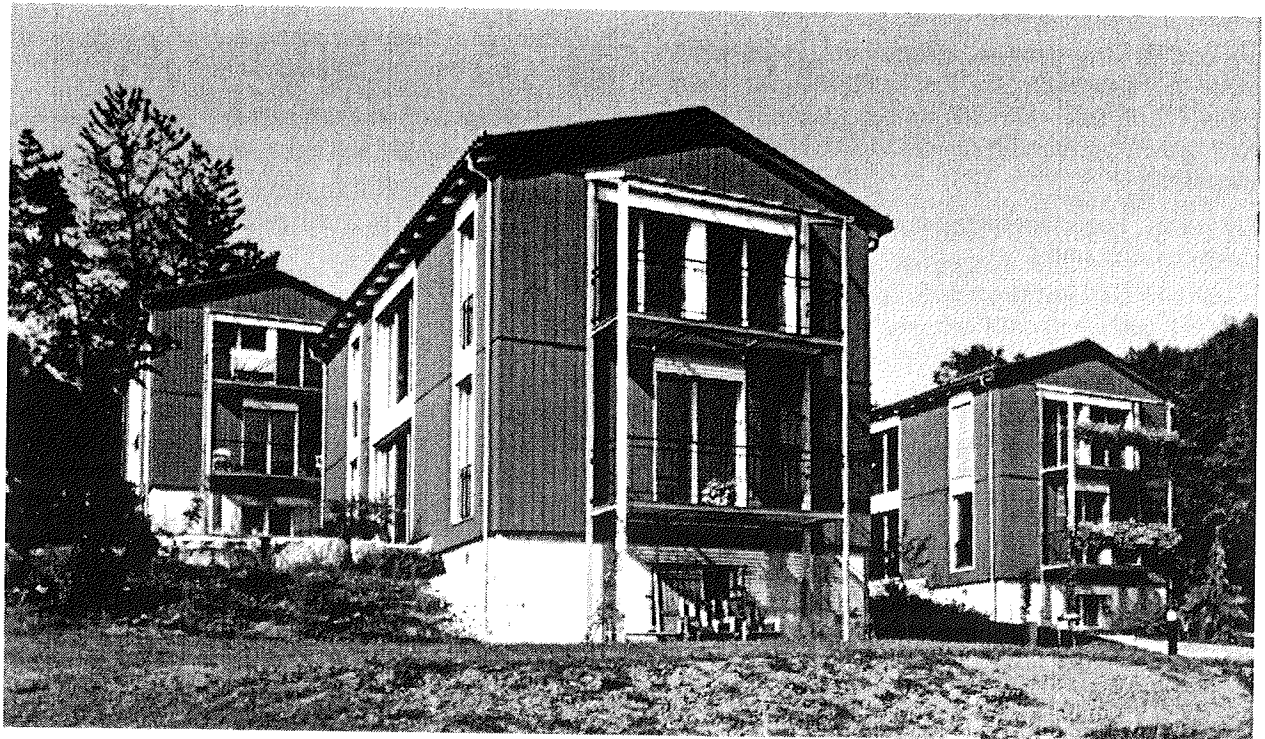
Die im BEW seit anfangs 1996 bestehende organisatorische Zusammenfassung von Forschung, Entwicklung, Demonstration und Markteinführung in Technikbereichen bewährt sich. Insbesondere ist eine engere Beziehung zu den Aktivitäten im Programm ENERGIE 2000 zu verzeichnen.

Schliesslich sei darauf hingewiesen, dass das BEW soeben eine Broschüre über die öffentliche Energieforschung in der Schweiz veröffentlicht hat. Sie bietet eine umfassende Übersicht und enthält auch konkrete Angaben zu fachlicher und finanzieller Unterstützung. Die Broschüre ist in deutscher, französischer, italienischer und englischer Sprache erhältlich.

RATIONELLE ENERGIEGENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Markus Zimmermann



Messprojekt Personalthäuser Dielsdorf

An fünf Niedrigenergiehäusern wird kostengünstiger, umweltbewusster Wohnungsbau demonstriert. Die Warmwasseraufbereitung erfolgt entweder mit einer Solaranlage oder durch einen Abluftwärmepumpenboiler. Beide Systeme werden bezüglich Stromverbrauch, Ertrag und Kosten ausgewertet und verglichen.

GEBÄUDEHÜLLE

Die Beteiligung am IEA-Projekt *Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts* [4] wurde mit einer schweizerischen Tagung an der ETH abgeschlossen. Das Projekt konnte vor allem aufzeigen, dass sich viele bauphysikalische Phänomene nur richtig erklären lassen, wenn Wärme-, Feuchte- und Lufttransportvorgänge kombiniert betrachtet werden. Insbesondere Wärmedämmungen können sehr viel schlechtere Eigenschaften haben, wenn Feuchtigkeits- und Luftbewegungen im Dämmstoff mit im Spiel sind. Dank neuer Simulationsmodelle können

heute solche Phänomene wesentlich genauer untersucht werden. Die komplexen Rechenprogramme sind allerdings nur für spezialisierte Anwender geeignet.

Direkt in der Praxis anwendbar ist dagegen ein **Wärmebrückenprogramm** welches im Rahmen eines EU-Projektes [5] erstellt wurde. Das Programm **KOBRA** [41] stellt einen elektronischen Bauteilkatalog dar, der auf einfache Weise die Berechnung individuell angepasster Wärmebrücken zulässt.

HAUSTECHNIK

Basierend auf dem Projekt **Organische Beschichtungen als Korrosionsschutz in Niedertemperaturheizkesseln** konnte mit Unterstützung des Forschungsfonds der Erdöl-Vereinigung ein Folgeprojekt zur **Feld-erprobung neuartiger Beschichtungssysteme** gestartet werden. Vier namhafte Heizkesselhersteller sind an den Versuchen beteiligt.

Im Projekt **Fehlererkennung in HLK-Anlagen** [19] wurden zusammen mit der Regelungs-Industrie Methoden entwickelt, welche es ermöglichen, Betriebsprobleme in haustechnischen Anlagen frühzeitig zu erkennen. Die Arbeiten wurden ebenfalls im Rahmen eines IEA-Projektes durchgeführt. Es ist nun geplant, diese Methoden in Prototypen neuer Regelgeräte zu implementieren und in Feldversuchen zu testen.

Ein weiteres Industrieprojekt befasste sich mit der **optimalen Regelung von Licht, Sonnenschutz, Kühl- und Heizlast**. Im Projekt **DELTA** [12] wurden unter

Zuhilfenahme von *Fuzzy-Logic* neue Regelungsalgorithmen entwickelt, die vor allem eine verbesserte Sonnenschutzsteuerung versprechen. Sie sollen demnächst in kommerziellen Produkten Anwendung finden.

Der Anteil der Lüftungsforschung wurde seit dem Abschluss des Programmes "Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden" bewusst reduziert. Grundsätzlich liegen heute im Lüftungsbereich recht gute Grundlagen vor, weitere Anstrengungen sind vor allem in der praktischen Anwendung zu konzentrieren. Die Schweiz hat deshalb 1996 ihre Mitgliedschaft beim *Air Infiltration and Ventilation Centre* der IEA [6] aufgegeben.

Ein grösseres, noch laufendes Projekt im Lüftungs-bereich untersucht die Möglichkeiten und Anforderungen zur **effizienten Lüftung grosser Räume** [14]. Ein entsprechendes Handbuch für Planer wird 1997 herausgegeben.

Pilot-und Demonstrationsprojekte

Mit dem **Wettbewerb für mustergültige Mehrfamilienhaus-Sanierungen** [16] konnte 1996 ein neuer Akzent im Pilot- und Demonstrationsbereich gesetzt werden. Einfamilienhäuser stehen heute nicht mehr im Vordergrund. Sie sind zu wenig repräsentativ für die dringenden zukünftigen Bauaufgaben. In den Vordergrund gerückt sind dagegen Niedrigenergie-Mehrfamilienhäuser und im speziellen energetische Sanierungen von Mehrfamilienhäusern.

Fünf Sanierungsprojekte wurden im Rahmen des Wettbewerbes vom Bund und vom Kanton Zürich als mustergültig oder energetisch und gestalterisch interessant ausgezeichnet. Vier davon werden voraussichtlich 1997 zur Ausführung gelangen.

Einen weiteren Demonstrationsschwerpunkt stellen kontrollierte **Wohnungslüftung** dar. Sie können energetisch interessant sein, den Wohnkomfort stark verbessern und das Bauschadenrisiko deutlich verkleinern.

Sie sind in der Schweiz jedoch kaum verbreitet. Anstatt mit Forschung diese Systeme weiterzuentwickeln, will man hier vor allem mit konkreten Realisierungen Erfahrungen sammeln und zusätzliche Impulse geben. Ansätze zu kostengünstigen Lösungen sind vorhanden.

Der Bereich **ökologisch optimierter Bauten** hat sich inzwischen recht gut etablieren können. Fast bei allen Demonstrationsbauten werden Umweltaspekte bestmöglich berücksichtigt. Es scheint, dass die Bauherrschaften heute diesbezüglich sensibilisiert sind und ökologisches Bauen voll im Trend liegt [20, 33].

Um noch gezielter zukunfts-trächtige Techniken fördern zu können, ist beabsichtigt, zukünftig vermehrt auch einzelne Techniken und Komponenten und nicht nur ganze Gebäude zu unterstützen. Im **Messprojekt Personalthäuser Dielsdorf** [21] werden beispielsweise zwei verschiedene Konzepte zur Wassererwärmung und Lüftung miteinander verglichen (Solkit + Heat Hunter versus Metro-Wärmepumpenboiler).

Nationale Zusammenarbeit

Schwerpunktmässig werden die Forschungsprojekte an den drei Forschungsinstituten ETH Zürich, ETH Lausanne und EMPA Dübendorf durchgeführt, welche sich mit der Energienutzung im Gebäudebereich intensiv befassen. Immer häufiger findet aber auch eine Zusammenarbeit mit den angehenden Fachhochschulen (inkl. Luzern, Winterthur, Basel) statt.

Heute wird kaum mehr ein Projekt nur an einem Institut durchgeführt. Die interdisziplinären Fragestellungen einerseits und die Anforderungen an die praktische

Umsetzbarkeit der Ergebnisse erfordern immer häufiger die Zusammenarbeit von Forschungsstellen, Industrie und Anwender.

Vor allem die Industrie ist heute nicht nur vermehrt bereit sondern auch interessiert, mit externen Forschungsstellen zusammenzuarbeiten. Die Anzahl Industrieprojekte hat in letzter Zeit deshalb zugenommen.

Die Zusammenarbeit mit Ingenieurbüros findet vor allem dann statt, wenn es darum geht, praxisgerechte Planungsunterlagen zu erarbeiten.

Internationale Zusammenarbeit

Nebst vereinzelten Projekten, an denen sich international tätige Firmen beteiligen, stehen vor allem die Programme der IEA (*Energy Conservation in Buildings and Community Systems*) und der EU (*JOULE-THERMIE*) bei der internationalen Zusammenarbeit im Vordergrund.

Im IEA-Programm ist die Schweiz an folgenden Projekten beteiligt:

- *Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)*, schweizerische Beteiligung 1996 abgeschlossen [12],
- *Low Energy Cooling*, laufend [2],
- *Energy Related Environmental Impact of Buildings*, 1996 gestartet [15].

Im 4. EU Rahmenprogramm *JOULE-THERMIE* wurden folgende Projekteingaben in Brüssel bewilligt (die Finanzierung erfolgt über das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft):

- *EPIQR*: Kostenevaluation für Wohnbausanierungen,
- *OFFICE*: Sanierungsstrategien für Bürogebäude,
- *NATVENT*: Natürliche Lüftung von Bürobauten,
- Holzheizung mit hohem Wirkungsgrad und geringen Emissionen,
- *SMARTIS*: Regelungsstrategien für Lüftungsanlagen,
- Optimierte Anwendung moderner Verglasungen,
- *SAVEHEAT*: Solarunterstützte natürliche Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Transfer in die Praxis

Die Umsetzung von Forschungsergebnissen in die praktische Anwendung ist in der Regel ein langdauernder Prozess, der von vielen Begleitfaktoren beeinflusst wird. Hier können jedoch nur die direkt mit den Projekten verknüpften Umsetzungsanstrengungen ausgeführt werden. In erster Linie dienen diese dazu, beizutragen, dass Forschungsergebnisse nicht in Vergessenheit geraten, sondern von interessierten Kreisen für die weitere Umsetzung aufgenommen werden.

Die direkteste Umsetzung findet im Rahmen der **Industrieprojekte** statt. Die entsprechenden, geförderten Projekte sind:

- Korrosionsschutz an Ölheizkesseln im Feldtest,
- Sensortests und Einsatzpotentiale für Mischgasfühler [7],
- Punktuelle Wärmebrücken [22, 34],
- Fehlererkennung in HLK-Anlagen [19],
- Hochwärmedämmendes Verbandmauerwerk [23],
- DELTA, *Contrôle optimum des stores* [12].

Wichtig für die praktische Anwendung von Forschungsergebnissen sind auch P&D-Projekte. Allerdings soll hier die Verbreitung der Erfahrungen in der Baubranche und für Bauherren noch verbessert werden.

Nach wie vor wichtig für die Verbreitung der Forschungsergebnisse sind nebst der Publikation von Be-

richten die Durchführung von Tagungen und Veranstaltungen.

1996 konnte zum 9. Mal das zweitägige **Schweizerische Status-Seminar der Energieforschung im Hochbau** [35] an der ETH durchgeführt werden. Über 40 Forschungsprojekte und ihre Ergebnisse konnten den zahlreichen Teilnehmern vorgestellt werden. Trotz verhältnismässig grossem Teilnehmerinteresse wird diese Konferenz zukünftig wahrscheinlich nur noch eintägig durchgeführt werden können. Die gedrängten Terminkalender der Teilnehmer und andere, heute dringendere Aufgaben der Baubranche erschweren zunehmend die Durchführung mehrtägiger Tagungen.

Weitere wichtige Veranstaltungen waren:

- Schweiz. Schlussveranstaltung des IEA-Projekts: Heat, Air and Moisture Transfer in New and Retrofitted Insulated Envelope Parts, ETH Zürich, 24.4.1996
- VSHL/EMPA-Lüftungstagung zum Thema Wärmerückgewinnung, Technopark Zürich, 30.5.1996
- Schweiz. Schlussveranstaltung des IEA-Projekts: Thermische Simulation von Gebäuden, Gebäudesimulation – Fortschritt mit Qualitätslücken, SBG Zürich, 12.6.1996

Ausblick 1997

1996 konnten vor allem viele ältere Projekte abgeschlossen und die Ausrichtung und die Schwerpunkte des **neuen Programms 96-99** [28] definiert werden. Erste Projekte des neuen Programms wurden bereits gestartet, mit rund einem Dutzend neuer, geplanter Projekte soll 1997 begonnen werden.

Das P&D-Programm, welches bis anhin eher ein reaktives Programm darstellte, soll über die gezielte Aus-

schreibung von ausgewählten Demonstrationsthemen zu einem mehrheitlich aktiven Programm werden.

Sowohl im Forschungs-, aber vor allem im P&D-Bereich soll die Querinformation verbessert werden. Es ist geplant, dass bis Ende 1997 alle laufenden Projekte über Internet abgefragt werden können. Im P&D-Bereich will man so die Transparenz und Zugänglichkeit der Projekte verbessern.

Projektliste

- [1] G. Zweifel, EMPA, Dübendorf, P. Jaboyedoff, SORANE, Lausanne: *Thermische Simulation von Gebäuden*. (SB) • *Programm zur Bedarfsermittlung für Raumkühlung nach SIA 382/3*.
- [2] M. Zimmermann, EMPA, Dübendorf: *Low Energy Cooling (IEA Annex 28)*. (JB) *Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden 1996-1999*. (JB)
- [3] K. Richter, EMPA, Dübendorf: *Ökologische Bewertung von Wärmeschutzgläsern*. (SB)
- [4] P. Steiner, EMPA, Dübendorf: *IEA/ECB Annex 24: Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Insulated Envelope Parts (HAMTIE)*. (SB)
- [5] Th. Frank, EMPA, Dübendorf: *KOBRA (PC-Wärmebrückenatlas)*. (SB)
- [6] V. Dorer, EMPA, Dübendorf: *IEA/ECB Annex 5: Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)*. (SB) • *Energierachenunterstützung für Gebäude- und Haustechniksimulationen*. (JB)
- [7] R. Gehrig, EMPA, Dübendorf: *Verhalten von Mischgasfühlern für oxidierbare organische Gase und ihre Einsatzpotentiale*. (JB)
- [8] H. Simmler, EMPA, Dübendorf: *Wärmelasten transparenter Bauteile und Sonnenschutzsysteme*. (JB)
- [9] M. Koschenz, EMPA, Dübendorf: *Planungshilfsmittel für thermoaktive Bauteilsysteme*
- [10] J. Brenn, EMPA, Dübendorf: *Rechenmodell zur Bestimmung des Nutzungsgrades atmosphärischer Gasheizkessel*.
- [11] C. Roulet, EPF-Lausanne: *Participation de la Suisse au projet Européen Joule II PASCOOL*. (SB) • *Programme LESOKAI 2.0*. (JB) • *IEA/ECB Annex 23: Multizone Air Flow Modelling*. (SB) • *ATEMAC, Application des traceurs passifs pour l'étude des mouvements d'air et de contaminants*. • *MEDTIA, Méthode de diagnostic des installation de traitement d'air*.
- [12] N. Morel, EPF-Lausanne: *DELTA, Contrôle optimum des stores*. (JB)
- [13] H.U. Wanner, ETH-Zürich: *Mikrobielle Untersuchung an Luft-Erdregistern*. (SB)
- [14] A. Moser, ETH-Zürich: *IEA/ECB Annex 26: Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures*. (JB)
- [15] R. Frischknecht, ETH-Zürich: *Weiterführung Ökoinventar für Energiesysteme*. (SB) *IEA/BCS Annex 32: Energy Related Environmental Impact of Buildings*.
- [16] A. Baumgartner, INTEP, Zürich: *Wettbewerb Mustersanierung Mehrfamilienhaus*. (SB)
- [17] N. Kohler, IFIB/UNI-Karlsruhe: *Optimierung von Gesamtenergieverbrauch, Umweltbelastung und Baukosten (OGIP/DATO)*. (SB)
- [18] U. Mauch, INFRAS, Zürich: *Nachhaltigkeit der Schweizer Bauwirtschaft*. (SB)
- [19] J. Tödtli, LANDIS & GYR, Zug: *IEA/ECB Annex 25: Fehlererkennung in HLK Anlagen*. (SB)
- [20] W. Hässig, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Erfolgskontrolle an Öko-Bürohaus TENUM*. (SB)
- [21] R. LÜTHI, Regensberg: *Messprojekt Personalthäuser Dielsdorf*. (JB)
- [22] J. Schaufelberger, SVDW, Uzwil: *Punktuelle Wärmebrücken*.
- [23] H. Gubler, VSZ, Zürich: *Hochwärmedämmendes Verbandmauerwerk*. (JB)
- [24] R. FRAEFEL, Grüningen: *Dynamisches Wärmeverhalten innen gedämmter Klassenzimmer*. (SB)
- [25] M. EL-Khoury, CSEM, Neuchâtel: *NEUROBAT - Système biométique de gestion énergétique du bâtiment*. (SB)
- [26] R. Sigg, INTEP, Zürich: *Wärme- und Kälteleistung trocken verlegter Erdregister*. (JB)

(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht(e) vorhanden

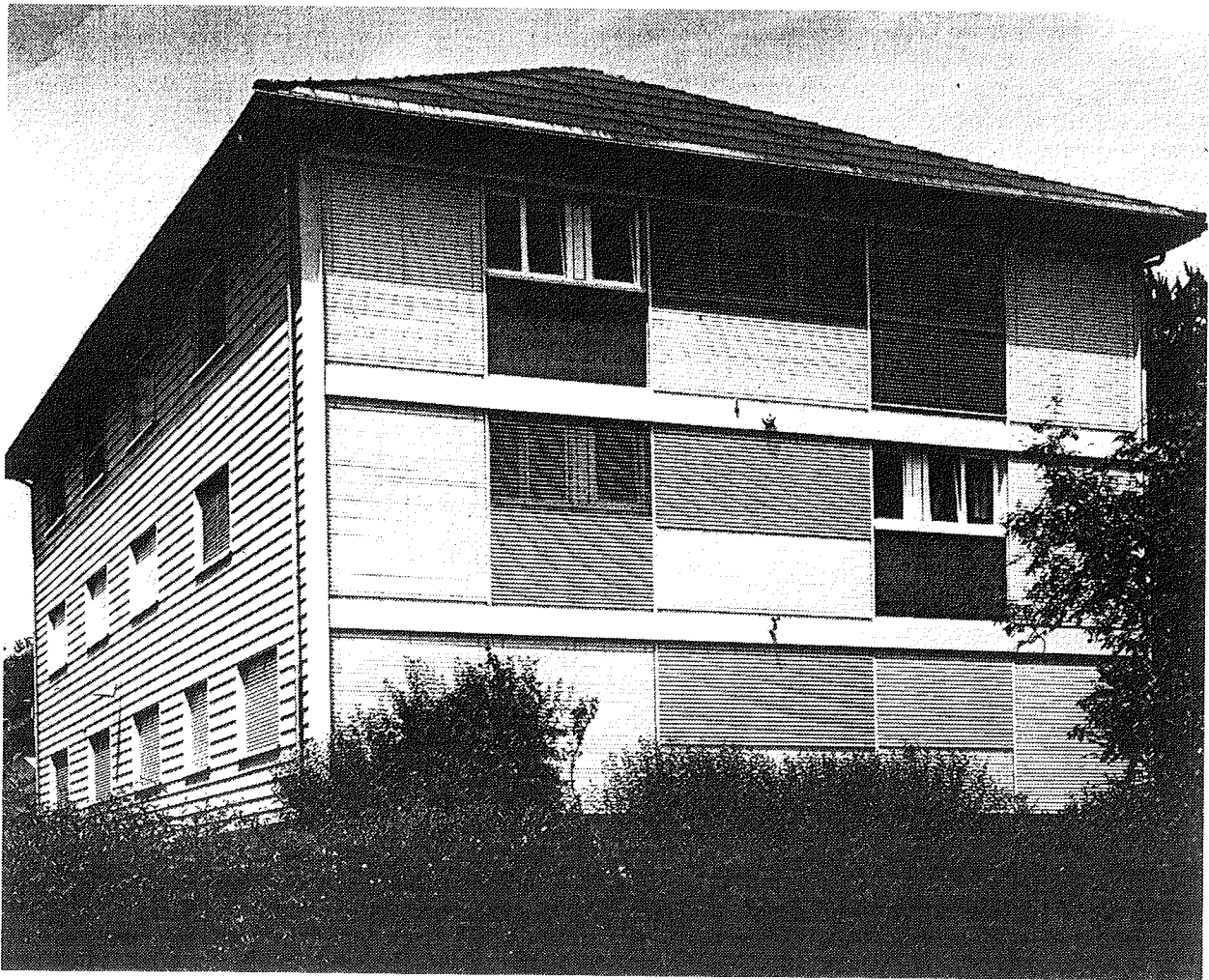
Referenzen

- [27] P. Burkhardt et al, BEW, Bern: *Hauptbereichsprogramm Gebäude 1996-1999*, November 1996
- [28] M. Zimmermann, EMPA, Dübendorf: *Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden*, Januar 1996
- [29] K. Richter, K. Brunner, H. Bertschinger, EMPA, Dübendorf: *Ökologische Bewertung von Wärmeschutzgläsern*, August 1996
- [30] A. Binz, F. Fregnan, IBB/NDSE, Muttens: *Wiederverwertung von Fensterglas, Konzeptstudie*, August 1996
- [31] K. Richter, T. Künniger, K. Brunner, EMPA, Dübendorf: *Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen verschiedener Rahmenmaterialien*, EMPA/SZFF, Mai 1996
- [32] U. Mauch, A. Scheidegger, INFRAS, Zürich: *Nachhaltigkeit des Bauens in der Schweiz - Ein Diskussionsbeitrag*, Juli 1996
- [33] TENUM, Liestal: *Öko-Bürohaus TENUM, Fakten, Erfahrungen, Analysen*, Januar 1996
- [34] Ch. Tanner, EMPA, Dübendorf: *Wärmebrücken von hinterlüfteten Fassaden*, September 1996
- [35] M. Zimmermann, H. Bertschinger et. al., EMPA, Dübendorf: *9. Schweizerisches Statusseminar der Energieforschung im Hochbau*, Tagungsband, September 1996
- [36] C. Roulet et al, EPF-Lausanne: *Programme LESOCOOL*, 1996
- [37] J.-P. Eggimann et al, EPF-Lausanne: *Programme LESOSAI*, 1996
- [38] M. Santamouris, A. Argirlou, UNI-Athens: *Pascool Software CD-ROM*
- [39] H. Burmeister, B. Keller, HBT/ETH-Zürich: *Die quantitative gebäuderelevante Darstellung von Klimadaten: Die Klimaflächen, 1996*
- [40] P. Suter, R. Frischknecht, ESU/ETH-Zürich: *Ökoinventare von Energiesystemen, CD-ROM für MacOS und Windows*, ENET 1996
- [41] K. Ghazi-Wakili, EMPA, Dübendorf: *KOBRA - Wärmebrückenatlas auf PC*, 1996

SOLARARCHITEKTUR

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

S. Robert Hastings



Gebäudesanierung mit transparent wärmegeämmten Fassadenelementen.

Ein 1971 erbautes Mehrfamilienhaus wurde wärmetechnisch saniert. An der Südfassade wurden vorgefertigte Elemente mit transparenter Wärmedämmung, auf den West-, Ost- und Nordfassaden 10 cm Steinwolle aufgebracht. Das dreieckige, südorientierte Dachfeld wurde mit Warmwasserkollektoren belegt.

Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1996

Die Solararchitektur strebt an, Gebäude so zu gestalten, dass die Sonne gezielt als Licht- und Wärmequelle einbezogen wird um den Verbrauch von nicht-erneuerbarer Energie extrem tief zu halten. Materialwahl, Form des Gebäudes, Verhältnis von transparenten zu opaken Partien in der Gebäudehülle, Zonierung und Anordnung der thermischen Masse werden so gewählt, dass einerseits möglichst viel der angebotenen Sonnenenergie aufgenommen werden kann und für einige Zeit im Gebäude gespeichert bleibt, ohne dass im Sommer Überhitzung auftritt. Durch Zusammenarbeit mit Industrie, Forschungsinstituten und Schulen werden Grundkenntnisse und praktische Erfahrungen gewonnen, die es erlauben, den Energiebedarf von Gebäuden immer weiter zu senken ohne Einbussen an Komfort hinnehmen zu müssen. Es ist Aufgabe des **Forschungsprogrammes Solararchitektur**, die Erarbeitung neuer Konzepte, die Entwicklung von Prototypen neuer Materialien und Komponenten, Erfolgskontrollen an gebauten Objekten und die Bereitstellung von Planungshilfsmitteln zu fördern und unterstützen. Die Resultate müssen dann in die Praxis sowie in Aus- und Weiterbildung eingebracht werden. Wegen beschränkter Mittel ist eine starke Verknüpfung mit komplementären Forschungstätigkeiten im Ausland unerlässlich.

Die Schwerpunkte im Berichtsjahr waren:

- Direkte Solarnutzung - Wärme;
- Direkte Solarnutzung - Tageslicht;
- Indirekte Solarnutzung - Konvektiv;
- Indirekte Solarnutzung - Passivsysteme;
- Systemintegration - Energie;
- Systemintegration - Ökologie

Es waren folgende Arbeiten vorgesehen:

Für die Aspekte Wärme, Passivsysteme und Systemintegration: Weiterführung schon laufender Messprojekte; nach Abschluss der Messungen Untersuchung der Gebäude auf Optimierungsmöglichkeiten bezüglich Energieersparnis.

Auf dem Gebiet Tageslicht: Erarbeitung von Planungshilfsmitteln für Energieanalysen und Tageslichtanwendungen auf PC-Basis und in Form von Typenblättern, die bei der Konzipierung von Tageslichtsystemen herangezogen werden können.

Zum Schwerpunkt Konvektive Nutzung: Fertigstellung der Nomogramme für die Planung von Hypokaustsystemen, Durchführung von Messprojekten an Solarluftsystemen.

1996 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

FORSCHUNGSPROGRAMM 1996 BIS 1999

Ein ausführliches Forschungsprogramm für die Jahre 1996 bis 1999 wurde der CORE und der Begleitgruppe

"Rationelle Energienutzung in Gebäuden" präsentiert und von diesen positiv beurteilt.

DIREKTE SOLARNUTZUNG - WÄRME

Das **Messprojekt Direktgewinnhaus Trin** [15] wurde abgeschlossen. Als Resultat darf festgehalten werden, dass dieses Haus dank eines ausgewogenen Verhältnisses zwischen Fensterfläche, Speichermasse, guter Isolation und Dichtigkeit zum Null-Heizenergiehaus wird. Sozusagen als Nebenprodukt ergab sich die Erkenntnis, dass für Analysen von Niedrigenergiehäusern die Berechnungsmethoden verfeinert werden müssen.

Anhand der Daten des Direktgewinnhauses Trin soll im Nachfolgeprojekt **Praktische Anwendung der Methode der Klimaflächen und der dynamischen Speicherberechnung** [15] mit den erwähnten Verfahren ein vertieftes Verständnis der Speicherverhaltens erarbeitet werden sowie die praktische Verwendbarkeit der Methode geprüft werden. Im abgelaufenen Jahr wurde zunächst mittels der dynamischen Speicheranalyse eine

viertägige sonnenlose Phase betrachtet. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein grösserer Anteil der Speichermasse am Wärmeaustausch beteiligt ist, als auf Grund der Untersuchungen im Messprojekt ermittelt wurde.

Im Projekt **Rechenmodelle, Mess- und Prüfverfahren für transparente Bauteile** [2] wurden die schon im Jahre 1995 begonnen Potentialstudien weitergeführt, wobei es diesmal vor allem darum ging, den Einfluss transparenter Wärmedämmung auf die Energiebilanz zu ermitteln.

Im weiteren wurde ein Modul mit transparenter Wärmedämmung einem Prüfverfahren zur Bestimmung des Wärmedurchgangs, des Gesamtenergiedurchlassgrades, der thermischen Deformation und des Feuchtehaushalts unterzogen.

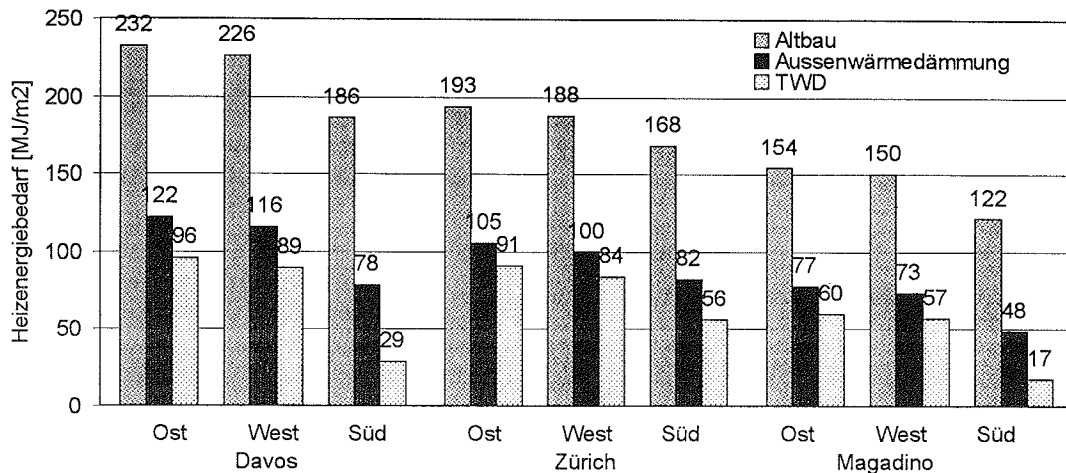


Fig. 1: Diagramm aus "Rechenmodelle, Mess- und Prüfverfahren für transparente Bauteile"

Ergebnis der Potentialstudie: Verbleibender Heizenergiebedarf verschiedener Sanierungsvarianten.

Als Altbau und Referenz wurde ein Mehrfamilienhaus gewählt, gut isolierend sind Dach ($k=0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$), Kellerdecke ($k=0.21 \text{ W/m}^2\text{K}$) und moderne Fenster ($k=1.5 \text{ W/m}^2\text{K}$). Für den Altbau wurde mit einer 32 cm dicken Wand aus KS ($k=1.05 \text{ W/m}^2\text{K}$), als Aussendämmung mit einer 9 cm dicken Schicht Steinwolle ($k=0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$) und im Fall TWD mit transparenter Wärmedämmung ($k=0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$) auf der Hauptfassade gerechnet.

DIREKTE SOLARNUTZUNG - TAGESLICHT

Im Projekt **Tageslichtnutzung in an Atrien grenzenden Räumen** [1] wurde herauskristallisiert, welche Merkmale entscheidenden Einfluss haben auf den Bedarf an Beleuchtungs-, Heiz- und Kühlenergie eines Büroraumes. Untersucht wurden folgende Parameter: Verhältnis Atriumhöhe zu Grundfläche, Durchlassgrad und k-Wert der Dachverglasung, Anteil Verglasung an der Dachfläche, Reflexionsvermögen der Atriumwände, sowie Grösse der Bürofenster. Je nach Verhältnis von Höhe zu Grundfläche wirken sich Änderungen der anderen Parameter unterschiedlich aus. In niedrigen Atrien z.B. kann der Einfluss einer Änderung des Reflexionsvermögens durch eine Änderung der Fenstergrösse kompensiert werden. In hohen Atrien dagegen sollte das Reflexionsvermögen möglichst gross sein, was helle Farben und kleine Bürofenster erfordert, damit genügend Licht in die unteren Zonen gelangt. Im kommenden Jahr werden die Ergebnisse in einem Bericht veröffentlicht.

Das Projekt **Optische und thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien** [2] wurde im Laufe des Jahres abgeschlossen mit der Freigabe einer PC-gestützten Glasdatenbank.

Im Projekt **Lumière naturelle et Énergie - Etudes typologiques** [7] wurden für fünf Gebäudeformen - Zeile, L, U, E und Blockrand - der visuelle Komfort am Arbeitsplatz untersucht. Für drei Arten von fixen Sonnen-

schutz-Vorrichtungen wurde der Einfluss auf den Energieverbrauch und den visuellen Komfort bestimmt. Die Arbeiten wurden mit der Abgabe von acht Typenblättern auf Jahresende abgeschlossen.

Beim Projekt **DIAL - Outil d'aide à la décision en éclairage naturel** [5] geht es um die Erstellung eines Werkzeuges zur Unterstützung des Architekten während der Vorprojektphase von Tageslichtsystemen. Der Gebrauch des Hilfsmittels erfordert keine speziellen Fachkenntnisse über Tageslichtanwendungen. Die Raumgeometrie kann graphisch oder über Umschreibungen definiert werden, Zahlenwerte sind zulässig aber in keiner Phase zwingend. Weiter teilt der Benutzer dem Rechner mit, welche Aktivitäten in einem Raum vorgesehen sind. Dies geschieht durch Antippen von Schaltflächen. Die Anforderungen an die Helligkeit ermittelt der Rechner auf Grund dieser Eingaben selbst. Im abgelaufenen Jahr wurden die Programmteile fertiggestellt, welche für die Definition der Beleuchtungsaufgabe und zur Eingabe der Raumgeometrie dienen. Ein erster Teil der Auswertungsmoduls wurde erstellt, so dass ein Stand erreicht ist, der es erlaubt, einen Gesamtüberblick über das Programm zu vermitteln. Dieses Werkzeug wird ein Beitrag der Schweiz sein an das IEA-Projekt *Daylighting in Buildings*.

INDIREKTE SOLARNUTZUNG - KONVEKTIV

Ziel des Projektes **Auslegung von Hypokaustenspeichern** [8] ist es, Nomogramme zu erarbeiten, welche die Auslegung solcher Systeme vereinfachen. Für die Durchführung der erforderlichen Berechnungen wurde ein Modul für das Simulationsprogramm TRNSYS

verbessert. Mit der Erarbeitung der Nomogramme wurde begonnen.

Ein bereits abgeschlossenes P&D-Projekt hatte gezeigt, dass die damals untersuchte dachintegrierte Luftkolle-

toranlage mit offenem Kreislauf optimaler arbeitete, wenn sie an der Fassade angebracht würde. Im Projekt **Optimierung einer Luftkollektoranlage für industrielle und gewerbliche Hallenbauten** [9] geht es darum, das Optimierungspotential zu quantifizieren. Es wurden Simulationsrechnungen durchgeführt und dabei wurde auch die Abhängigkeit des Ertrages von der Orientierung untersucht. Es zeigte sich, dass schon ein südost orientierter Kollektor je nach Monat 15 bis 35% Minderertrag bringt gegenüber einem nach Süden orientierten.

Im Vorderrheintal steht ein Einfamilienhaus, dessen verglaste Südfassade als Luftkollektor konzipiert ist, der die gewonnene Wärme in die Decke des Erdgeschosses abgibt. Dieses Hypokaustsystem wird im Projekt **Wirtschaftliche und gesamtökologische Optimierung eines konvektiven Luftsystems** [9] ausgemessen und auf Verbesserungsmöglichkeiten hin untersucht. Die Messungen wurden im April gestartet. Während der sommerlichen Messperiode wurde parallel dazu die Durchströmung des Kollektors einreguliert. Eine vorläufige Ermittlung ergab für den Kollektor einen Wirkungsgrad von 40%. Die Messphase dauert noch bis Ende Mai 1997.

Wie der Projekttitel **Messung Fenster Luftkollektorsystem** [18] schon sagt, wurde eine Messkampagne gestartet, um in einem Einfamilienhaus den Wirkungsgrad eines Fenster-Luftkollektors mit Hypokaustenspeicher im Fussboden zu überprüfen. Nachdem schon in früheren Projekten solche Analysen durchgeführt wurden, geht es hier darum, frühere Aussagen zu überprüfen. In der zweiten Jahreshälfte wurde die Messausrüstung für die automatische Datenaufzeichnung installiert und in Betrieb genommen. Im weiteren wurde der Luft-Volumenstrom gemessen. Dieser beträgt bezogen auf die Kollektorfläche $51 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ und entspricht den Planungsgrößen. Die Kollektorfläche ist mit 30 m^2 etwas kleiner als der Richtwert erfordert (25% der EBF von 144 m^2), dies wegen architektonischer Randbedingungen; während die Speicherkapazität etwas über den Richtwerten liegt. Die Messungen laufen bis Ende September 1997.

INDIREKTE SOLARNUTZUNG - PASSIVSYSTEME

Im März 1996 wurden die Sanierungsarbeiten an einem Mehrfamilienhaus in Hedingen abgeschlossen, wobei an der Südfassade TWD-Elemente angebracht wurden. Seither werden im Rahmen des Projektes **Erweiterte Erfolgskontrolle einer Gebäudesanierung mit TWD-Fassadenelementen** [12] Meteoraten und Temperaturen im Mauerquerschnitt gemessen. Es sollen die Auswirkungen in energetischer und bauphysikalischer Hinsicht, sowie das Komfortempfinden der Bewohner untersucht werden. Im Laufe des Sommers gab es dank

SYSTEMINTEGRATION - ENERGIE

Im Zusammenhang mit dem Projekt **Nutzung der Sonnenenergie bei Gebäudesanierungen** [13] wurden zwei MFH mit TWD (neben PV und Warmwasser) saniert und im Berichtsjahr fertiggestellt. Die dabei

Abgeschlossen wurde die erste Phase des IEA-Projektes *Modélisation de grand espaces vitrés* [10]. Darin wird berichtet über die Algorithmen zur Berechnung der Verteilung der einfallenden Sonnenstrahlung auf die verschiedenen Teile des Atriums, natürliche Durchlüftung durch Öffnen der Fenster auf verschiedenen Höhen, Temperaturschichtung und thermischen Komfort. Die im kommenden Jahr startende Phase 2 soll den Einfluss der wichtigsten Parameter auf Energiebilanz und Komfort aufzeigen.

In Projekt **Solare Luftvorwärmung in Atrien** [11] wurde ein Atrium untersucht, welches von Büroräumen umgeben ist und dessen Warmluft während der Heizperiode zur Vorwärmung der Frischluft herangezogen wird. Die energetische Bedeutung und die Wirksamkeit der solaren Luftvorwärmung waren mittels Messungen und Simulationsrechnungen zu bestimmen. Die Messungen wurden abgeschlossen. Viel Aufwand erforderte die Regelung der Atriumsbeschattung, die anfänglich zu häufig geschlossen war und so zu Zeiten potentiellen Energiegewinns beschattete. Der Beitrag der Atriumluft an die Luftvorwärmung beträgt im Durchschnitt pro Jahr gegen 20%; er ist am höchsten bei Aussentemperaturen von 5 bis 15°C . Untersucht wurde auch der Einfluss der Luftentnahme auf die Pufferwirkung des Atriums und damit auf den Wärmeabfluss aus den Büroräumen ins Atrium. Dieser wird zwar erhöht, die Erhöhung hält sich in akzeptablen Grenzen.

Hypokaustenspeicher dienen der Wärmeabgabe wie der Wärmespeicherung; die Energiezufuhr erfolgt über erwärmte Luft. Das Verhalten solcher Systeme bezüglich Wärmeabgabe und -aufnahme bei Solarbetrieb kann nur mittels aufwendiger Berechnungen ermittelt werden. Im *IEA-Projekt Solar Air Systems for Buildings* [14] wurde eine Fallstudie über Luftsysteme in Gebäuden abgeschlossen. Weiter wurde an der Erstellung von Nomogrammen für die Auslegung von Solarluftsystemen und an einem PC-Planungswerkzeug gearbeitet. Diese Teilaufgaben werden im kommenden Jahr weitergeführt.

der Beschattung mittels Sonnenstoren keine Überhitzung. Im Frühjahr und Herbst traten jedoch recht hohe Temperaturen auf, so dass befürchtet wird, dass auf die Dauer das Material Schaden nehmen könnte.

Gestartet wurde das Projekt **Hinterlüftete, transparent wärmegeämmte Vorhangfassadenelemente** [13] mit dem Ziel, gegen die sommerliche Überhitzung eine kostengünstige Lösung zu entwickeln. Bisher wurden erst Vorversuche durchgeführt.

gewonnenen Erkenntnisse wurden im Rahmen eines Projektes der IEA eingebracht als Beitrag zu einem Handbuch.

Beim Projekt **Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil** [3] war das Ziel, das im Rahmen eines NEFF-Projektes ausgemessene Haus mit dem Programm TRNSYS zu simulieren, um im Rahmen einer Parameterstudie die Einflüsse von Konstruktions- und Betriebsvarianten aufzuzeigen. Die Modellierung des Gebäudes mit seiner haustechnischen Installation war anspruchsvoll. Die Simulation von Räumen in Kombination mit der Fussbodenheizung mit sehr niedrigen Betriebstemperaturen erforderte ein besseres Fenstermodell im TRNSYS. Weitere Probleme stellten das Modell für den Wasserspeicher sowie die Verknüpfung des Gebäudes mit dem Kollektor an der Fassade. Eine trotz detaillierten Messungen schwierige Interpretation der effektiven Betriebszustände in der Solarheizungsanlage erschwerte die Modellierung zusätzlich. Anhand der Simulationsresultate können jedoch bestimmte Effekte wie z.B. eine unerwünschte Rück-zirkulation eindeutig aufgezeigt werden. Mit der am Schluss des Projektes durchgeführten Parameterstudie werden u.a. die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen energetischen Massnahmen in diesem Gebäude erfasst. Der Schlussbericht ist ab Anfang 1997 erhältlich.

In der Phase II des Projekts **Optimierung der Luftkollektoranlage mit Latentspeicher in Schüpfen** [3] wurde die Anlage in situ umgebaut. Der bestehende Latentspeicher wurde entfernt und ein Wärmetauscher eingebaut, über den die Wärme des bestehenden Luftkollektors in den zur Stückholz-Zusatzheizung gehörenden Wasserspeicher eingespeist werden kann. Damit wird eine Nutzung der Kollektoranlage auch im Sommer für die Brauchwarmwasserbereitung möglich. Die Abstimmung der Fördermengen luft- und wasserseitig war aufwendig, was teilweise dem photovoltaischen Antrieb zuzuschreiben ist. Die Fördermengensteuerung über den photovoltaischen Antrieb funktioniert jetzt zufriedenstellend. Der Kollektorertrag blieb insgesamt unter den Erwartungen, obschon ein grosszügig dimensionierter Wärmetauscher verwendet wurde. Losgelöst von diesen geräteorientierten Arbeiten wurden die Simulationsrechnungen an Latentspeichern ergänzt, um den Einfluss der planungsrelevanten Grössen wie Speicherkapazität pro Kollektorfläche, Wärmeübergangszahl beim Ladebetrieb und Oberflächen/Volumenverhältnis aufzuzeigen.

Im **Messprojekt WASAG, Photovoltaik- und Luftabsaugfassade** [16] geht es darum, das gesamte Energiekonzept des Gebäudes mit Photovoltaikanlage, SOLARWALL, Heizungs- und Lüftungsanlage so abzustimmen, dass eine optimale Ausnützung der regenerativen Energiequellen gewährleistet ist. Die Messungen sind seit April 1996 im Gang. Um eine Modifikation der Betriebsstrategie durchführen zu können, muss auch die Winterperiode erfasst werden. Die Auswertung und Optimierung der Betriebsstrategie kann erst Anfang 1997 vorgenommen werden. Bisher wurde festgestellt, dass die Temperaturen unter dem Solardach im Sommer die erwarteten Werte um fast 30% übersteigen. Dieses Ergebnis erfordert eine Anpassung

des Mischverhältnisses zwischen vorgewärmter Luft und Aussenluft.

Zur Elektrizitätsbilanz ist zu bemerken, dass der Bedarf des Gebäudes in den bisher erfassten 9 Monaten um 30 % höher lag, als für diese Zeitspanne erwartet wurde. Für die gleiche Periode liegt der Ertrag der Photovoltaikanlage ca. 15 % tiefer als erwartet. Dies ist auf Störungen am Wechselrichter zurückzuführen, die inzwischen behoben wurden.

Ziel des Projektes *Incidence de la typologie des façades double-peau sur leurs performances énergétiques et en physique du bâtiment* [4] ist es, die Gesetzmässigkeiten zwischen physikalischer Leistung und den Parametern der *double-peau* herzustellen. In diesem Jahr wurden Messungen durchgeführt an schmalen und breiten Doppelwandfassaden. Die Messungen der schmalen Doppelwandfassaden wurden an einem Bürogebäude vorgenommen, wo Temperaturverteilung, Wärmefluss und Luftbewegungen bestimmt wurden. Dabei wurde festgestellt, dass horizontale und vertikale Spalten die die Fassade gliedern, einen starken Einfluss auf die Luftströmung haben.

Die in der Schweiz gebräuchlichen Simulationsprogramme sollen im Rahmen eines IEA-Projektes einer Validierung unterzogen werden. Für das Projekt **Praxisnahe Validierung von Gebäude- und Hauteschniksimulationsprogrammen** [17] wurde bisher nach brauchbaren Gebäudebeispielen gesucht, von welchen zuverlässige Messresultate vorhanden sind, welche als Basis herangezogen werden können.

Beim Projekt **LESOSHADE und LESOCONF** [6] geht es um die Erarbeitung von zwei Programmen, die einerseits das Monatsbilanzprogramm LESOSAI ergänzen, aber auch als selbständige Werkzeuge einsetzbar sind. Mit LESOSHADE kann der von umstehenden Hindernissen erzeugte Beschattungsfaktor für Fassaden oder Fassadenteile errechnet werden. LESOCONF erlaubt die dynamische Berechnung des thermischen Komforts für eine ausgewählte Periode. Für LESOSHADE wurde ein Konzept erarbeitet, worin die zugelassenen geometrischen Elemente, die Benutzeroberfläche und die Berechnungsmethoden festgelegt wurden. Für LESOCONF wurde mit der Arbeit an einem Umwandlungsmodul, welches Gebäudedaten aus LESOSAI bereitstellt, begonnen.

Das Programm **LESOSAI 4** [4] zur statischen Berechnung der Wärmebilanz eines Gebäudes wurde in deutscher und französischer Sprache je mit einer Anleitung fertiggestellt. Eine italienische Version ist in Arbeit. Von den eingebauten Neuerungen seien die Möglichkeit zur Berechnung neuer Solarelemente und die Anpassung der Rechenverfahren an die Ansprüche von Niedrigenergiehäusern erwähnt.

Nationale Zusammenarbeit und internationale Zusammenarbeit

NATIONAL:

- Begleitgruppe des Öko-Bau Programmes von DIANE (BEW);
- Eidg. Kommission zur Förderung der Nutzung von Sonnenenergie (KNS);
- Solar Frauen Schweiz der Schweizerischen Vereinigung für Sonnenenergie (SSES);
- Bundesvorstandsmitglied der SSES;
- Jurymitglied Solarpreis 96, Bern.

INTERNATIONAL:

- IEA-Projekte: *Building Energy Analysis Tools, Advanced Solar Low Energy Buildings, Advanced Glazing Materials, Solar Air Systems, Solar Energy in Building Retrofit*: Mitwirkung, 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, Leitung von Sessionen und Referat;
- Archiv-Fachzeitschrift "Energy and Buildings": Mitglied des *Editorial Review Board*;
- *Foundation for Research, Science and Technology* (NZ): Begutachter für neue Forschungsanträge.

Transfer in die Praxis

Das Diplomwahlfach "Bauen und Sonnenenergienutzung" wurde auch im Jahr 1996 gelesen. Durchschnittlich wurde die wöchentlich je einstündige Vorlesung von ca. 70 StudentInnen und einzelnen in der Praxis tätigen Architekten besucht. Insgesamt haben 17 StudentInnen eine Diplomwahlfacharbeit abgegeben und mit einer bestandenen Prüfung abgeschlossen.

In diesem Jahr wurde eine Seminarwoche im Herbst zum Thema "Glasträume" in Paris organisiert. Infolge grosser Nachfrage wurde die Reise mit 30 Studenten und zwei Begleitern durchgeführt.

Der Nachdiplomstudent aus der Romandie untersucht in seiner Arbeit die konstruktiven Massnahmen der passiven und aktiven Solarnutzung für den Bau einer grösseren Siedlung in der Umgebung von Freiburg. Der Student verwendet die Programme HELIOS, SUNREL und LESOSAI.

Um das international gut bewährte PC-Programm SUNCODE (für die dynamische Simulation von Ge-

bäuden) für die Praxis zugänglich zu machen wurden die Arbeiten an einer einfachen "Windows" - Oberfläche in Koordination mit *Colorado State University* (USA) begonnen.

Das jährlich zweimal erscheinende Bulletin SOLAR-ARCHITEKTUR informierte mehr als 700 Abonnenten über Neues im Sektor Solararchitektur sowie Neuererscheinungen von Publikationen und Tagungsankündigungen.

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

An einem Einfamilienhaus in Hochdorf mit einer transparent-wärmegeämmten Lehmwand wurden während der Bauphase die für die nachfolgenden Erfolgsmessungen benötigten Messfühler eingebaut; In Reinach BL wurde ein Wohnhaus mit transparent-wärmegeämmter Südfassade und Photovoltaikpanelen mit P&D-Mitteln gefördert.

Bewertung 1996, Ausblick auf das Jahr 1997

Im abgelaufenen Jahr konnten sechs Projekte erfolgreich abgeschlossen werden.

Leitfaden für das kommende Jahr wird das Forschungsprogramm 1996 bis 1999 sein. Die vorgesehenen Aktivitäten sind nach den drei Gesichtspunkten direkte Solarnutzung, indirekte Solarnutzung und Systemintegration geordnet.

Die **Direkte Solarnutzung** verwendet die durch Fenster einfallende Sonnenstrahlung als Wärme oder Licht. Diese Methode ist einfach, effizient und preiswert. Der technische Fortschritt bei Gläsern und Fenstersystemen hat ihr neue Möglichkeiten erschlossen und ist auch bei Sanierungen anwendbar. Intensive **Tageslichtnutzung** verlangt nach Vorrichtungen für

Lichtlenkung, Blend- bzw. Überhitzungsschutz und Regelsystemen für Kunstbeleuchtung.

Die **indirekte Solarnutzung** fängt die Energie der auf den opaken Teil der Gebäudehülle fallenden Sonnenstrahlung ein und transportiert sie ins Gebäudeinnere. Sie bildet eine Ergänzung zur Direktnutzung. Die Wärme kann gezielt zu Räumen mit Wärmebedarf geleitet oder verzögert über einen Speicher abgegeben werden. Möglichkeiten der **indirekten, passiven Solarnutzung** bieten die transparente Wärmedämmung (TWD), Atrien, Wintergärten, verglaste Loggien und Doppelfassaden. Diese Techniken lassen sich auch bei Sanierungen einsetzen.

Systemintegration ist wichtig bei einer Optimierung.

Dazu ist das Gebäude als Ganzes zu betrachten und die Berücksichtigung aller Endnutzungen wichtig. Im Rahmen des Forschungsprogramms Solararchitektur werden zwei Kriterien für die Optimierung berücksichtigt: Energie und Ökologie.

Bei den zu startenden Projekten wird das Schwergewicht auf Zielsetzungen gelegt, die für Sanierungen und Umsetzung (z.B. Planungshilfsmittel) wichtig sind.

Projektliste 1996

- [1] N. Hopkirk, EMPA-Dübendorf: *Tageslichtnutzung in an Atrien grenzenden Räumen.* (JB)
- [2] Th. Frank, EMPA-Dübendorf: *Rechenmodelle, Mess- und Prüfverfahren für transparente Bauteile.* (JB)
♦ *Optische und thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien.* (SB)
- [3] G. Zweifel, EMPA-Dübendorf: *Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil.* (SB) ♦ *Optimierung der Luftkollektoranlage mit Latentspeicher in Schüpfen.* (SB)
- [4] A. Faist, LESO/EPF-Lausanne: *Façade double-peau, Typologie.* (JB) ♦ *LESOSAI 4.0.* (SB)
- [5] J.-L. Scartezzini, LESO/EPF-Lausanne: *DIAL- Outil d'aide à la décision en éclairage naturel, (IEA Task 21) "Daylighting in Buildings".* (JB)
- [6] N. Morel, LESO/EPF-Lausanne: *LESOSHADE und LESOCONF.* (JB)
- [7] Y. Golay, ITB/EPF-Lausanne: *Lumière naturelle et énergie - Etudes typologiques.* (SB)
- [8] K. FORT, Volketswil: *Auslegung von Hypokaustenspeichern.* (JB)
- [9] A. Gütermann, AMENA, Zürich: *Optimierung einer Luftkollektoranlage für industrielle und gewerbliche Hallenbauten.* (JB) ♦ *Wirtschaftliche und gesamtökologische Optimierung eines konvektiven Luftsystems.* (JB)
- [10] D. Aiulfi, SORANE, Lausanne: *Modélisation de grand espaces vitrés.* (JB)
- [11] H.P. Eicher, EICHER + PAULI, Liestal: *Solare Luftvorwärmung in Atrien.* (JB)
- [12] P. Schneiter, E. SCHWEIZER, Hedingen: *Erweiterte Erfolgskontrolle einer energetischen Gebäudesanierung mit TWD-Fassadenelementen.* (JB).
- [13] A. Haller, E. SCHWEIZER, Hedingen: *Nutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen, Task 20.* (JB) ♦ *Hinterlüftete, transparent wärmegeämmte Vorhangfassadenelemente.* (JB)
- [14] Ch. Filleux, BASLER & HOFMANN, Zürich: *IEA Task 19: Solar Air Systems for Buildings.* (JB)
- [15] W. Hässig, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Messprojekt Direktgewinnhaus Trin* (SB) ♦ *Praktische Anwendung der Methode der "Klimaflächen" zur Ermittlung des Heizenergiebedarfs eines Niedrigenergiehauses und der dynamischen Speicherberechnung mittels Frequenzzerlegung.* (JB)
- [16] P. BERCHTOLD, Sarnen: *Messprojekt WASAG, Photovoltaik und Luftabsaugfassade.* (JB)
- [17] G. Zweifel, ZTL-Horw: *Praxisnahe Validierung von Gebäude- und Haustechniksimulationsprogrammen.* (JB)
- [18] M. Blatter-Spaling, Münchenstein: *Messung Fenster - Luftkollektorsystem.* (JB)

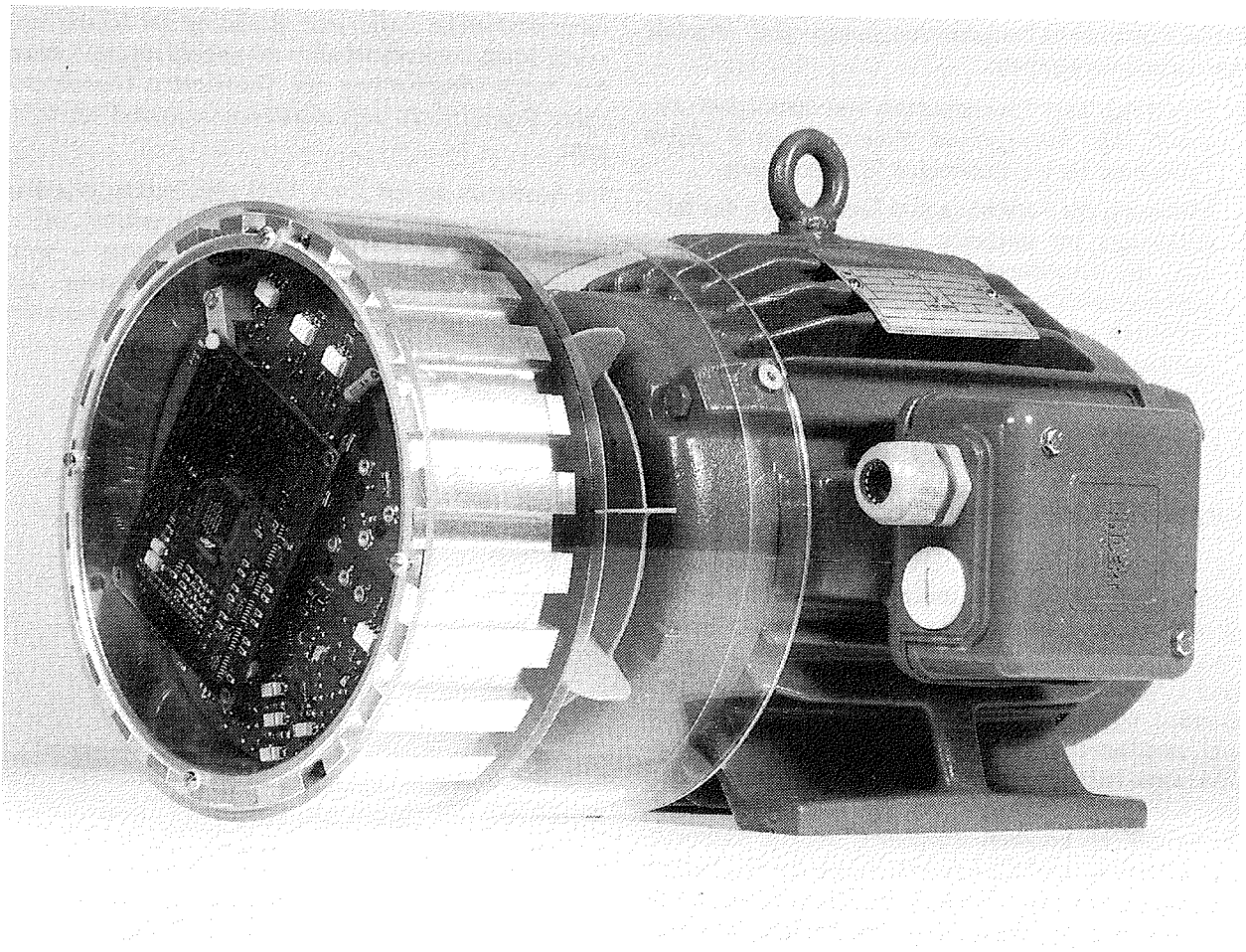
(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Roland Brüniger



Integraldrive

Durch die bis anhin unerreichte Integrationsdichte von Frequenzumrichter und Motor setzt der Integraldrive im Leistungsbereich von 3 kW neue Massstäbe und erweitert den Einsatz von energieeffizienten, variablen Antriebssystemen.

Programmübersicht und Schwerpunkte für die Jahre 1996 - 1999

Beim Forschungsprogramm "Elektrizität" handelt es sich um ein weitreichendes Gebiet. Ein lediglich subsidiärer Mitteleinsatz erfordert deshalb die Festlegung klarer Schwerpunkte. Diese wurden für die Periode 1996 - 1999 mit dem der CORE vorgestellten Forschungskonzept [15] definiert. Gleichermassen wird das Engagement der Industrie vorausgesetzt. Die folgenden drei Schwerpunkte sind bestimmt worden:

Durch **rationelle Elektrizitätsnutzung** kann noch ein beachtliches Einsparpotential ausgeschöpft werden. Da die Elektrizität in den verschiedensten Bereichen eine dominante Rolle einnimmt, ist auch der diesbezügliche Forschungsbereich entsprechend vielfältig. In differenzierter Art und Weise und unter Abstimmung mit andersweitigen Forschungsanstrengungen sind folgende Aktivitäten vorgesehen:

- Förderung und Unterstützung von nationalen *Demand Side Management* Projekten sowie aktive Teilnahme am gleichnamigen IEA-Programm.
- Förderung der Forschung und Entwicklung des Integralmotors im mittleren Leistungsbereich. Ferner wird die Grundlagenentwicklung für ein herstellerübergreifendes *Auslege-Tool* von elektrischen Antrieben unterstützt. Schliesslich werden konkrete Optimierungsprojekte mitfinanziert.

- Nach der erfolgreichen Lancierung der Verlustminimierung von Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten wird das Thema der Energieoptimierung im Netzbereich und in EDV-Räumen anvisiert.

Die Forschungsanstrengungen im Schwerpunkt **Übertragung und Verteilung** sollen dazu beitragen, dass eine hohe Netzverfügbarkeit, gekoppelt mit einer maximalen Netzqualität, sowie eine Minimierung der Übertragungsverluste erreicht wird. Da praktisch der gesamte elektrische Energieverbrauch durch das Verteilnetz zum Endverbraucher übertragen wird, bringt auch eine Verlustverminderung im Promillebereich beachtliche Einsparungen. Basierend auf einer nationalen und internationalen Forschungs- und Entwicklungs-Recherche sowie unter Einbezug der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft wird angestrebt, im Gebiet der Netzbewirtschaftung der Verteilnetze energierelevante Projekte mit angemessenem Aufwand anzustossen.

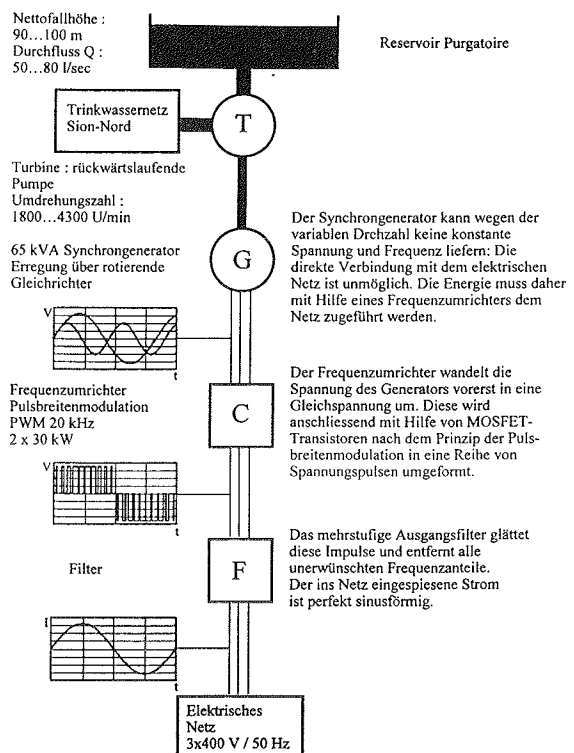
Im Anschluss an das Ende 1995 abgelaufene grundlagenorientierte Nationale Forschungsprogramm 30 – **Angewandte Hochtemperatur-Supraleitung** – wird schliesslich eine kontinuierliche Weiterführung der dortigen energierelevanten Forschungsanstrengungen angestrebt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1996

ERZEUGUNG/PRODUKTION

Es stehen kaum technische Probleme an, die einem Ausbau der **Wasserkraftnutzung** hinderlich wären. Vielmehr sind es ökologische, genehmigungstechnische und wirtschaftliche Aspekte, die zu Fragen Anlass geben. Seit mehreren Jahren versuchen Bundesprogramme wie DIANE und PACER, diverse kantonale und bundesweite Promotionsaktivitäten sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte dem Schrumpfungsprozess im Kleinwasserkraftwerksbereich entgegenzuwirken. So werden im kürzlich erschienen Bericht **Kleinwasserkraftwerke und Gewässerökologie** die Eigenschaften eines natürlichen Fließgewässerökosystems und die Beeinflussung desselben durch den Betrieb von Kleinwasserkraftwerken dargestellt. Der 1996 erschienene 4-Jahresplan über Kleinwasserkraftwerke [16] beschreibt detailliert die Aktivitäten, die das BEW in diesem Bereich vorsieht und unterstützt. Das Hauptziel liegt in der Erhöhung der Energieproduktion aus Kleinwasserkraftwerken mit Reaktivierungen, Ertüchtigungen, Erweiterungen und Neubauten.

Im abgeschlossenen Projekt **Neue Umrichtertechnologien für erneuerbare Energiequellen am Beispiel von Kleinwasserkraftwerken** [1] wurde mit den Stadtwerken Sion ein drehzahlvariables Kleinwasserkraftwerk realisiert, welches die Funktion des Druckreduzierventils zwischen dem Reservoir und dem Versorgungsnetz übernimmt.



Blockschema des Kleinkraftwerks Sion

Anstatt die Energie zu vernichten wird nun mittels einer rückwärtslaufenden Pumpe, einem angeschlossenen Synchronmotor und einem äusserst effizienten Umrichter mit einer max. Leistung von 50 kW eine jährliche Energie von geschätzten 200'000 kWh ins Netz zurückspeisen. Der im Projekt entwickelte neue Umrichter ist zudem auch in Photovoltaikinstallationen in Betrieb. Nach diversen Publikationen im Jahr 1996 soll angestrebt werden, eine Art Kleinwasserkraftwerk-Baukasten für Druckreduzierventile industriell verfügbar zu machen. Konkrete Folgeaktivitäten sind zudem

SPEICHERUNG

In einem vom PSEL unterstützten Projekt wird angestrebt, die Energiedichte von Leistungskondensatoren zu verdoppeln. Zudem laufen verschiedene Aktivitäten

ÜBERTRAGUNG/VERTEILUNG

Mit dem Projekt **Lastbestimmungsmodell für Verteiltransformatoren** [2] wird die automatische Lasterkennung für die Abbildung des Niederspannungsnetzes angestrebt. Mittels punktuellen Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten und einer geeigneten Simulation lässt sich unter Ausnützung von statistischem Wissen über jahreszeitliche Veränderungen verschiedener Lastkomponenten ein ziemlich genaues Netzabbild ermitteln. Im Jahr 1996 stand die Entwicklung der professionellen Benutzeroberfläche der Software im Vordergrund. Die erste Testversion konnte im Herbst 1996 den beteiligten Elektrizitätswerken ausgeliefert werden.

Im Projekt **Stromspar- und Anwendungspotential von neuartigen Bandkern-Verteiltransformatoren** [3] wird untersucht, inwiefern Trafo-Industrie und E-Wirt-

im Zusammenhang mit dem energetisch noch nicht optimierten Synchronmotor in Planung.

Die Elektrizitätswirtschaft stellt speziell im Bereich der grösseren Wasserkraftanlagen beträchtliche Mittel zur Verfügung. So werden knapp 30 % des verfügbaren Betrags des PSEL (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft) im Bereich *Wasserkraft/ Erneuerbare Energien* investiert. Als Beispiel sei die Entwicklung eines Analysesystems durch die EPFL und die EDF erwähnt, welche die Messung und Quantifizierung der Kavitationserosion erlaubt.

an Hochschulen und in der Industrie bezüglich Schwungradtechnologie. Das Programm Elektrizität unterstützt zur Zeit keine diesbezüglichen Projekte.

schaft dank einem neuartigen Herstellverfahren an Ringkerntransformatoren im Verteilnetz interessiert sind und welches Einsparpotential sich damit in der Schweiz erzielen liesse.

Mit der EPFL in Lausanne wird schliesslich seit längerem ein Projekt vorbereitet, in welchem ein Betriebssystem für Umschaltungen im Verteilnetz für die Optimierung, Überlast- und Störungsbeseitigung in Realzeit entwickelt werden soll.

Etwa 25 % des PSEL-Budgets sind dem Bereich *Übertragung/Verteilung* zugeteilt. Vor-Ort-Diagnose und Überwachung des Isolationszustandes von Grosstransformatoren, Online-Monitoring von Leistungstransformatoren im Betrieb, Messungen von Koronageräuschen an 380-kV-Leitungen und andere Projekte werden damit durch die Elektrizitätswirtschaft unterstützt.

VERWENDUNG/RATIONELLE NUTZUNG

a) Kraft/elektrische Motoren

Nachdem im Projekt **Integraldrive 0.55 kW - 22 kW mit regenerativer Energierückspeisung** [4] der erste Prototyp im Leistungsbereich von 3,5 kW fertiggestellt werden konnte, wurde die Leistungserweiterung bis 7,5 kW inklusiv einer Netzfilterintegration sowie der Hard- und Softwareentwicklung für einen Vierquadrantenantrieb erfolgreich erarbeitet. Die Reaktionen der Industrie auf den Integraldrive waren ausserordentlich positiv. Bei ca. 12 Firmen und unter Beteiligung unterschiedlichster Industriebereiche laufen intensive Feldversuche. Druck und Textilmaschinen, Lüfter, Fahrstuhlantriebe, Pumpen und Verdichter sind nur einige Beispiele des breiten Anwendungsgebiets für den Integraldrive.

Mit einer **Machbarkeitsstudie zur Erweiterung des Programmsystems OPAL mit Frequenzumrichtern** [5] wurden die Voraussetzungen und Einschränkungen einer allfälligen Erweiterung der energieoptimalen Motorenauswahl-Software OPAL für drehzahl-variable Antriebe untersucht. Die Studie zeigt auf, dass in einem ersten Schritt auf eine Erweiterung der Datenbank mit

verschiedenen lieferantenspezifischen Umrichterprodukten verzichtet werden soll. Hingegen kann eine Erweiterung des Betriebsverhalten eines umrichtergespeisten Normmotors bei gegebenem Lastspiel (Drehzahl und -moment) berechnen und insbesondere Energieverbrauch und Leistungsfaktor bestimmen. Es ist geplant, OPAL unter Miteinbezug der Industrie in diesem Sinn zu erweitern.

Zur Zeit laufen Vorbereitungsarbeiten für ein neues Projekt, um den schlechten Gesamtwirkungsgrad von Klein-Ventilatoren massiv zu erhöhen. Angestrebt wird eine Verdoppelung oder Verdreifachung des Wirkungsgrads.

Im Rahmen einer ETH-Diplomarbeit wurden die Ergebnisse des Projekts **Verstärkte Ausnutzung der Rekuperationsbremse der Lokomotive vom Typ Re 6/6 der SBB** um die Funktion der Vielfachsteuerung erweitert. Damit werden der Re 6/6 und der Re 4/4 im Fall von Zwei-Zug-Lokomotiven eine optimale Lastaufteilung unter Einbezug der verstärkten Ausnutzung der

Rekuperationsbremse ermöglicht. Die Arbeiten sind erfolgreich verlaufen, und die Messungen zeigen zusätzliche Energierückspeisungen von etwa 90 MWh pro Jahr und Lokomotiven-Paar auf. Wirtschaftlichkeitsbe-

trachtungen weisen einen *Payback* von etwas weniger als 1,5 Jahren auf. Es ist zu hoffen, dass die SBB diese Zusatzsteuerung in allen Lokomotiven einbaut.

b) Bürogeräte/EDV-Netzwerke

Die Bearbeitung des Forschungsschwerpunkts *Energie-Management in EDV-Netzwerken* stellt eine grosse Herausforderung dar. Die Einflussnahme seitens des Bundes ist aufgrund des rasanten Technologiefortschritts, der immer kürzeren Produktzyklen, des Preis- und Margendrucks sowie der weitgehenden Internationalisierung bescheiden. Trotzdem wird in Diskussionen und in internationaler Koordination mit der einschlägigen Industrie versucht, Einfluss auf die zukünftige Entwicklung zu nehmen und das *Power Management* zu thematisieren und zu forcieren. Dank intensiven Bemühungen konnten gute Kontakte zu internationalen PC-Produzenten etabliert werden.

Die *On-Now-Initiative* von Marktführer MICROSOFT beschreibt ein Designkonzept, welches ein unabhängiges *Power Management* für jede einzelne Systemkomponente (Disk, Monitor, Videocard etc.) erlaubt. Eingebunden werden dabei nicht nur die Hardware, sondern auch das Betriebssystem und sogar die einzelnen Applikationen. Gespräche mit der Industrie zeigen, dass eine Marktumsetzung dieses Konzepts im Jahr 1997 möglich sein könnte. Auch das *Magic Frame*-Konzept von HP, welches ein *Remote Power on/off* von PCs am Netzwerk erlaubt, stellt eine Initiative in die gleiche Richtung dar.

Seitens des BEW wird nach wie vor angestrebt, die Problematik *EDV-Netzwerk/Energie* zu thematisieren und sowohl die Öffentlichkeit als auch einschlägige Institutionen dafür zu sensibilisieren. Zur Unterstützung wurde eine Informationsbroschüre in Deutsch und Englisch mit dem Titel *Effizientes Energiemanagement in Computer- und Kommunikationsnetzwerken* verfasst. Die Broschüre beschreibt das mutmassliche Einsparpotential in EDV-Netzen sowie als konkretes Projekt den Prototyp eines Energie-Managementsystems für ein

Novell-Netzwerk. Der Bericht wurde sowohl national als auch international an ca. 600 Adressen versandt. Die gleichzeitig in mehreren anerkannten Fachzeitschriften (*Computerworld*, SIA-Magazin, Schweizer Industrie, englischsprachiges PC-Heft Bytes etc.) publizierten Artikel fanden ein positives Echo. Es werden nun diverse Grundlagen erarbeitet, die den speziellen Problemen des Netzwerks bei den Zielwertvorgaben Rechnung tragen.

Seit längerem wird die Bearbeitung eines Forschungsprojekts mit dem Titel **Energiemanagement in EDV-Netzwerken** angestrebt, welches in grundsätzlicher Form die diversen Aktivitäten auf diesem Gebiet zusammenfassen und konkrete Projektvorschläge aufgrund identifizierter Erkenntnislücken erarbeiten sollte. Ursprünglich war eine Auftragserteilung an eine Fachhochschule vorgesehen. Es haben sich auch mehrere Fachhochschulen dafür interessiert, leider konnten diese aber bis heute nicht die fachlichen personellen Ressourcen bereitstellen. Es zeichnen sich nun aber neue Möglichkeiten ab, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das Projekt unter Berücksichtigung der neusten Entwicklungen anfangs 1997 gestartet werden kann.

Die Zielsetzung der **Fachstelle zur Förderung des rationellen Energieeinsatzes in der Informationstechnik und Unterhaltungselektronik** [6] liegt unverändert im Sammeln, Aufbereiten und Verbreiten von einschlägigem Wissen sowie der Unterstützung der Anwendungen in der Praxis. Im Zentrum der Aktivitäten stand die Leitung des IEA-Projekts *International koordinierte Beschaffung innovativer Kopierer*. Zudem wurde an Veranstaltungen im In- und Ausland die Entwicklung des effizienten Energiemanagements in EDV-Netzwerken thematisiert.

c) Demand Side Management (DSM)

Im IEA-Programm *Demand Side Management* nimmt die Schweiz an zwei Projekten teil. Im Projekt *Communications Technologies for Demand Side Management* [17], welches im Frühling 1997 abgeschlossen wird, werden die verschiedenen Kommunikationstechnologien analysiert und darauf aufbauend ein Evaluationsmodell erarbeitet, welches bei klaren Vorgaben (Kundenmix, geforderte Funktionen etc.) die effizientesten Kommunikationsmedien vorschlägt. Das Evaluationsmodell wird nun noch in einem Softwarepaket weiterentwickelt. Auch das Projekt *Development of Improved Methods for Integrating Demand-Side Options into Resource Planning* wird im Jahr 1997 abge-

schlossen. Das *Executive Committee* ist bestrebt, Vorbereitungsarbeiten für die verstärkte Umzusetzen der erarbeiteten Ergebnisse im Jahr 1997 anzugehen.

Im Folgeprojekt **Prioritäre Aktionsfelder im DSM: Anleitung zur erfolgreichen Marktbearbeitung** [7] soll die erarbeitete Methodik zur Suche der prioritären Aktionsfelder für DSM-Massnahmen überprüft und weiterentwickelt werden. Durch die praktische Umsetzung in mehreren beteiligten Elektrizitätswerken sollen weitere Erkenntnisse gewonnen und diese in einer Anleitung zur erfolgreichen Marktbearbeitung integriert werden.

INTERDISZIPLINÄRE PROJEKTE

a) Supraleitung

Die vorgesehenen Testversuche mit dem Einphasen-Transformator sowie die Fertigung des Dreiphasen-Transformators konnten im Rahmen des Projekts **Hochtemperatur-Supraleiter-Transformator** [8] im Jahr 1996 weitgehend durchgeführt werden. Insbesondere konnte die Endauslegung des Transformators anhand erfolgreicher dynamischer Kurzschluss-tests bei der *Electricité de France* überprüft und deren Richtigkeit bestätigt werden. Der Dreiphasen-Transformator wird anfangs 1997 bei den Stadtwerken Genf in Betrieb genommen und ans Netz angeschlossen. Anschliessend sind verschiedene Tests und Versuche im Betrieb vorgesehen.

Bei der **Entwicklung eines Hochtemperatur-Supraleiterkabels für die Energietechnik** [9] stehen in der ersten Projektphase Konzeptfragen bezüglich Leiteraufbau und die Leiterentwicklung im Vordergrund. Die mechanische Belastbarkeit, Geometrie- und Leistungsabhängigkeiten der erwarteten elektrischen und thermischen Verluste sowie Kühlungsverfahren

unter 77 Kelvin sind dabei zu behandelnde Themen.

Die Schweiz beteiligt sich weiterhin an den IEA-Aktivitäten *Assessing the Impacts of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [9]. Die Experten treffen sich zweimal jährlich und fassen die internationalen Entwicklungen in übersichtlichen Reports zusammen. Zur Zeit laufen Vorbereitungsarbeiten für einen Workshop über Hochtemperatur-Supraleiterkabel.

Ein von der ABB Schweiz auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitermaterial entwickelter *Strombegrenzer* mit 1 MW Leistung wurde im Speicherkraftwerk Löntsch der NOK als erste Industrieanwendung in einem Kraftwerk – 10 Jahre nach der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung – installiert und Dauertests unterzogen. Mit dem vom PSEL mitfinanzierten Strombegrenzer können damit die durch auftretende Kurzschlüsse verursachten Auswirkungen wesentlich reduziert werden.

b) Leistungselektronik

Im BEW-Projekt **energierelevante Umsetzung der LESIT-Ergebnisse** [10] wird gemeinsam mit LESIT-Beteiligten und der Industrie versucht, energierelevante Umsetzungsprojekte zu identifizieren und bei genügendem Engagement und Interesse der Industrie deren Bearbeitung in Form einer Initialunterstützung zu beschleunigen. An einer im Dezember 1996 durchgeführten eintägigen Sitzung konnten erfolversprechende Ansätze erarbeitet werden.

Unterbruchsfreie Stromversorgungs-Anlagen (USV) werden zum Schutz von empfindlichen und kritischen elektrischen Verbrauchern eingesetzt. In einem in Vorbereitung stehenden Projekt sollen vergleich- und nachvollziehbare Qualitätsmerkmale von USV-Anlagen gemeinsam mit der Industrie bestimmt werden. Damit soll dem Planer und Bauherrn ermöglicht werden, die Evaluation von solchen Anlagen nach qualitäts- und energierelevanten Kriterien durchzuführen.

c) Niederfrequente, elektromagnetische Felder

Eine am PSI durchgeführte Arbeit untersuchte die Belastung der Schweizer Bevölkerung in den Jahren 1993/94 durch 50 Hz-Magnetfelder. Dabei wurde fest-

gestellt, dass der vom BUWAL für die Bevölkerung empfohlene Grenzwert von 100 μ T ausserhalb der Arbeitsplätze nicht überschritten wurde.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das BEW steuert im Durchschnitt weniger als 1/3 zu den jeweiligen Projektkosten bei. Die restlichen 2/3 werden durch die involvierte Industrie aufgebracht. Damit wird das grosse Engagement und die intensive Zusammenarbeit mit der Industrie verdeutlicht. Grundsätzlich wird bei allen Projekten eine massgebende Eigenbeteiligung der involvierten Industriepartner und damit eine entsprechende Mitarbeit sichergestellt.

Neben den bereits andersweitig erwähnten Zusammenarbeiten stellt die aktive Teilnahme der Schweiz an den IEA-Programmen "Hochtemperatur-Supraleitung" und *Demand Side Management* unverändert eine ausge-

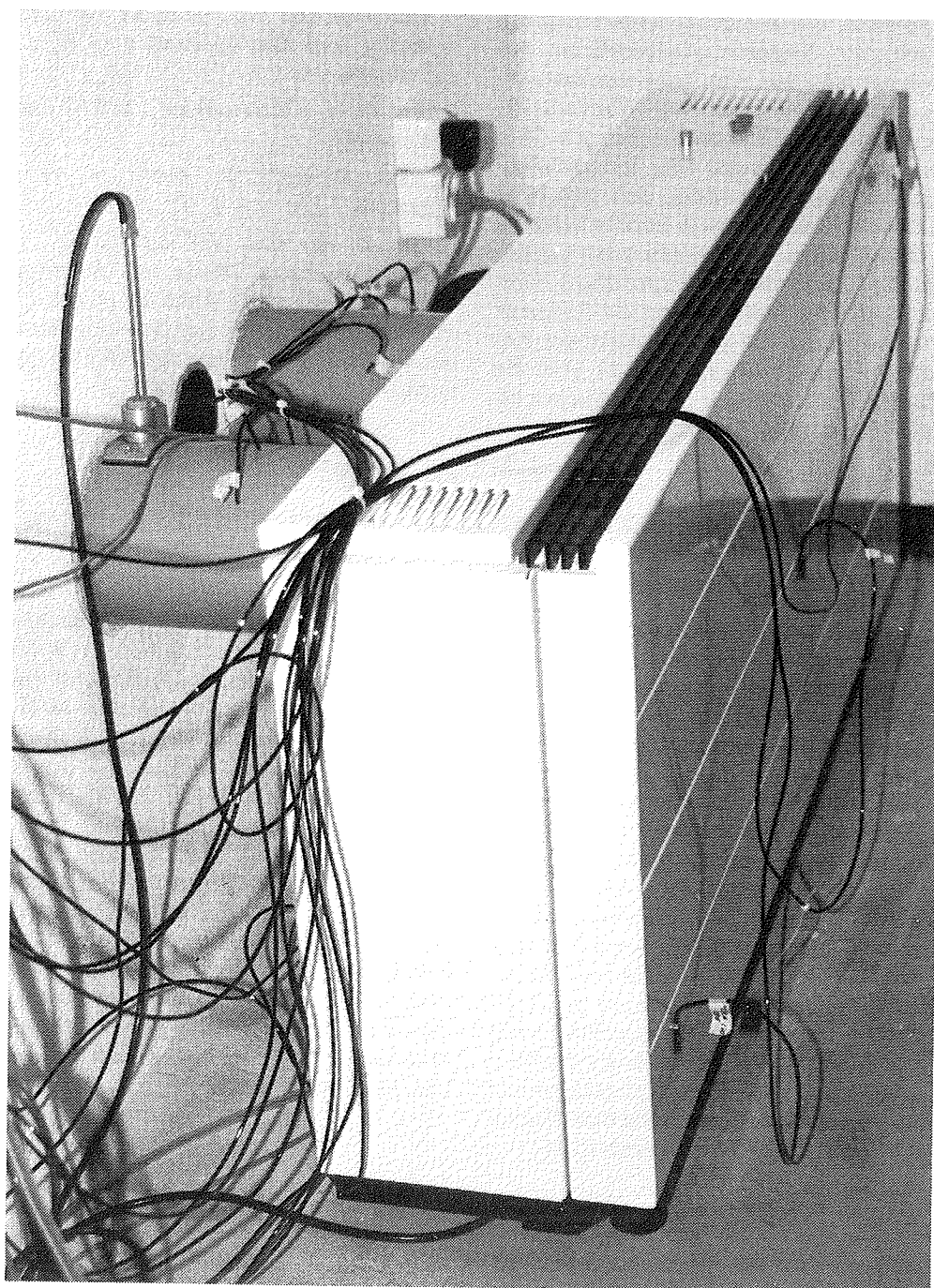
zeichnete Plattform für die internationale Zusammenarbeit dar. Wertvolle Impulse und Informationen sowie neue Kontakte konnten insbesondere durch den Besuch des Programmleiters anlässlich des *Executive Committee* Treffens des IEA-Hochtemperatur-Supraleiter-Programms im *Argonne National Laboratory* nahe Chicago, USA gewonnen werden [15].

Zur Zeit laufen konkrete Abklärungen und Vorbereitungen für die aktive Teilnahme im Projekt *Energy Efficient Motors and Drives*, welches im Rahmen des EU-SAVE-II-Programms initiiert wurde.

UMGEBUNGS- UND ABWÄRME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Martin Zogg



Einzelraumwärmepumpe

Messungen an einer im Auftrag des BEW entwickelten "Heizkörperwärmepumpe" zum Ersatz von Einzelraum-Elektrospeicheröfen mit einer Energieeinsparung von rund 50%.

Programmübersicht und Programmziele

Das Forschungsprogramm "Umgebungs- und Abwärme, 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 gesamten Endenergiebedarfs der Schweiz werden für diese Wärmeanwendungen benötigt. Dieses Forschungsprogramm möchte die Wissenslücken schliessen, um in Zukunft einen wesentlich **höheren Anteil der Niedertemperaturwärme aus Umgebungswärme oder aus Abwärme gewinnen** zu können. Durch die Kombination von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen mit Elektrowärmepumpen aber auch mit Gasmotorwärmepumpen oder fortgeschrittenen Absorptionswärmepumpen lassen sich gegenüber den üblichen Öl- und Gasheizkesseln **bereits heute 30 bis 50% an Brennstoffen zur Raumheizung einsparen** und damit die **CO₂ Emission entsprechend reduzieren** [27, 28, 29]. Zur Verbesserung der Effizienz und der Betriebssicherheit und zur Reduktion der Kosten der genannten Systeme wurden im Jahr 1996 **die folgenden Hauptziele** verfolgt und im wesentlichen bis zu den geplanten Etappenzielen erreicht:

- **Verlässlichere Dimensionierung** von Verdampfern, Kondensatoren, Erdregistern und Rotationsregeneratoren,
- **Effizienzerhöhung und Kostenreduktion** von Heizsystemen mit Wärmepumpen (WP), und Wärme-Kraft-Kopplung (WKK), Blockheizkraftwerk (BHKW),
- Entwickeln einer **Kurztestmethode** für WP,
- Validieren und Verbessern der Werkzeuge zur **Auslegung und Optimierung** von WP- und WKK-Systemen,
- Realisieren **alternativer WP- und BHKW-Konzepte**,
- Weiterentwickeln der Methoden zur **Prozessintegration**.

Leider konnte das Vorhaben einer **dynamischen Messmethode** zum Testen von Wärmepumpen noch nicht gestartet werden. Auch die geplante Entwicklung des Funktionsmusters eines **Heizkessels mit integrierter Absorptionswärmepumpe AWP** konnte noch nicht in Angriff genommen werden.

Durchgeführte Forschungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

WÄRMEQUELLEN UND WÄRMEÜBERTRAGUNG

Erdregister sind eine bisher wenig untersuchte Möglichkeit zum Erhöhen der Jahresarbeitszahl monovalenter Luft-Wasser-Wärmepumpen. Die in die Erde verlegten Rohre dienen im Winterbetrieb zum **Vorwärmen der Ansaugluft einer Wärmepumpe**. Die Computersimulation ergab Verbesserungen der Wärmepumpenjahresarbeitszahl bis zu 10% [11]. Der grosse Nutzen liegt bei Gebäuden mit kontrollierter Lüftung und Kühlbedarf in einer Steigerung der Kühlwirkung der Erdregister im Sommer. Für die Prüfung **regenerativer Luft/Luft-Wärmeübertrager** mit Sorptionsmittelbeschichtung zur Wärmerückgewinnung aus Abluft wurde ein neuer Prüfstand ausgelegt, aufgebaut und in Betrieb genommen [10]. Durch vereinfachende physikalische Modelle wurde versucht, den Messaufwand minimal zu halten. Zur praktischen Durchführung der Messungen wurde ein neues Prozedere vorgeschlagen und an rotierenden Regeneratoren erprobt. Die neue Testanlage fand in der Praxis bereits ein sehr gutes Echo.

Der rasche Ausstieg aus den ozonschichtschädigenden chlorierten Kältemitteln erfordert das Bereitstellen entsprechender Beziehungen für die Auslegung von Verdampfern für Wärmepumpen und Kälteanlagen für alternative Kältemittel. Deshalb wurden experimentelle Untersuchungen zum **Verdampfen der Fluorkohlenwasserstoffe R134a, R404A und R407C** in glatten und strukturierten Rohren durchgeführt [13, 26]. Darauf aufbauend wurde ein neuer Berechnungsgang zur Bestimmung **lokaler Wärmeübergangskoeffizienten** bei der Verdampfung alternativer Kältemittel in glatten und strukturierten Rohren entwickelt. Beim thermodynamisch ineteressanten natürlichen Kältemittel Ammoniak sollen in einem neuen Vorhaben [14] Wissenslücken für die Berechnung des **Wärmeübergangs bei Mischungen aus Ammoniak und löslichen Schmierölen** geschlossen werden.

WÄRMEPUMPEN UND BLOCKHEIZKRAFTWERKE

Der bei den **Kältemitteln** für Neuanlagen bereits erfolgte Ausstieg aus den Fluorchlorkohlenstoffen und der bevorstehende Ausstieg aus den teilhalogenierten Kohlenwasserstoffen zwingt kurzfristig zur Anwendung von chlorfreien Fluorkohlenwasserstoffen FKW. In [7] wurde durch eine umfassende **Ökobilanz** untersucht, was man durch den **Übergang auf natürliche Kältemittel** wie Propan, Isobutan, Ammoniak und CO₂

für die Umwelt wirklich gewinnen wird. Als überraschendes Ergebnis ergab sich ein besseres Abschneiden des FKW R134a als allgemein angenommen wird. Offen bleiben bei den FKW allerdings heute noch ungenügend bekannte Langzeitwirkungen toxischer Abbauprodukte.

In [9] wurden Messmethoden zum Bestimmen der spezifischen elektrischen Arbeit und des Liefergrads

von **Kompressoren mit variabler Drehzahl** entwickelt. Trotz kleinerem Gesamtwirkungsgrad drehzahlvariabler Kompressoren ergeben diese um etwa 5% höhere Jahresarbeitszahlen als drehzahlkonstante Kompressoren. Der Bedarf an elektrischer Energie für elektrische Widerstandsheizungen ist beträchtlich. Er erreicht im Winterhalbjahr 11% des Bedarfs an elektrischer Energie! Zum Ersatz der Einzelraum-Elektrospeicheröfen wurde deshalb im Auftrag des BEW eine geräuscharme **Elektro-Einzelraum-Wärmepumpe** zur Marktreife entwickelt [24] (Titelbild). Nach den Schwierigkeiten bei der Entwicklung einer neuen **zweistufigen Wärmepumpe für speicherfreien, monovalenten Luft/Wasser-Betrieb** wurde ein neues Funktionsmuster gebaut [15]. Gegenüber einer entsprechenden einstufigen Ausführung wurden damit um ca. 14% höhere Leistungsziffern erreicht.

Die Kombination einer **Stirling-Antriebsmaschine** mit einer **Stirlingwärmepumpe** wurde als Variante mit zwei Freikolben und einem dazwischen geschalteten Resonanzrohr theoretisch und experimentell untersucht [16]. Die durchgeführten Versuche zeigten die Machbarkeit des Konzepts. Im Rahmen der energetischen Sanierung einer Grossüberbauung wurde eine alte Ölheizung durch ein neues Heizsystem mit einer Niedertemperaturwärmeverteilung und dezentralen Elektrowärmepumpen für die weitere Temperaturerhöhung ersetzt [1]. Als Novum wird die Niedertemperatur-nahwärmeversorgung mehrerer Bauten mit einer einstufigen **Wasser-Lithiumbromid-Absorptionswärmepumpe** (AWP) mit Grundwasser als Wärmequelle betrieben. Die Hochrechnung der Messwerte ergibt eine Energieeinsparung gegenüber der alten Heizung von rund 50%.

Die Erfahrungen mit Kleinwärmepumpen für den bivalenten Betrieb mit einem konventionellen Kessel zur Spitzendeckung zeigten, dass beide Apparate und die Steuerung in ein Gehäuse mit einfachen Anschlüssen integriert werden müssen. Diese als "**AWP-Kessel**" getaufte Kombination von Absorptionswärmepumpe, konventionellem Gaskessel und intelligenter Steuerung könnte **Nutzungsgrade von 125..130%** erbringen. Die in der Schweiz entwickelte Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP) erwies sich in Kombination mit einem Kleinkessel als technisch beste Lösung [20]. Vertragsverhandlungen mit potentiellen Herstellern der DAWP verzögerten unser Vorhaben. Mit der Vergabe der Exklusivherstellerrechte an eine Deutsche Firma ist eine neue Situation entstanden.

Schon bei geringer Änderung wichtiger Systemparameter stossen stationäre BHKW-Gasmotoren mit Dreiwegekatalysatoren eine Schadstoffmenge aus. Für eine

Verbesserung der bisherigen **Betriebs-Emissionsüberwachung** solcher **BHKW-Verbrennungsmotoren** werden zwei neue Betriebs-Emissionsüberwachungsmethoden untersucht: direkte Messung der Emissionen und Erfassen der Katalysatorfunktion über die darin erreichte Temperaturänderung. Mit der preiswerten Temperaturdifferenz-Methode können Fehlfunktionen der Anlage mit erhöhten Emissionen entdeckt werden. Die dauernde Einhaltung der rigorosen LRV-Grenzwerte kann aber nur mit der wesentlich teureren elektrochemischen Messmethode garantiert werden [4]. Zwei Hochschulen und zwei Industriefirmen entwickeln im Vorhaben "**Swiss-Motor**" einen emissionsarmen Gasmotor. Während an der EPF-Lausanne an Verbesserungen des Magermotorkonzepts gearbeitet wird [17], verfolgt die ETH-Zürich im Auftrag des FOGA und des BEW das Konzept einer massiven Abgasrückführung. Die Verbesserung des Magermotorkonzepts verspricht für den Motor aus schweizerischer Produktion bereits kurzfristig Chancen auf dem europäischen Markt.

Das Funktionsmuster eines neuen **Kleinmotors mit äusserer Verbrennung** ist für Machbarkeitsuntersuchungen im Bau [8]. Der neue Motor soll die Vorteile bekannter Motorentechnik mit den geringeren Schadstoffemissionen des Stirlingmotors mit äusserer Verbrennung verbinden. Ziel der laufenden Entwicklung eines **Mini-Blockheizkraftwerks mit Stirling-Freikolbenmotor und Lineargenerator** ist eine dezentrale Produktion von elektrischer Energie und Wärme (Leistungen elektrisch ca. 1 kW, thermisch ca. 4 kW). Dieses technisch interessante Projekt wird durch den NEFF, den PSEL, den FOGA und das BEW unterstützt. Im Rahmen der vom BEW finanzierten Entwicklung eines dynamischen Lastreglers wurde ein Funktionsmuster für Netz- und Inselbetrieb gebaut und erprobt [19]. Eine weitere Entwicklung eines **Miniblockheizkraftwerks** für den Einfamilienhausbereich mit einem neuen Leistungsregelungskonzept wird durch den NEFF, den FOGA und den Kanton Bern unterstützt.

Gegen diese Kleinblockheizkraftwerke gibt es wegen ihres zu kleinen elektrischen Wirkungsgrades [28] oder eines zu hohen Wartungsaufwandes pro Leistungseinheit allerdings grundsätzliche Bedenken [29]. Mit keramischen Brennstoffzellen wird sich eine dezentrale Wärme-Kraft-Kopplung erstmals auch in kleinen Einheiten mit einem hohen elektrischen Wirkungsgrad realisieren lassen. In [22] wurde deshalb die **Nutzung der Abgaswärme von Kleinbrennstoffzellenaggregaten** in Gas-Wandthermen zur Raumheizung untersucht.

AUSLEGUNG, SYSTEMOPTIMIERUNG UND DIVERSE

In [3] wurde ein neues Berechnungsverfahren für mit Luft quer angeströmte **Lamellenrohr-Einspritzverdampfer** für reine Kältemittel und Kältemittel / Schmierölgemisch erarbeitet und programmiert. Die im Auftrag des BEW entwickelten **PC-Programme** zur Auslegung und Optimierung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen **WP-Calc** und von Blockheizkraftwer-

ken **WKK-Calc** sowie das Wärmepumpen-Simulationsprogramm **YUM** werden von Planern in der Praxis bereits als Standardwerkzeuge eingesetzt. Sie wurden deshalb in einer vergleichenden Validierung zur Erfassung der Berechnungsunsicherheiten und der sinnvollen Einsatzgrenzen überprüft [5]. Für **Niedrigenergiehäuser** mit einer Niedrigtemperatur-Fussbodenheizung

wurden anhand von detaillierten Computersimulationen des Gesamtsystems Wärmequelle (Luft, Erdwärmesonde), Wärmepumpe, Regelung, Wärmeverteilsystem, Gebäude (Reiheneinfamilienhaus in vorgefertigter Holzbauweise) und Warmwasserbereitung Lösungen für **kostengünstige und effiziente Wärmepumpenheizungen** aufgezeigt [12]. In einer nächsten Phase ist eine detaillierte experimentelle Verifikation der meistversprechenden Varianten vorgesehen.

Die Wärmepumpe ist nur eine wichtige Komponente im Gesamtsystem Wärmequelle – Wärmepumpe – Wärmespeicher – hydraulisches Wärmeverteilsystem – Gebäude – Regelung. Für Betriebsoptimierungen, Abnahmeversuche und einen Vergleich mit den Planungsdaten muss das reale Gesamtsystem im tatsächlichen Betrieb erfasst werden. Dies ist bisher nur mit aufwendigen Messungen möglich. Mit dem neuen Forschungsvorhaben **Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen** [21] wird deshalb in einer Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie ein Versuch unternommen, von den Ergebnissen der modernen Systemanalyse zur Reduktion des Messaufwands mit Hilfe eines hinreichend genauen mathematischen Modells zu profitieren. Die Instandhaltungskosten erreichen bei Blockheizkraftwerken einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten. Sie können tief gehalten werden, wenn dank einer Erfassung des Abnützungs- oder Ver-

schmutzungsverlaufs und einer zuverlässigen Voraussage der noch zu erwartenden Lebensdauer kritischer Komponenten die Instandsetzungsarbeiten erst zur notwendigen Zeit durchgeführt werden. Mit diesem Ziel wurde eine **neue Methode zur Zustandserfassung von BHKW-Wärmetauschern** zur Nutzung der Rauchgaswärme erarbeitet [6].

In der schweizerischen Chemie- und Lebensmittelindustrie wird häufig in diskontinuierlichen Prozessen produziert. Deshalb wird versucht, ein systematisches Vorgehen zur **optimalen energetischen Gestaltung diskontinuierlicher Prozesse** zu entwickeln. In einer laufenden Studie [18] wurde als erste Etappe eine vergleichende Literaturrecherche über die energetische Integration von Batch-Prozessen durchgeführt. Als energiesparende Möglichkeit zur Raumkühlung ist die Verdunstungskühlung allgemein bekannt. Ihr Effekt ist um so grösser, je trockener die Luft vor dem Befeuchten ist. Bei der **Sorptions-Verdunstungskühlung** wird die Luft vor der adiabaten Verdunstungskühlung durch geeignete Sorptionsmittel entfeuchtet. Deren Regeneration erfordert eine Wärmezufuhr im Temperaturbereich von 60 °C bis 300 °C. Falls z.B. Abwärme oder Solarwärme zur Verfügung steht, ist die Sorptions-Verdunstungskühlung für die Raumklimatisierung auch bei uns eine interessante Alternative [2].

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Der Forschungsbereich *Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)* wurde durch den NEFF nochmals kräftig unterstützt. Mit seinen Nachfolgefonds, dem **FOGA** (Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie) und dem **PSEL** (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft) wurden die Forschungsanstrengungen koordiniert: Mini-Blockheizkraftwerk in der Form eines Freikolben-Stirling-Generators ([19], NEFF, PSEL, FOGA, BEW), Fuzzy-Regelung von Wärmepumpen (PSEL), Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss (PSEL, BEW), Swiss Motor ([17], FOGA, BEW), Miniblockheizkraftwerk mit Verbrennungsmotor (NEFF, FOGA), kontrollierte Wohnungslüftung mit Wärmepumpe (PSEL). Im Rahmen der **FWS** (Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz) arbeiten Branchenverbände von Planern und Installateuren, Wärmepumpenhersteller, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung effizienter Wärmepumpenheizungsanlagen zusammen. Zwischen der FWS und den entsprechenden Organisationen in Deutschland und Österreich finden regelmässige Dreiländertreffen statt. Im Rahmen des Richtlinienwerks des Vereins Deutscher Ingenieure wird am Entwurf der **VDI-Richtlinie 4640 zur thermische Nutzung des Untergrundes** gearbeitet. Im entsprechenden Ausschuss kann die Schweiz ihre Interessen durch einen Delegierten wahrnehmen.

Die **internationale Zusammenarbeit** fand im Wärmepumpenbereich aber auch dieses Jahr in erster Linie über die schweizerische Beteiligung am **IEA Heat**

Pump Programme HPP statt. Das Projekt **Heat Pump Centre** informiert über die Ergebnisse der HPP-Projekte, internationale Fortschritte der Wärmepumpentechnologie und Marktentwicklungen in den Mitgliedsländern. Näheres in [30].

Innerhalb der schweizerischen Arbeitsgruppe fand auch ein reger nationaler Informations- und Erfahrungsaustausch statt. Zum Projekt **Compression Systems with Natural Working Fluids** hat die Schweiz die Studie zur Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel [7] beigetragen. Im Zusammenhang mit der Entwicklung der Heizkörperwärmepumpe [24] trat die Schweiz 1996 dem Projekt **Heat pumps for single room applications** bei. Im Sept. 1996 führte das HPP in Toronto die **5. IEA-Konferenz zur Wärmepumpentechnologie** durch. Sie gab eine gute Übersicht zum Stand von Wärmepumpenheizsystemen [25]. Einen stichwortartigen Führer zu den Tagungsunterlagen findet man in [29]. Im Bereich der **Prozessintegration** erfolgte die internationale Zusammenarbeit im Rahmen des ersten Projektes des **IEA-Implementing Agreement on Process Integration** mit den folgenden Zielen: Erfassen der Industriebedürfnisse, Übersicht über die vorhandenen und die sich in Entwicklung befindenden Methoden sowie Ausarbeiten einer Strategie zur weiteren Entwicklung der Methoden der Prozessintegration. Die schweizerische Arbeitsgruppe ermöglichte auch einen nationalen Gedankenaustausch zu diesem in der Schweiz leider noch wenig bekannten Gebiet.

Transfer in die Praxis

Da an der Mehrheit der ohnehin sehr anwendungsnahe Projektarbeiten private Firmen beteiligt sind, ist die direkte **Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft sehr eng**. Im Berichtsjahr konnten weitere gemeinsame Hochschul- und Industrieprojekte [12, 19, 21] gestartet werden. Die abgeschlossenen Forschungsarbeiten sind eine **gute Grundlage für eine industrielle Weiterentwicklung zu neuen Produkten** [16, 20, 22], dienen einer **besseren Auslegung** [3, 5, 11, 13], ermöglichen einen **experimentellen Vergleich diverser Produkte** [10, 9], können zur **Planung effizienterer und kostengünstiger Wärmepumpenheizsysteme** eingesetzt werden [1, 12], dienen der Entscheidung über die **Wahl ökologisch vertretbarer Kältemittel** [7] und ermöglichen einen **optimalen Betrieb von Anlagen** mit Wärme-Kraft-Kopplung und Wärmepumpen [6, 23]. Neben Publikationen der Projektleiter und Kurzfassungen der Projektergebnisse durch den Programmleiter in den einschlägigen Fachzeitschriften helfen zahlreiche P+D-Projekte, das in der Forschung Erarbeitete in zuverlässig funktionierende Anlagen umzusetzen.

Im Mai 1996 wurde an der HTL-Burgdorf die gut besuchte **3. UAW-Tagung** mit dem Thema "**Neue Technologien für Kleinwärmepumpen und Kleinblockheizkraftwerke**" durchgeführt [27, 28]. Dabei wurden Lösungen dieses Forschungsprogramms vorgestellt und der Frage nachgegangen, ob das Ziel eines Gesamtnut-

zungsgrads um 150% auch mit Kleinsystemen erreichbar sei. Die von der FWS erstmals organisierte **Wärmepumpen Expo 96** (Nov.96 in Bern) bot eine ausgezeichnete Gelegenheit, die Vorteile und Möglichkeiten der Wärmepumpenheizung einer grossen Besucherzahl zu zeigen. Einen breiten Kreis erreichte auch die VAB-Informationsveranstaltung **Heizungsmarkt im Umbruch** (Nov.96 in Baden). Das Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss leistet einen erheblichen Beitrag zur Sicherung der Wärmepumpenqualität und zur Erhöhung der Effizienz der im Handel angebotenen Wärmepumpen. Im Juni 1996 führte das Zentrum an der Ingenieurschule Winterthur eine **Erfahrungstagung** durch.

Um den Einsatz natürlicher Kältemittel zu erleichtern, bereitet ein Arbeitsausschuss mit Vertretern aus der Kälte- und der Wärmepumpentechnik den Entwurf zu einer **neuen Schweizer Norm (SN 253 130)** vor. Während der Ausbildungsbedarf für Planer mit 25 RAVEL-Kursen bis Ende 1995 einigermassen abgedeckt werden konnte, besteht bei der Schulung der Installateure noch ein erheblicher Nachholbedarf. Im Rahmen des Aktionsprogramms **Energie 2000** hat das BEW deshalb mit den Verbänden SSIV, VSEI und VSHL ein aktuelles **Weiterbildungsangebot für die Haustechnikbranche** realisiert. 1996 fand noch ein RAVEL-Kurs zum Thema "**Abwärmenutzung in industriellen Systemen**" statt.

Ausblick auf 1997

Im Jahr 1997 wird die Realisierung des UAW-Konzepts 96/99 fortgesetzt, da sich an der Aktualität der Wärmepumpen- und Wärme-Kraft-Kopplungs-Technologie nichts geändert hat. Auch die für 1997 geplanten Forschungsarbeiten dienen in erster Linie dem Ziel, die **Effizienz** und die **Zuverlässigkeit** solcher Systeme zu **erhöhen**, deren **Preis zu senken** und den Weg für die Verwendung **natürlicher Kältemittel** zu ebnen. Im wesentlichen sind für 1997 die folgenden Beiträge vorgesehen: Erarbeiten eines Berechnungsmoduls zum Erfassen von Erdwärmesonden als Wärmequelle für die Simulation von Heizungssystemen mit Wärmepumpen, Entwickeln verlässlicherer Berechnungsgleichungen für die Verdampfung von Arbeitsmittel-Schmieröl-Gemischen, Voruntersuchungen für eine Ammoniak-Kleinwärmepumpe, Weiterentwickeln einer zweistufigen Luft/Wasser-Elektrowärmepumpe, Entwickeln eines Wärmepumpenmoduls hoher Effizienz für den Sanierungsmarkt, Erproben eines kosten-

günstigen Niedrigtemperatur-Wärmepumpenheizungssystems, Entwickeln und Erproben einer Messmethode zum Testen des dynamischen Verhaltens von Wärmepumpen, Ausarbeiten einer Kurztestmethode für Wärmepumpen, Entwickeln eines besonders emissionsarmen Gasmotors für Blockheizkraftwerke und Reduktion des Energiebedarfs industrieller Prozesse durch Systemoptimierung.

Im Rahmen dieser Ziele und unserer beschränkten finanziellen Mittel wird die Priorität auf jene Forschungsarbeiten gelegt, die zu einer verbesserten Planung, einer besseren Systemoptimierung oder mit grosser Wahrscheinlichkeit zu **vermarktbareren Produkten mit hohem Energiesparpotential** führen. Dabei werden wir im Sinne guter Umsetzungschancen weiterhin versuchen, Privatfirmen in einem möglichst frühen Stadium der Entwicklung zur Mitwirkung zu gewinnen.

Projets P+D

Fabrice Rognon, chef du programme P+D

PROJETS P+D DE CHALEUR AMBIANTE

Durant l'année écoulée, nous avons enregistré 12 demandes nouvelles, 10 ont été acceptées et 2 refusées. Le faible taux de rejet s'explique par la très bonne qualité

des requêtes. Nous constatons une baisse sensible du nombre de projets d'une puissance thermique supérieure à 50kW, ce qui reflète l'état du marché.

Les rapports finaux suivant ont été approuvés et sont disponibles auprès d'ENET:

- Abwasser-Wärmepumpe im Tempelareal der Seiler-Hotels in Zermatt
- Bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe der Steiner-Schule
- Bivalente Luft/Wasser-Wärmepumpe der Heizzentrale Steinmatten in Rapperswil
- Gasmotor-Wärmepumpe mit Aarewasser in Hinterkappelen
- Pompes à chaleur sur eau de tunnel (Furka, Oberwald, Rapport intermédiaire)

Les 32 projets en cours se répartissent de la manière suivante:

Sources de chaleur

air	sondes géothermiques	nappe phréatique	tunnel (train)	rivière, lac
13	10	8	1	0

Systèmes principaux

Type	CCF+PAC	PAC air/eau monovalente	PAC air/eau monovalente avec appoint	PAC eau ou saumure/eau avec appoint
Nombre	5	7	5	6
dont CAD	5	0	0	4

Puissance thermique installée (PAC seule ou CCF + PAC)

Les données financières et énergétiques de 29 projets sont saisies dans la banque de données d'évaluation des programmes P+D.

Dans le tableau suivant, nous avons calculé les coûts spécifiques en fonction de la puissance thermique de la PAC ou de la combinaison CCF+PAC, sans tenir compte des subventions.

Puissance en kW	<30	30-100	100-500	>500
Nombre	12	6	7	4
Prix de revient moyen en ct/kWh	47	37	25	14
Prix minimum(ct/kWh)	14	27	16	3

A l'avenir, l'accent sera porté sur: l'assainissement de chauffages existants, l'utilisation de fluides frigorigènes neutres pour l'environnement, l'amélioration du coefficient de performance, l'abaissement des coûts. Les installations pilotes restent prioritaires.

PROJETS P+D COUPLAGE CHALEUR-FORCE

Les rapports finaux suivant ont été approuvés et sont disponibles auprès d'ENET:

- BHKW mit Deponiegas
- Messtechnische Betriebsauswertung BHKW-Verbund Siloah

Durant l'année écoulée, nous avons enregistré 2 demandes nouvelles qui ont été acceptées.

Les 9 projets en cours se répartissent de la manière suivante selon le combustible utilisé: 5 moteurs au gaz naturel, 1 au propane, 2 au gaz de décharges contrôlées, 1 au diesel (mazout e.l.), pas de Stirling, pas de

pile à combustible. Dans un seul cas la chaleur n'est pas utilisée.

A l'avenir, l'accent sera porté sur les installations pilotes: priorité absolue est donnée aux technologies nouvelles et aux carburants renouvelables.

Liste der Projekte

- [1] P. Krüsi, AMENA, *Schlieren: Messprojekt "Im Bilander" Brugg*. (SB, ENET-Nr. 9106660)
- [2] J.-P. Borel, Cully: *Entwicklungsstand der Sorptionsklimatisierung*, (SB, ENET-Nr. 9400721)
- [3] M.R. Conde, Zürich: *Fortgeschrittene Verdampfersimulationsmodelle*. (SB, ENET-Nr.9300221)
- [4] F. Kühnis, Hp. Eicher, EICHER+PAULI, *Liestal & D.E. Maurer, U.AMMANN, Langenthal: Betriebsüberwachung von Dreiwegekatalysatoren*. (ZB, ENET-Nr. 9553311) und (JB, ENET-Nr. 9553311)
- [5] G. Zweifel et al., EMPA-Dübendorf & M. Stalder, EICHER+PAULI, *Liestal & Th. Baumgartner, Dübendorf & Th. Afjei, INFEL, Zürich & A. Huber, HUBER ENERGIE-TECHNIK, Zürich: Validierung der Computerprogramme YUM WP/Holz, WP-Calc und WKK-Calc*. (SB, ENET-Nr. 9554409)
- [6] P. Neuenschwander, LES/ETH-Zürich: *Überwachung und Beurteilung der Schadstoffemission bei Blockheizkraftwerken*, (ZB, ENET-Nr. 9300571) • *Expertensystem BHKW - Abnutzungsprädiktion und Überwachung von Wärmetauschern*. (SB, ENET-Nr. 9300571)
- [7] T. Weibel, LES / ETH-Zürich: *Vergleichende Umweltrelevanz des Einsatzes alternativer Kältemittel*. (SB, ENET-Artikel 30465)
- [8] P.-A. Jeandupeux, ETS-Le Locle: *Moteur à combustion externe*. (JB, ENET-Nr. 9553848)
- [9] R. Klaiber et al., HTL-Buchs: *Messungen an drehzahlvariierten Kompressoren*. (SB, ENET-Nr.9200871)
- [10] P.W. Egolf et al., HTL-Horw: *Wärmerückgewinnung durch regenerative Luft/Luft-Wärmeübertrager*. (SB, ENET-Nr. 9400231)
- [11] A. Huber et al., HUBER ENERGIE-TECHNIK, Zürich: *Luftvorwärmung für Wärmepumpen in Erdregistern*. (SB, ENET-Nr. 9554499)
- [12] Th. Afjei, D. Wittwer, INFEL, Zürich & W. Betschart, M. Wetter, G. Zweifel, HTL-Horw & R. Bircher, BIRCHER+KELLER, Sissach & H.P. Geering, S. Ginsburg, IMRT / ETH-Zürich & W. Hässig, BASLER + HOFMANN, Zürich: *Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe - Phase 1*. (SB, ENET-Nr.9655701)
- [13] O. Zürcher et al., LENI/EPF-Lausanne: *Evaporation du réfrigérant HFC 407C sur des tubes lisses ou à surface améliorée*. (SB, ENET-Nr.9553972)
- [14] O. Zürcher, LENI/EPF-Lausanne: *Evaporation de mélanges d'ammoniac et d'huile dans des tubes Evaporation de l'ammoniac dans des tubes*. (JB, ENET-Nr. 9656540)
- [15] E. Nidegger, LENI/EPF-Lausanne: *Pompe à chaleur biétagée à haute performance*. (JB, ENET-Nr. 9400101)
- [16] J.P. Budliger et al., LENI/EPF-Lausanne: *Freikolben-Stirling-Wärmepumpe mit Resonanzrohr*. (SB, ENET-Nr. 9300631)
- [17] R. Röthlisberger et al., LENI/EPF-Lausanne: *Swiss Motor: Modification d'un moteur diesel pour le fonctionnement au gaz naturel en cogénération*. (ZB, ENET 9553707)
- [18] P. Krummenacher, LENI/EPF-Lausanne: *Intégration énergétique de procédés industriels discontinus*. (JB, ENET-Nr. 9655360)
- [19] H.P. Zumsteg, ÖKOZENTRUM, Langenbruck & E.T.Schönholzer, M. Hagen, HTL-Buchs: *Dynamischer Lastregler zu Stirling-Lineargenerator*. (ZB, ENET-Nr.9555021)
- [20] P. Renaud et al., PLANAIR, La Sagne & ELEKTROWATT, Zürich: *AWP-Kessel, Vorphase* (SB, ENET-Nr. 9553371)
- [21] G. Reiner, SULZER FRIOTHERM, Sempach & E. Shafai et al., IMRT/ETH-Zürich & H.U. Bruderer, SAURER THERMOTECNIK, Arbon & H.R. Gabathuler, H. Mayer, GABATHULER, Diessenhofen: *Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Phase 1*. (ZB, ENET-Nr. 9617822)
- [22] D. Lenel, SULZER INNOTECH, Winterthur: *Abwärmennutzung bei SOFC-Brennstoffzellensystemen für die Haustechnik*. (SB, ENET-Nr. 9656382)

(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden
 (ZB) Zwischenbericht vorhanden
 (SB) Schlussbericht vorhanden

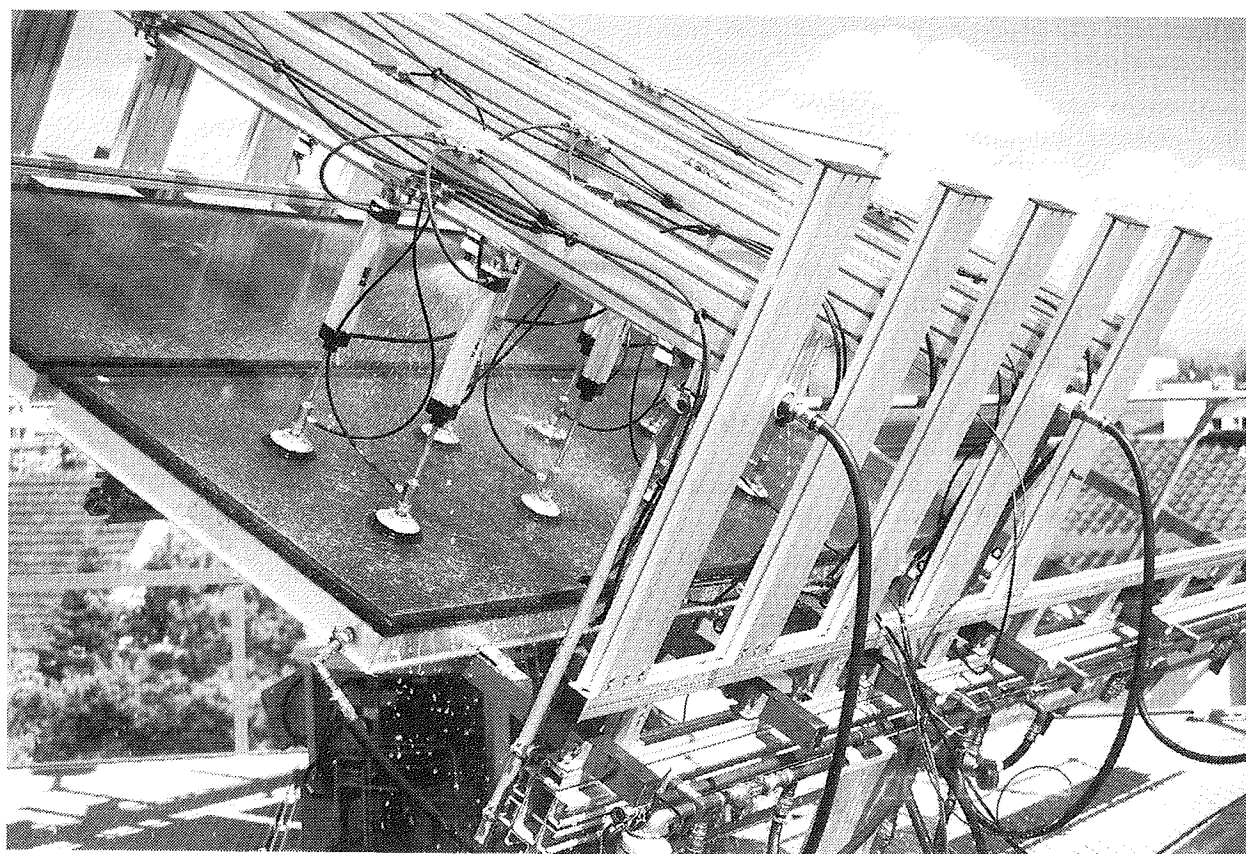
Referenzen

- [23] P. Neuenschwander: *Wärmetauscher-Überwachung durch Messen von Ein- und Ausgangsgrössen*, Dissertation 11576 der ETH, Zürich 1996, ENET-Nr.9300571.
- [24] W. Seidinger, F. Rognon: *Ersatz von Elektrowiderstandsheizungen*, Tagungsband der VAB- Informationsveranstaltung "Heizungsmarkt im Umbruch", INFEL, Postfach 8021, 8021 Zürich.
- [25] *Proceedings of the 5th International Energy Agency Conference on Heat Pumping Technologies*, Vol.1, Toronto 1996 (ISBN 0-660-16600-3), Vol.2, Toronto 1996 (ISBN 0-660-16601-1).
- [26] J.R. Thome: *Two-phase flow patterns of refrigerant-oil mixtures inside horizontal tubes*, Proceedings of the ASHRAE Summer Meeting, Juni 96, San Antonio, Texas (USA).
- [27] M. Zogg: *Kleinsysteme für die Raumheizung über 150% Nutzungsgrad ?*, Gas, Wasser, Abwasser 76(1996)3.
- [28] *Neue Technologien für Kleinwärmepumpen und Kleinblockheizkraftwerke*, Tagungsband, M. Zogg (Hrsg.), BEW 1996, ENET-Artikel 30456.
- [29] M. Zogg: Jahresübersicht 1996 zum Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW) - ausführliche Fassung, BEW 1997, ENET-Artikel 30593.
- [30] <http://www.HeatPumpCentre.org>

SOLAIRE ACTIF • CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 1996 du programme de recherche

Jean-Christophe Hadorn



Label de qualité du SPF pour capteurs solaires

Le microclimat intérieur d'un capteur pendant sa durée de vie est peu connu. Un banc d'essai a été mis au point au SPF Rapperswil pour tester en conditions accélérées l'effet mécanique à long terme du vent et l'influence des intempéries sur la qualité d'un capteur.

Introduction

Le programme de recherche en solaire thermique est marqué par la continuité des actions malgré la perte trop rapide de Pierre Bremer, le chef de programme de 1988 à 1995.

Suite à la réorganisation, le domaine de recherche "stockage de chaleur", autrefois rattaché au "solaire thermique", constitue désormais un programme autonome.

La définition détaillée des orientations du programme "solaire actif • chaleur" [34] pour la période 1996-1999 a été accomplie en concertation avec les experts suisses sur la base des principes directeurs de la CORE.

Le solaire thermique progresse en Suisse et la qualité de notre recherche appliquée, est dans l'ensemble bonne si on la compare aux travaux européens en la matière.

La recherche solaire thermique est volontairement proche du marché, afin de soutenir, en logistique, qualité et innovations, le développement des installations solaires en Suisse qui est un secteur privilégié du programme national Energie 2000.

La recherche de l'amélioration des absorbeurs solaires, en performance et abaissement des coûts, a été soutenue.

La qualité des capteurs solaires thermiques sur le marché augmente d'année en année suite aux travaux menés par le Laboratoire fédéral d'Héliotechnique, le SPF, *Solarenergie Prüf- und Forschungstelle* de l'école d'ingénieurs ITR de Rapperswil en relation constante avec les industriels suisses et étrangers. Le chauffe-eau solaire compact a pris un fort essor en 1996 grâce à la standardisation, facilitant ainsi le marketing, et grâce à la productivité accrue obtenue en favorisant le *low flow*, débit réduit dans les capteurs, et la stratification thermique dans la cuve de stockage (principes issus des recherches 1990-1996).

Les systèmes pour le chauffage et l'eau chaude de villas ou immeubles nécessitent dans l'ensemble encore une certaine standardisation, même si certains peuvent obtenir déjà de bons résultats à l'année. Le problème de l'investissement de départ important reste cependant un frein et l'innovation et la recherche sont nécessaires pour le lever.

Les grands systèmes (plus de 500 à 1'000 m²) qui permettent des économies d'échelle appréciables sont peu nombreux en Suisse, du fait de la méconnaissance des promoteurs et de la faiblesse du marché de la construction neuve.

Principaux axes du programme

1. L'augmentation de la performance énergétique des installations de toute taille, au moindre coût.

2. La qualité des composants permettant d'assurer la durabilité des installations (20 ans). Les composants d'une installation solaire sont les capteurs, le circuit primaire, le ou les échangeurs, le fluide caloporteur, la pompe, la ou les cuves de stockage, les armatures, le réglage et la régulation de l'ensemble, ainsi que la stratégie d'appoint.

3. Les solutions basées sur des absorbeurs non vitrés, dans la gamme des applications à 30-55 °C. Ces solutions pourraient apporter des réductions de coût et connaître moins de problèmes de durabilité en absence de surchauffe estivale.

Ces axes connexes supportent l'objectif central du programme: la diminution du coût du kWh solaire tout en garantissant la qualité et le bon fonctionnement des installations durant 15 à 20 ans.

Buts visés pour 1996

LOGISTIQUE

On cherche dans ce thème, à doter les professionnels du solaire thermique d'outil de planification à la pointe, permettant de faire rapidement de bons projets.

Il s'agissait pour 1996 de réviser et d'améliorer les deux logiciels METEONORM et POLYSUN qui connaissent un bon succès en Suisse et de définir le futur de ces outils.

COMPOSANTS

On cherche ici à doter le marché solaire de composants très performants, adaptés à la technique solaire, caractérisée par des faibles différences de température.

Le maintien et le développement de l'ensemble des procédures et installations de tests des capteurs solaires au SPF reste un des thèmes principaux du programme de recherche.

La participation suisse au groupe MSTC de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) concernant les

matériaux utilisés dans les capteurs solaires, la caractérisation et la mesure du climat intérieur des capteurs solaires étaient à organiser.

En 1996, il s'agissait aussi d'améliorer encore les performances de l'absorbeur suisse d'ESSA, seul absorbeur sélectif pouvant être utilisé sans couverture dans des applications extérieures, et de transférer à l'industrie la technologie d'absorbeur de nouvelle génération ABSORBEUR 2000, développée depuis 1990 dans une collaboration UNI Bâle - SPF.

SYSTÈMES

En matière de chauffe-eau solaires, on s'est intéressé aux tests court terme de systèmes au SPF, avec résultats extrapolés à l'année par simulation, et à mettre en place un projet sur les performances comparées de chauffe-eau compacts et les possibilités d'amélioration à l'école d'ingénieurs d'Yverdon. Les travaux à mener en matière de contrôle optimal d'installations solaires était également à repenser. La *régulation intelligente* est en effet un sujet de recherche à fort potentiel pour réduire la durée de mise en service d'une installation petite ou grande, améliorer son fonctionnement automatique, et permettre la détection de dysfonctionnements. Ces travaux pourraient débuter en 1997, en utilisant au mieux les résultats finaux du projet AIE *Dynamic Collector System Testing (90-96)*.

INSTALLATIONS INNOVANTES

L'analyse des deux premiers cycles de l'installation solaire de Saillon était attendue, tant pour le champ de 1'000 m² d'absorbeurs que pour le stockage saisonnier en aquifère et l'ensemble du système.

Dans l'optique de l'évaluation des absorbeurs comme moyen de captage solaire pour les applications domestiques, étaient également attendus les résultats d'une installation de préchauffage d'eau sanitaire de 77m² à Genève et du plancher solaire direct de Boudry.

Faisant suite aux travaux du projet CSIP [28], nous avons demandé au LENI de l'EPFL un projet détaillé de pilote de centrale électrothermosolaire susceptible d'être réalisée dès 1997, si le concept, à définir selon les résultats d'essai en laboratoire et en simulation, s'avèrait prometteur.

En matière de stockage de chaleur solaire, la mise au point d'une sonde de température permettant de mesurer le contenu énergétique d'un stock stratifié à des fins de régulation et de bilan était visée, ainsi qu'une revue par un bureau spécialisé en Finlande sur les systèmes de stockage envisageables à l'avenir.

La conclusion du projet GEOSER était également à l'ordre du jour.

Les résultats comparés de deux immeubles solaires de huit familles à Sevelen étaient attendus, étant donné que l'un des immeubles mesurés en 1995/1996 a montré un taux de couverture solaire de 64%, pratiquement une première mondiale pour un tel objet.

Enfin l'analyse d'un nouveau concept de maison solaire passive+active préfabriquée proposée par un industriel du bâtiment était envisagé pour orienter la construction d'un groupe de villas identiques.

Travaux effectués et résultats obtenus

LOGISTIQUE

Le logiciel **METEONORM** version 2.0 [1] développé par METEOTEST à Berne, fournit par interpolation pour toute commune de Suisse les irradiances solaires globales, directes et diffuses, mensuelles et annuelles, sur des plans quelconques et avec effet d'horizon. Les valeurs mensuelles de 96 stations européennes sont en outre accessibles. Il existe depuis 1995 et connaît un grand succès en Suisse pour les ingénieurs du bâtiment et les héliotechniciens. Il s'est agi de l'amélioration de l'interface du logiciel, de l'amélioration du modèle de rayonnement mensuel, et de l'introduction du modèle de ERBS pour le calcul du diffus avec les données DRY. METEOTEST en a profité pour améliorer encore l'interface utilisateur et ajouter cinq nouvelles stations étrangères (Stockholm, Warszawa, Praha, Beograd, Athina).

La situation juridique des données météorologiques suisses a été clarifiée entre l'OFEN, le SMA (propriétaire des données ANETZ de base) et l'EMPA (propriétaire des données remaniées DRY).

La version 2.1 est distribuée depuis novembre 1996 par NOVA Energie à Aarau (Fax 062 / 834 03 23) à un prix modique.

Afin de favoriser à long terme les produits solaires suisses à l'étranger, une version **METEONORM 3.0** internationale sera réalisée en 1997 sur CD-ROM avec une distribution mondiale.

Le logiciel de simulation des installations solaires **POLYSUN 1.0** est doté d'une interface conviviale qui le rend d'un usage aisé et rapide, mais limité aux installations de préparation d'eau chaude sanitaire. Compte tenu des 150 exemplaires vendus, le produit a été amélioré avec la prise en compte du chauffage d'habitation et la refonte complète du logiciel [2]. Le logiciel **HELIOS PC** de l'EMPA a été intégré à **POLYSUN 2.0** pour calculer la charge de chauffage de l'habitation (simulation horaire dynamique). Pour ne pas alourdir les données, une typologie de bâtiments est proposée à l'utilisateur (inerte/peu inerte, isolée fortement/normalement, etc.). **POLYSUN 2.0** est une réussite, qui utilise trois modules développés par la recherche suisse depuis près de 10 ans: **METEONORM** pour les données climatiques et les calculs d'irradiation sur plans quelconques, **SIWW** pour la simulation de l'installation solaire et **HELIOS** pour la demande en chauffage, ainsi que la base de données de tous les capteurs testés au SPF. Il s'agit d'un outil fédérateur qui peut évoluer selon notre vision à long terme, vers un véritable premier système-expert solaire. Le logiciel réécrit est plus rapide, plus sûr et fonctionne en réseau. Sa nouvelle structure interne le rend apte à servir de base à d'autres développements souhaitables et planifiés pour les années à venir, notamment dans la même optique stratégique que pour **METEONORM**, l'internatio-

nalisation. Des exercices de validation seront également entrepris.

Un cours d'introduction à POLYSUN 2.0 a été organisé au SPF le 6 septembre 1996 avec 40 participants.

COMPOSANTS

La phase 1 du projet ABSORBEUR 2000 est terminée. Il s'agissait de développer une nouvelle couche sélective, sur un nouvel absorbeur, avec des contraintes de poids, de qualité et de coût. Le procédé de fabrication devait en outre être peu ou pas polluant et autoriser la production en bande pour envisager des volumes annuels adaptés au marché européen voire mondiale. Ces objectifs ont été brillamment atteints. Un brevet européen détenu par l'OFEN protège l'invention de l'UNI Bâle associé au SPF.

Le **transfert de technologie du projet ABSORBEUR 2000** a été accompli par le SPF, précisant l'installation à plasma nécessaire, les coûts et un *business plan* [4]. Un test sur une chaîne de production semblable et louée chez un industriel suisse des couches minces a été positif: la couche est homogène sur échantillon représentatif d'un absorbeur réel. Des améliorations sont envisagées, encore faut-il trouver un partenaire industriel et financier susceptible de reprendre le brevet, ce qui pourrait être possible en acceptant la sortie de Suisse du savoir-faire acquis.

Le projet **Absorbeur AS+ d'ESSA** – seul industriel suisse à fabriquer, depuis 15 ans, un absorbeur sélectif en inox pouvant supporter d'être utilisé tel quel en extérieur – a débuté dans le but de tenter d'abaisser le coût du kWh solaire et d'éviter les surchauffes estivales. La recherche est ici en l'amélioration des caractéristiques optiques de la couche sélective par sélection de bains galvaniques et autres procédés liés (temps, température), sans utiliser de produits hautement toxiques, sans consommation d'énergie excessive et sans préjudice à une chaîne de production existante. La sélection du meilleur support de base possible est également discutée avec les fournisseurs mondiaux d'inox par l'industriel. Les résultats obtenus en 1996, après plus de 700 échantillons réalisés sont très bons: émissivité de 4.8% et absorption de 96% ont pu être obtenues. Le procédé d'ESSA est développé en laboratoire, les meilleurs échantillons obtenus sont envoyés pour tests de vieillissement accéléré au SPF. Le procédé mis au point devrait être adapté à la production en série en 1997 sans perturber le flux moyen d'absorbeurs nécessaire à la clientèle de l'entreprise [6].

Le **SPF** reconnu nationalement depuis 10 ans et de plus en plus coté internationalement, a poursuivi sa recherche de l'amélioration des matériaux et des composants du solaire thermique [5].

Les principaux résultats de 1996 sont:

- l'analyse des couvertures transparentes exposées depuis maintenant 11 ans a été faite et sera publiée sur CD-ROM. Le développement d'un verre solaire antisalissures et avec couche anti-reflet a été mené conjointement avec l'ISFH de Hannover et un industriel suisse et pourrait déboucher sur un produit nouveau,

D'autres cours suivront en 1997. La version 2.0 est distribuée depuis novembre 1996 par NOVA Energie.

- les caloporteurs commerciaux à base de glycol sont analysés régulièrement. Les tests de 7 fluides caloporteurs nouveaux, capables de résister sans dégradation aux hautes températures (200 °C) ont été menés avec l'EMPA [23]. Un seul produit paraît adapté pour tenir dans les conditions extrêmes d'un capteur solaire vitré, sa compatibilité avec les matériaux non métalliques d'un circuit solaire étant encore à étudier,
- le nombre de tests de capteurs solaires réalisés dans l'année s'est stabilisé, après la forte croissance de 1994 et 1995. Plus de prototypes soumis par les fabricants sont testés qui ne peuvent faire l'objet de publications (50 tests en 1996, dont 16 publiables),
- la préparation de la publication des tests de capteurs sur CD-ROM a débuté,
- le SPF a été très sollicité par les fabricants nationaux et internationaux pour des conseils d'amélioration de capteurs,
- l'électronique des installations de mesures (bancs suiveurs entièrement automatisés) a été renouvelée,
- un banc d'essai d'absorbeurs nus avec effet de vent latéral a été monté, pour compléter les recherches faites sur les systèmes avec de tels capteurs (Sierre, Saillon, Servette, Boudry, Plan-les-Ouates). Un absorbeur a été mesuré jusqu'à 8.2 m/s de vent. Dès 2 m/s environ, on observe une chute importante des performances,
- le SPF participe très activement à la définition des normes européennes en matière de tests de capteurs et systèmes complets, l'exposé de synthèse de l'état actuel demandée à U. Frei à EUROSUN'96 a été remarquée internationalement,
- les 4 installations de tests en parallèle de systèmes complets pour l'eau chaude sanitaire ont été renforcées et équipées d'un nouveau système d'acquisition des données plus rapide et plus précis, répondant à la norme européenne,
- la procédure complète de tests de 1 à 2 semaines d'un chauffe-eau solaire a été utilisée sur 10 systèmes commerciaux nouveaux dans le cadre d'un concours de chauffe-eau solaire réalisé en liaison avec Energie 2000. Les résultats sont extrapolés à l'année par simulation avec un modèle TRNSYS de chaque installation, dont les paramètres sont obtenus par *dynamic fitting*.

Ce dernier point est une belle réussite du SPF: le joint entre mesures à court terme et simulation dynamique pour extrapoler les résultats à l'année a été réalisé, et ce même pour les chauffe-eau low-flow à stratification, jamais encore simulés avec les modules TRNSYS. Une coopération de l'ITW de Stuttgart a été ici fructueuse. Le SPF utilise désormais TRNSYS pour les simulations

détaillées, en complément de POLYSUN. Le savoir-faire a été acquis en 1996,

- les résultats d'une campagne de mesures annuelles sur de nombreux SOLKIT seront prochainement disponibles [24]. Ils montrent le bon fonctionnement en général du chauffe-eau compact placé dans diverses configurations d'usage et d'appoint, avec des parts solaires allant de 60 à 100 %,
- la mise au point d'un test dynamique des stocks adapté au solaire s'est révélée nécessaire. Elle reste à faire en liaison internationale,
- un label de qualité des capteurs solaires a été mis au point en conformité technique avec les normes européennes et juridiques suisses. Depuis fin 1996, le label a pu être attribué à 6 capteurs.

Les tests de systèmes ont en outre montré que des certificats de qualité des systèmes complets sont nécessaires

SYSTÈMES

Les travaux 1996 concernant le projet **GEOSER** consistent en un ouvrage final de synthèse des résultats obtenus les années précédentes. Le bilan des différentes stratégies de stockage d'excédents solaires captés par une serre agricole (économie d'énergie de 21% avec cuve à eau, de 12% avec stockage en terre) est établi. Le dépouillement des données de mesures a permis de valider le modèle de simulation des échanges thermiques tuyaux enterrés-sol de la serre, analogue à un hypocauste, développé pour TRNSYS par le CUEPE. Le modèle est ensuite exploité pour l'analyse paramétrique et la recherche de stratégies optimales par SORANE. Deux colloques sur la gestion thermique des serres horticoles ont été organisés avec l'aide d'ENET à Conthey et à Wädenswil pour 100 personnes. Le rapport final comprenant des aspects scientifiques et économiques est attendu [7].

A l'EINEV d'Yverdon, le banc de mesures permettant de comparer sur un an complet les performances de deux chauffe-eau solaires du marché dans des conditions identiques, et d'un prototype a été nouvellement mis en place durant l'été 1996. Il permettra aussi une recherche d'amélioration de systèmes et de réduction des coûts [29], d'optimisation du flux dans les absorbeurs à coussins et de régulation par contrôle optimal que nous débiterons dans un autre projet [8].

La méthode KTSA (*Kurztest-Methode für Sonnenenergieanlagen*) avait permis la définition de procédures d'identification de paramètres et le développement d'un logiciel de calage dynamique (DF) travaillant avec TRNSYS. Ces outils sont désormais utilisés quasiment quotidiennement par l'ITW Stuttgart et le SPF Rapperswil. Le potentiel des méthodes avancées de contrôle optimal ne nous paraît cependant pas totalement utilisé en matière de solaire thermique pour la **supervision automatique des installations**. Une expertise préliminaire confiée à l'Institut d'Automatique de l'EPFL en 1996 l'a confirmé et nous envisageons une suite sous la forme d'une collaboration EPFL-EINEV-Industriel solaire pour rechercher un système de "réglage intelli-

gent" pour éliminer des produits de médiocre facture ou peu durables, préjudiciables à toute l'industrie solaire à moyen terme.

Une certification européenne du laboratoire de tests des capteurs du SPF est en cours.

Des travaux prospectifs sur un nouveau circulateur solaire ont en outre été menés.

La collaboration internationale dans le groupe de travail de l'AIE **MSTC** *Materials for Solar Thermal Collectors* a été définie. Le SPF dirige une activité consacrée à la durabilité des revêtements d'absorbeurs et au microclimat interne des capteurs. Un projet de norme sur les tests de vieillissement accéléré des capteurs a été réalisé. Un nouveau banc test des effets du vent et de la pluie sur les capteurs vitrés a été construit et mis en usage [3].

gent" dans un premier temps limité à un type de chauffe-eau solaire [9].

Le projet AIE *Advanced Active Solar Systems* [11] s'est terminé [25]. Il sert de base scientifique pour l'élaboration des normes ISO et CEN sur la standardisation des méthodes de tests de composants et de systèmes: ces résultats sont utilisés tous les jours au SPF sur les bancs d'essai, et pour la conception des chauffe-eau solaires compacts, très performants. Il y a donc ici excellente synergie entre l'international et le national.

Dans le domaine du stockage de chaleur, deux projets débutés avant 1996 ont été achevés cette année.

Le projet de l'ETS Burgdorf a pour but de caractériser le contenu énergétique d'un stock stratifié avec une seule sonde de mesures capable de fournir une **température moyenne sur la verticale d'un stock**. Une première sonde de 4 points de mesures seulement, au lieu d'un continuum suite à une erreur du fabricant a été testée mais n'a pu remplir totalement le rôle prévu. Un démontage de la sonde a montré après coup l'erreur, de même pour une deuxième sonde non active sur toute la longueur voulue. Une nouvelle sonde de 110 cm de longueur a été réalisée conformément au cahier des charges durant l'automne 1996 et les essais ont été répétés en un temps record. La sonde correcte reproduit parfaitement la moyenne de 49 températures d'un stock de 300 l chargé et déchargé de diverses manières. La constante de réaction de la sonde est acceptable (50 s avec un remplissage de poudre de Mg). Charge par étape, charge stratifiée, charge par échangeur interne avec et sans re-circulation ont été étudiées. L'homogénéité des températures dans des plans horizontaux est toujours très bonne, de sorte que la position de la sonde unique dans le plan horizontal a peu d'importance. D'autres conclusions intéressantes sur le développement de la stratification sont proposées. Il est dès lors possible d'envisager une gestion optimale d'un stock même stratifié en n'utilisant qu'une seule sonde ou de connaître précisément le contenu énergétique d'un stock. Le projet a atteint son objectif. Une amélioration de la

qualité constructive de la sonde est possible, des contacts avec des industriels du stockage sont à élaborer [12].

Une analyse de l'état de l'art en matière de systèmes de stockage thermique chimique pour le solaire appliqué au bâtiment a été réalisée par un groupe spécialisé en Finlande, sur 63 références choisies. Une approche systémique a été utilisée qui voit le stock comme une partie d'un tout "optimisable". Elle confirme que le stockage thermique chimique n'est pas réaliste pour le stockage saisonnier. Seule la technique des matériaux organiques à changement de phase (PCM) en imprégnation de paroi ou de mur semble prometteuse, surtout pour les constructions peu inertes (gain de stockage de 10 à 20%), mais il n'y pas encore de propositions industrielles. Les développements pour ces matériaux sont orientés par le marché plus porteur des pompes à chaleur à absorption. Elle confirme également que le stockage n'est pas la clé unique pour résoudre le problème d'intermittence du solaire: une combinaison de technologies est préférable, et en Europe tempérée, les bâtiments du futur peuvent résoudre le problème du chauffage avec pas ou peu de stockage, en réduisant la demande. On peut alors envisager un stockage renouvelable, non pas sous forme thermique chimique, cher et volumineux, mais sous la forme d'hectolitres de biocarburants ou de bois. L'étude recommande, un nouveau projet IEA sur le PCM [13].

En matière de production d'électricité par voie thermodynamique, une seule technologie est commerciale, et la Suisse pourrait proposer un nouveau capteur pour un projet d'envergure en Tunisie [29, 31, 33]. En outre, le cycle thermodynamique complet peut être sujet de recherche avancée et un pôle de compétence nous paraît nécessaire pour arriver à un certain niveau critique. C'est dans cet esprit qu'une nouvelle phase du projet CSIP a été réalisée en 1996: il s'agissait de préparer le design en allant jusqu'aux plans détaillés d'une unité pilote de production de 10 kWe, susceptible d'être réa-

lisée en 1997 sur un site accessible aux besoins de la recherche. Dans ce sens, nous n'avons pas poursuivi l'idée d'installer un prototype CSIP en montagne sur des paravalanches. Les travaux 1996 réorientés ont connus des progrès notables grâce à l'équipe du LENI et de COGENER:

- stand d'essai de capteurs à haute température (300°C), avec huile thermique ou évaporation directe,
- nouvelle conception du capteur extra-plat (CEP), dans un sens plus économique, plus facile à monter, avec recours aux matières plastiques,
- abandon du CPC pour un capteur à lamelles, orienté nord-sud avec poursuite,
- recherche d'une alternative aux tubes collecteurs initialement retenus qui se révèlent non fiables,
- nouveau modèle de turbine scroll validé expérimentalement,
- stratégie de gestion des cycles superposés de Rankine confirmée expérimentalement avec des rendements isentropes dépassant 60% (puissance fournie 3 à 8 kWe) dans le cycle basse température,
- meilleure intégration des modules de calculs pour l'optimisation d'ensemble dans un programme appelé *SolarPowerSystem*.

Suite à divers imprévus par rapport à la planification, explicables par les nombreux essais nécessaires avant de fiabiliser le concept d'un premier prototype, les essais du cycle haute température (100-140 C) débordent sur 1997. Le prototype à construire comportera deux cycles superposés à turbine Scroll et capteur CEP à huile thermique. On renonce à l'évaporation directe dans un premier temps. Des retombées directes pour le projet tunisien et pour d'autres applications sont possibles à terme [10].

INSTALLATIONS INNOVANTES

Les résultats du projet **Saillon 1 MW solaire** (thermique) durant les cycles 1 et 2 sont mitigés:

- le stock saisonnier en aquifère ne fonctionne pas selon l'attente, les écoulements hydrauliques souterrains sont difficiles à cerner et variables,
- le système de by-pass hydraulique censé stabiliser la zone de stockage est délicat à régler du fait de la constante de temps du phénomène à gérer (1 à 6 mois par définition du stockage saisonnier) et des fluctuations naturelles de la nappe aquifère,
- l'effet du vent sur les absorbeurs solaires est plus important que dans le prototype de U-Sierre, réduisant de près de 50% la puissance, l'énergie et les températures de charge par rapport au projet,
- par contre le stock absorbe sans problème les excédents de soleil, évitant toute surchauffe estivale de l'installation.

Les 1'000 m² d'absorbeurs ont tout de même fourni 338

MWh en 1996, à un coût très bas pour le maître d'ouvrage de 1,2 cts/kWh compte tenu des aides fédérales ! Mais la part utilisable de cette production, hors pertes du stock, n'a été que de 60 MWh (6.7 cts/kWh en direct, 9 cts/kWh déstocké), auxquels sont ajoutés 26 MWh grâce à la réduction des pertes en toiture du fait de la présence des absorbeurs à plat.

L'indice énergétique du complexe de 44 logements a été de 355 et 432 MJ/m² selon les années [14.1].

Compte tenu de l'intérêt évident du concept mis en oeuvre à Saillon et du potentiel d'amélioration que l'état actuel révèle (effet du vent, analyse thermique et chimique du stock, régulation, arrêt de l'appoint en périodes propices, gestion des décomptes pour les usagers, dialogue), nous avons décidé de prolonger le suivi et la recherche des bons réglages pour un cycle annuel (juillet 96 à novembre 97). Le montage d'un banc d'essai d'absorbeurs sous vent au SPF a été réalisé en 1996 et les résultats seront comparés aux mesures in situ. Un

dispositif d'obstacle local au vent, sur la surface des capteurs, est également recherché [14.2].

Ce projet est une des pièces de l'évaluation de l'intérêt des absorbeurs solaires nus comme captage économique. Par ailleurs, nous envisageons de favoriser une thèse d'hydrogéologie thermique sur le stock de Saillon, dans le cadre du programme de recherche "Stockage de chaleur" pour préciser le futur du stockage en aquifère de surface.

Une autre pièce est constituée par le projet de 77 m² d'**absorbeurs sélectifs en préchauffage d'eau sanitaire** de Genève Servette. L'installation a été suivie durant 2 ans par le bureau Keller, et avec le concours du Service de l'Energie de la Ville de Genève.

Après une année complète de mesures, les prédictions de POLYSUN 1.0 se sont révélées correctes et un modèle de simulation dynamique a été validé par BSI Lauzanne et utilisé pour les études paramétriques.

Les conclusions montrent que pour un dimensionnement de la part solaire à 25 - 30% des besoins annuels en eau chaude, la solution avec absorbeurs nus n'est que légèrement plus économique (environ 10%) qu'une solution avec capteurs vitrés. Pour un taux de couverture solaire plus élevé et dans le cas d'un appoint au mazout ou au gaz, l'avantage des capteurs non vitrés, posés simplement sur le toit plat d'un immeuble, ne semble pas décisif si l'on tient compte des pertes de maintien en température de la chaudière en été, mais ceci reste à confirmer [15].

Au **Centre d'Entretien de Boudry**, 102.5 m² d'absorbeurs en façade sont directement reliés au chauffage de sol d'un atelier, méritant ainsi l'appellation "plancher solaire direct". Les résultats de la première année ont donné une contribution aux besoins de 3.5% en hiver (2/3 chauffage, 1/3 ecs) et de 71% hors période de chauffage. A l'année, la productivité de la façade est de 126 kWh/m². L'influence du vent est manifeste, mais de manière semble-t-il moins accentuée qu'à Saillon. Un modèle de simulation captage + dalle a été développé et comparé aux mesures et sera utilisé pour analyse paramétrique et tables de dimensionnement en 1997 [16, 26].

Le rapport final des mesures de l'installation solaire de **Aerni Fenster** à Arisdorf a été accepté au début 1996. Il s'agit d'une installation avec 506 m² de sheds photovoltaïques refroidis à air, air chargeant un stock en terre de 6'000 m³ exploité par pompe à chaleur en hiver. Les mesures de 2 ans ont montré que le réglage des seuils de fonctionnement des ventilateurs (40/25°C) était bon, que le rendement de captage photovoltaïque était de 10% et celui de captage thermique de 35 %, contre 20% attendu. Le taux de couverture chaleur+électricité par le solaire a été de 62% pour une charge financière annuelle supplémentaire de l'ordre de 1.1% des coûts d'exploitation de l'entreprise ! Le stock saisonnier (40 sondes de 20 m) a évolué entre 10 et 21 °C et fonctionné à satisfaction. Des recommandations pour la conception d'installations similaires sont fournies [17].

A **Sevelen**, deux petits immeubles collectifs pour huit familles ont été construits l'un en 1994, l'autre en 1995. Ils sont semblables et novateurs dans leur conception solaire (Ruesch-Jenni), mais l'un a 112 m² de capteurs pour 25.3 m³ de stock en cuve verticale placée à côté de la cage d'escalier (4.4 m²/m³), et l'autre, construit en bénéficiant de l'expérience du premier, a 109 m² de capteurs sélectifs pour 38.4 m³ de stock (2.8 m²/m³).

Sevelen 1 est mesuré depuis janvier 95, la première année ayant été financée par le promoteur [35] et Sevelen 2 en parallèle depuis avril 96 par TNC. Suite à des problèmes électriques, les mesures n'ont pu débuter qu'en août 1996. Les résultats de chaque immeuble sont très intéressants: le taux de couverture solaire thermique est pour Sevelen 1 de 62% en 1995 et 65% pour les 11 premiers mois de 1996 (demande en chaleur totale 39 et 33 MWh). Ces performances sont remarquables pour un immeuble locatif ! Une comparaison Sevelen 1 et 2 pour octobre 96 révèle un taux de couverture de 59% pour l'un et 99% pour l'autre, du fait principalement de la taille plus importante du stock (température moyenne: 80 °C début septembre contre 65 °C pour Sevelen 1) et de la demande thermique plus faible pour Sevelen 2, équipé d'un renouvellement d'air contrôlé. L'observation de la stratification dans le stock est d'enseignement important pour les systèmes avec relativement grandes cuves verticales [18].

La possibilité nouvelle de combiner stockage solaire actif avec stockage solaire passif en utilisant la seule structure massive en béton d'une villa solaire a été proposée par PREFATECH spécialisée dans la préfabrication d'éléments de bâtiments. Une recherche préliminaire par le LASSEN-EPFL, portant sur l'évaluation du concept a été co-financée avec l'industriel. L'analyse par simulation TRNSYS du **comportement thermique dynamique de la maison solaire à stockage intégré**, maison fortement vitrée au SUD et dans laquelle les murs sont équipés de serpentins de distribution, a montré que dans le meilleur des cas paramétrés, le taux de couverture solaire actif+passif peut atteindre 65% (avec 30 m² de capteurs sélectifs vitrés) dans le climat du Valais comme du Tessin. Cette part ne peut que difficilement être augmentée du fait de la limite imposée par la capacité de stockage représentée par les murs entre 18 et 24°C. La maison passive fonctionnant comme un capteur-stockeur, il apparaît quand même judicieux économiquement de mettre en oeuvre un stockage séparé pour l'actif. D'après l'étude, de simples absorbeurs non vitrés ne procureraient pas un avantage sensible sur le coût du kWh final.

En outre, il n'est pas possible d'utiliser les fondations de la maison comme accumulateur de froid qui serait fourni par circulation de l'eau froide sanitaire, pour un refroidissement estival actif par les murs, la capacité d'accumulation étant en simulation trop faible. Une analyse plus poussée des conflits solaire actif-solaire passif autour d'un même stockage mériterait cependant d'être poursuivie. PREFATECH envisage de construire 15 à 20 villas solaires standardisées pour abaisser les coûts [19].

Coordination et collaboration nationale

La coordination avec cinq autres programmes de recherche connexes, à savoir Architecture solaire, Bâtiments, Photovoltaïque, Chimie solaire et Chaleur de l'environnement est effectuée de manière fréquente pour rechercher les synergies d'idées et de moyens (par exemple: projets Neurobat, capteurs PV hybrides, Cité solaire de Plan-les-Ouates, ABSORBEUR 2000, activités PACES sur la concentration). La coordination avec le programme "stockage de chaleur" est totale.

Le SPF organise de nombreuses visites de ses installations au cours de l'année, ainsi que des cours POLYSUN. Les travaux menés au SPF font l'objet de discussions tous les deux mois avec le directeur du SPF.

La collaboration entre différents groupes de recherche en Suisse est favorisée le plus possible. Notamment le développement d'un centre de compétences à l'école d'ingénieurs d'Yverdon a été amorcé.

La collaboration avec l'industrie se fait par le biais des tests et conseils procurés par le SPF. Dans les autres

projets, nous recherchons le plus possible l'association avec un industriel ou un bureau proche du terrain.

Pour la production d'électricité thermosolaire, une coordination avec la Direction à la Coopération et au Développement est en préparation.

L'information réciproque de tous les participants au programme de recherche solaire actif a lieu de manière organisée tous les 2 ans à l'occasion de CISBAT à l'EPFL (1995, prévu en 1997).

Des contacts étroits sont maintenus avec le chef du programme P+D, M. Renaud. Des échanges de vue sont organisés avec M. Mercier du programme DIANE Construction écologique. Nous avons initié une première réunion de coordination entre responsables romands de recherche, P+D, E2000, DIANE et Délégués à l'énergie, dans le but de décloisonner les réflexions en matière de renouvelable et nourrir nos propres idées pour la recherche solaire avec des problèmes de terrain.

Coordination et collaboration internationale

Nous suivons de près les travaux internationaux en matière de solaire thermique par le biais des publications et de conférences, Conférence internationale EUROSUN'96 à Freiburg en octobre 1996 et Symposium mondial sur la concentration solaire à Köln en novembre [29, 30, 31, 32]. Nous suivons particulièrement les travaux allemands, suédois, hollandais et américains.

En ce qui concerne l'Agence Internationale de l'Energie, le seul groupe actif en solaire thermique est celui qui traite des matériaux (MSTC). La collaboration est ici très bonne, entre laboratoires compétents, pour aboutir notamment à des normes de qualité. Le SPF y prend une part active. En outre, des contacts très fréquents ont lieu entre le SPF et l'ISFH d'Hanovre, le FSE de Stuttgart et l'ITW de Stuttgart. Le SPF, grâce à sa position acquise et que nous voulons maintenir, est sollicité quotidiennement du monde entier pour conseils, appréciation et collaboration. A moyen terme ce peut être un levier puissant pour des produits solaires suisses.

Une nouvelle tâche AIE en solaire actif serait cependant souhaitable (quelques pistes: nouvelle génération de capteurs, préchauffage solaire standardisé dans les grands immeubles, façade active).

Dans le cadre des projets européens Joule/Thermie, il n'y a malheureusement pratiquement pas d'activités portant l'étiquette "solaire actif" et c'est une situation à notre avis préjudiciable à une future Europe solaire.

Compte tenu de ces éléments, nous avons initié en 1996, lors d'EUROSUN'96 une coopération trilatérale Danemark, Pays-Bas, Suisse sur un sujet très délimité, pour raison d'efficacité maximum à coût limité. La mise au point de procédures de tests dynamiques de cuves solaires est le sujet retenu en fin 1996. Le laboratoire d'énergie solaire du Danemark, longtemps pionnier du low flow et de la stratification et le SPF ont sur ce sujet des connaissances à échanger avec grand profit, sans que le cadre administratif ne soit lourd.

Transferts à la pratique, Projets P+D

Comme on l'a vu, la recherche en solaire thermique est pour plus de 75% appliquée. La liaison avec la pratique est donc bonne. Les forts liens du SPF avec les PME du solaire ont déjà été soulignés. L'avènement sur le marché des systèmes compacts pour la préparation d'eau chaude sanitaire, encore objets de laboratoire en 1994 est un exemple de transfert recherche-marché réussi, grâce aussi à l'action du Groupe des Energies Renouvelables d'Energie 2000.

Les logiciels METEONORM et POLYSUN sont demandés et utilisés dans la pratique solaire quotidienne.

La coordination avec le chef de programme P+D est fréquente. En ce qui concerne les projets P+D, le nombre de demandes et le nombre de projets acceptés sont en hausse en 1996 par rapport à 1995. Les projets sont avant tout orientés vers la production d'eau chaude sanitaire en milieu locatif. Ils représentent au total et pour 1996 470 m² de capteurs et une production estimée à 210 MWh. Les actions entreprises visent à favoriser

la production d'eau chaude solaire dans le bâtiment locatif, les complexes hôteliers, et les bâtiments médico-sociaux, ainsi que de promouvoir l'intégration des capteurs en façade [34]. On constate que certains de

nos efforts de recherche vont bien, en amont, dans le sens d'améliorer ou de proposer les solutions techniques à ces préoccupations.

Evaluation 1996

Le programme s'est déroulé selon l'attente en 1996.

Le SPF a renforcé encore la qualité de ces procédures composants et systèmes. Sa reconnaissance internationale se consolide. Les performances des systèmes avec absorbeurs se précisent. La définition de l'orientation 1996-1999 du programme de recherche a été effectuée et discutée avec la CORE en décembre 1996 [33]. Le

cadre est fixé. On peut en outre relever la faible présence américaine dans le domaine de la recherche en solaire thermique basse température.

En matière de centrales solaires thermodynamiques, un regain d'intérêt est toutefois manifeste aux Etats-Unis depuis environ un an.

Perspectives 1997

L'évolution de la plupart des projets en cours a été tracée précédemment. Les idées nouvelles qui pourraient être mises en chantier concerne le contrôle optimal des installations, le projet pilote de mini-centrale

électrique et le captage en façade avec isolation transparente si les moyens financiers le permettent.

Les résultats des divers projets intégrant des absorbeurs nus sont également attendus.

Liste des projets de recherche

- [1] S. Kunz, J. Remund, METEOTEST, Bern: *METEONORM Version 2.1*. (RA + RF) • *Version 3 internationale*.
- [2] Ch. Huber, S. van Velsen, U. Frei, SPF/IT-Rapperswil: *Erweiterung des Programms POLYSUN Version 2.0* (RF)
- [3] S. Brunold, U. Frei, SPF/IT-Rapperswil: *Absorber 2000 Phase 1* (RF) • *Materialien in thermischen Kollektoren MSTC* (RA)
- [4] P. Gantenbein, U. Frei, SPF/IT-Rapperswil: *Technologietransfer "Absorber 2000"* (RA)
- [5] U. Frei, C. Müller-Schöll, P. Vogelsanger, SPF-ITR, Rapperswil: *Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Solaranlagen* (RA) • *Fachtechnische Informations- und Qualitätskontrollstelle für Sonnenergieanlagen und -komponenten* (RA)
- [6] J.-P. Rossy, ENERGIE SOLAIRE, Sierre: *Absorber AS+ (C3-97)* (RA)
- [7] A. Reist, RAC Changins, Nyon: *GEOSER, stockage souterrain de chaleur pour serres* (RA)
- [8] P. Dind, EINEV, Yverdon: *Mesures long terme de chauffe-eau solaires et pré-étude de petites unités de production de froid solaire* (RA)
- [9] E. Visser, D. Gillet, D. Bonvin, EPFL-Lausanne: *Supervision automatique d'installations solaires thermiques. Expertise préliminaire* (RF)
- [10] D. Favrat, et al. LENI/EPF-Lausanne: *Projet détaillé d'une mini-centrale pilote électrothermosolaire de 10 kWe* (RA)
- [11] H. Visser, TNO-DELFT, the Netherlands: *Coordination of IEA Solar Heating and Cooling Programme Task 14. DCST Subtask* (RA + RF)
- [12] K. Marti, C. Hilgenberg, HTL-Burgdorf: *Mittlere Temperatur in Behältern* (RA + RF)
- [13] P. Lund, H. Faninger-Lund, SOLPROS, Helsinki: *State-of-the-Art Report on Advanced Solar Thermal Storage Systems* (RA + RF)
- [14] J.-P. Rossy, ENERGIE SOLAIRE, Sierre et B. Saugy, BSI, Lausanne: 14.1) *Saillon 1 MW Solaire. Cycles 1 et 2* (RF + Annexes, Juillet 1996) • 14.2) *Saillon 1 MW Solaire. Suivi du 3ème cycle* (RA)
- [15] L. Keller, KELLER-BURNIER, Lavigny, C. Macherel, Genève, R. Groux, BSI, Lausanne: *Capteurs sélectifs non-vitrés dans une installation de préchauffage de l'eau chaude sanitaire* (RF)
- [16] M. Kernen, P. Renaud, PLANAIR, La Sagne, R. Groux, BSI, Lausanne, C. Cornu, GEILINGER, Lausanne: *Plancher solaire direct du Centre d'Entretien des routes nationales de Boudry NE* (RA)
- [17] P. BERCHTOLD, Sarnen, M. Posnanski, ATLANTIS ENERGIE, Bern, AERNI FENSTER, Arisdorf: *Messprojekt Fabrikgebäude mit einem hohen solaren elektrothermischen Deckungsgrad* (RF, 1995)

- [18] L. Clavadetscher, TNC, Männedorf: *Messungen an zwei Solarhäusern in Sevelen* (RA)
- [19] A. Fromentin, D. Sujevs, EPFL-LASEN, Lausanne, PREFATECH, Granges: *Comportement thermique dynamique d'une maison solaire à stockage intégré* (RA+RF)

(RA) Rapport annuel 1996 disponible
 (RF) Rapport final disponible

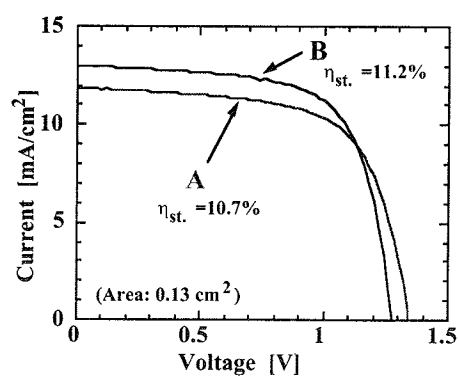
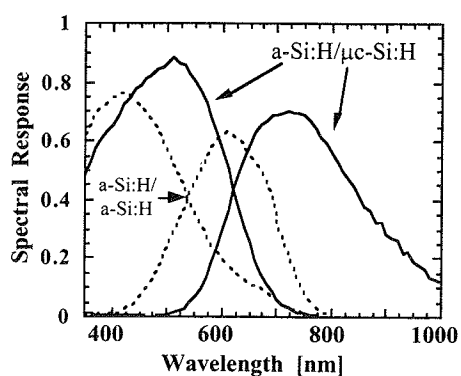
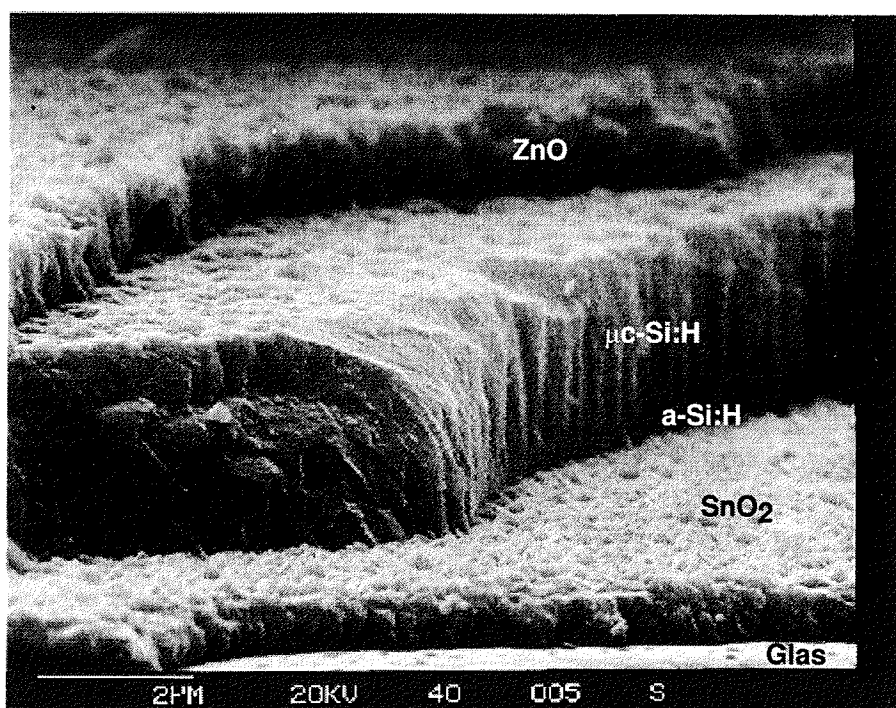
Références

- [20] S. Kunz, J. Remund, METEOTEST, Bern: *METEONORM Mise à jour Version 2.1. Complément au manuel du concepteur* – Mise à jour, édition 1996, BEW, Version D et F + Logiciel
- [21] SPF/IT-Rapperswil: *POLYSUN 2.0. Die Software zur Dimensionierung und Vorhersage des Ertrags thermischer Sonnenenergieanlagen* – Brochure de présentation du logiciel, 4 pages couleur, SPF, Rapperswil ou NOVA ENERGIE
- [22] SPF/IT-Rapperswil: *Die Energie der Sonne im Dienste des Menschen • L'énergie solaire au service de l'humanité • Solar Energy in the Service of Mankind* – Brochures de présentation des activités.
- [23] EMPA: *Prüfung des Korrosionsverhaltens von Wärmeträgerflüssigkeiten Hochtemperatur-Wärmeträger* – Prüfbericht 152546/1, 19. November 1996
- [24] U. Frei, F. Flückiger, SPF/IT-Rapperswil: *Messbericht SOLKIT* – Version provisoire, décembre 1996, SPF
- [25] H. Visser, TNO-DELFT, the Netherlands: *Dynamic Testing of Active Solar Heating Systems (IEA, final report)*, May 1996
Volume A: *Dynamic Collector Testing. Component Testing and System Simulation of Small Solar Heating Systems. In Situ Testing of Large Solar Heating Systems*
Volume B: *Solar Domestic Hot Water System Testing*
- [26] M. Kernen, P. Renaud, PLANAIR, La Sagne, R. Groux, BSI, Lausanne, C. Cornu, GEILINGER, Lausanne: *Plancher solaire direct du Centre d'Entretien des routes nationales de Boudry NE – Rapport de la première année de mesures.*
- [27] Y. Allani, et al. LENI/EPF-Lausanne: *Projet de mini-centrale électro-thermo-solaire alpine à concentrateurs plats intégrés aux structures de paravalanches* (RF)
- [28] Y. Pfister, et P. Dind, EINEV, Yverdon: *Conception de chauffe-eau solaires économiques* – EINEV, décembre 1996
- [29] J.-C. Hadorn: Compte-rendu *EUROSUN'96, Freiburg-in-Brisgau* – ENET News Décembre 1996 et Lausanne 23 septembre 1996 pour le rapport à l'OFEN
- [30] J.-C. Hadorn, et G. Faninger: *Summary report of Science Day Swiss/Österreich, Vienna, March 21-22, 1996* – OFEN, April 1996
- [31] J.-C. Hadorn: Compte-rendu *Solar Thermal Concentrating Technologies, 8th International Symposium, October 6-11, 1996, Köln*, in [33]
- [32] J.-C. Hadorn: *Solar thermal energy research in Switzerland. A review of period 1985-1995. Paper to Eurosun'96 10 internationales Sonnenforum*
- [33] J.-C. Hadorn: *Programmes de recherche "Solaire actif • Chaleur" et "Stockage de chaleur". Concept et contenu des programmes pour la période 1996-1999* – décembre 1996, ENET
- [34] P. Renaud et G. Oreiller, PLANAIR: *Programme P+D, Solaire Actif* – RA 1996, OFEN
- [35] L. Clavadetscher, TNC: *Schlussbericht über die Messkampagne am Solarhaus Sevelen: Januar 1994 - Mai 1995 im Auftrag von: RÜESCH SOLARTECHNIK, September 6, 1995, TNC*

PHOTOVOLTAIK

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Stefan Nowak



Mikromorphe Solarzellen

Schichtaufbau der mikromorphen (amorph a-Si:H /mikrokristallin $\mu\text{c-Si:H}$) Solarzellen in einer Elektronenmikroskopaufnahme mit Kurven der spektralen Empfindlichkeit und des Wirkungsgrades (Institut de Microtechnique, Université Neuchâtel)

Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1996

Das Programm "Photovoltaik" gliederte sich 1996, entsprechend dem Aufbau eines Photovoltaiksystems, in drei unmittelbar technische Bereiche, einen Bereich, welcher sowohl Planungs- und Beurteilungsinstrumente wie auch breitere Anwendungen umfasst, sowie einen Bereich, bei welchem der Informationsaustausch und die Zusammenarbeit auf internationaler Ebene im Vordergrund steht. Dem **Systemaspekt** und der **Umsetzung** wird unter dem Gesichtspunkt **Kostenreduktion** weiter grosses Gewicht beigemessen. Die strategische Ausrichtung des Programms wurde im entsprechenden **Konzept 1996-1999** [38] festgelegt und durch die CORE genehmigt. Es definiert die angestrebten Anwendungsbereiche als **netzgekoppelte, gebäudeintegrierte Systeme** (Hauptanwendung) sowie **neue Lösungen für Inselformen** (Nischenanwendung). Die Bereiche umfassen:

Zellen: **Dünnschicht-Siliziumzellen** bilden weiterhin den Schwerpunkt, wobei verschiedene Substrate berücksichtigt werden. Wirkungsgrad, Kosten und technische Realisierbarkeit bilden die wesentlichen Kriterien. In vorwiegend internationalen Projekten werden andere Dünnschichttechnologien verfolgt. Die nanokristallinen Farbstoffzellen werden in Zusammenarbeit mit der Industrie weiter entwickelt.

Module und Gebäudeintegration: Produkte und Systeme für Anwendungen im bebauten Raum bilden als zielorientierte Hauptanwendung einen Schwerpunkt. Dabei wird angestrebt, die Systeme umfassend, z.B. inkl. Montagetechnik, zu betrachten und entsprechende industrielle Lösungen zu erarbeiten. Hier liegt kurzfristig das grösste Kostenreduktionspotential.

Systemtechnik: Obwohl die Systemtechnik bereits weit fortgeschritten ist, besteht auch hier ein Kostenreduktionspotential, welches sich durch den Einsatz erprobter und optimierter Komponenten weiter erschliessen lässt. Wechselrichter, Stecksysteme und Sicherheitsaspekte bilden dafür zusammen mit der Qualitätssicherung und entsprechenden Normen wesentliche Voraussetzungen.

Diverse Projekte und Studien: Planungshilfen und die Rolle nicht-technischer Barrieren dienen der Absicherung und der beschleunigten Marktentwicklung der Photovoltaik. Zudem werden Synergien mit anderen Nutzungsformen gesucht.

Internationale Zusammenarbeit: Diese bildet eine Grundlage des ganzen Programms und zieht sich durch alle Bereiche. Die Schweiz ist in der Photovoltaik sowohl im Programm der IEA (PVPS) als auch im Programm Joule-Thermie der EU sehr aktiv.

1996 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

ZELL-TECHNOLOGIE

Am *Institut de Microtechnique*, IMT, in Neuchâtel wurde die 4. Projektetappe [1] erfolgreich abgeschlossen. Die Arbeiten konzentrierten sich vermehrt auf die Möglichkeiten des neuen, dünnen mikrokristallinen Materials ($\mu\text{-Si:H}$) und seinem Einsatz in Verbindung mit den dünnen amorphen Siliziumschichten (a-Si:H). Gleichzeitig wurden verschiedene Verfahren zur Stabilisierung des Wirkungsgrades untersucht. Für Zellen, welche ausschliesslich aus amorphem Silizium bestehen, wurde für die Einfachzelle ein stabiler Wirkungsgrad von 8.0% erreicht, während dieser bei Tandemzellen 9.0% betrug. Neu wurde auch die *hot-wire-Deposition* der dünnen Siliziumschichten eingeführt, welche gemäss anderen Forschungsarbeiten zu stabileren Schichten führt. Der Anfangswirkungsgrad lag hier bei 8.0%. Zellen, welche ausschliesslich aus mikrokristallinen Schichten bestehen, erreichten einen Wirkungsgrad, welcher bei 7.7% liegt und keine lichtinduzierte Degradation aufweist. Für das **vielversprechende mikromorphe Konzept**, d.h. eine mikrokristalline Bottomzelle und eine amorphe Topzelle, wurde im Berichtsjahr ein stabiler Wirkungsgrad von 10.7% erreicht. Die Depositionsrate des mikrokristallinen Materials konnte erhöht werden.

Das EU-Projekt HELIOS [1] wurde im Berichtsjahr ebenfalls abgeschlossen. Die Herstellung von Tandemzellen mit SiGe-Schichten in verschiedenen Laborato-

rien unter Verwendung unterschiedlicher Depositionstechnologien führte zu einem Wirkungsgrad deutlich unter den Erwartungen. Das NEFF-Projekt [1] zur Untersuchung von Solarzellen, welche auf Aluminium abgeschieden werden, konnte abgeschlossen werden. Aluminium erfordert als Substrat für Solarzellen, welche in umgekehrter Schichtfolge aufgebracht werden (n-i-p), eine geeignete Vorbehandlung. Die mikromorphe Zelle wurde erstmals auf dieses Substrat abgeschieden und erbrachte einen Anfangswirkungsgrad von 9.3%. In einem neuen, vom PSEL massgeblich geförderten Projekt [1] wird die Abscheidung von Solarzellen auf Kunststoffsubstraten untersucht. Erste Resultate wurden, aufgrund der thermischen Anforderungen an das Kunststoffsubstrat, auf Polyimid realisiert.

Am *Centre de Recherche en Physique des Plasmas* der ETHL [2] wurde das Projekt der **grossflächigen Abscheidung** von dünnen Siliziumschichten weitgehend abgeschlossen. Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Arbeiten auf die Abscheidung mit erhöhter Frequenz (VHF). Mit einer geeigneten Elektrodenkonfiguration konnte auf einer Fläche von 35 x 45 cm eine Homogenität von besser als $\pm 10\%$ erreicht werden, was innerhalb der Toleranzgrenze für Solarzellen liegt. Mit den mittlerweile vorhandenen optischen und elektrischen Diagnostikmethoden können an einem industriellen Reaktor komplexe Depositionsprozesse analysiert werden.

Für das am PSI bereits im Vorjahr abgeschlossene Projekt [3] über dünne **kristalline Silizium-Zellen** konnte für Solarzellen konventioneller Dicke ein hoher Wirkungsgrad von 21% durch unabhängige Messungen am Fraunhofer-Institut (Freiburg, D) bestätigt werden. Die Zelle ist vorderseitig mit einer speziellen Antireflexionsschicht versehen, welche massgeblich zum ausgezeichneten Resultat beiträgt.

Die im Rahmen der EU-Projekte EURODIS und EUROCAD bei der AFIF in Zürich durchgeführten Arbeiten zu Solarzellen aus Verbindungshalbleitern wurden durch das PSEL-Projekt **SWISSCIS** [4] weitergeführt, wobei sich die Arbeiten auf das epitaktische Wachstum durch Molekularstrahlepitaxie von Verbindungshalbleitern auf der Basis von Cu, In und Se und deren Strukturanalyse konzentrierten. Das Projekt soll ab 1997 durch ein neues EU-Projekt ergänzt werden.

Am *Institut de Physique Appliquée* der ETHL wurden die Arbeiten zum EU-Projekt **EURO-TMDC** [5] über neue Solarzellenmaterialien auf der Basis von Dichalkogeniden von Übergangsmetallen weitergeführt. Es wurden dünne Filme von WS_2 und entsprechende Schottky-Dioden hergestellt, welche strukturell, chemisch, elektrisch und optisch charakterisiert wurden.

Die Arbeiten zu den **nanokristallinen Zellen** (GRÄTZEL-Zellen) [6] wurden am *Institut de Chimie Physique* der ETHL fortgesetzt. Diese Arbeiten finden vorrangig in Zusammenarbeit mit industriellen Lizenznehmern aus dem In- und Ausland statt. Im Vordergrund der technischen Fragestellungen stehen Zellversiegelung, Stabilität und Verschaltung. Gleichzeitig soll das Thema neuer geeigneter Farbstoffe und des Elektrolyten weiterverfolgt werden.

Solarmodule und Gebäudeintegration

Das Projekt zur Entwicklung eines **integrierten Flachdachsystems** (SOFREL®, *Solar Flat Roof Element*) [7] unter der Leitung von ENECOLO (vormals PMS Energie) wurde bereits im Vorjahr weitgehend abgeschlossen. Im Berichtsjahr wurden die Umsetzungsarbeiten zur Markteinführung weiter intensiviert, insbesondere hinsichtlich der kostengünstigen Aufständigung mit Betonsteinen und Metallbügeln. Bis Ende 1996 wurden ca. 250 kW mit SOFREL-Steinen montiert. Dabei konnten die günstigen Kosten bestätigt werden: Ohne Planung betragen die Kosten für eine betriebsfertige Anlage rund 10. Fr./W. Im Schweizerischen Mittelland resultiert daraus ein Gestehungspreis von rund 0.90 Fr./kWh (5% Zins, Amortisation über 30 Jahre).

Diese Arbeiten zur Flachdachintegration wurden am LESO der EPFL [8] auf umfassendere Art weitergeführt mit dem Ziel, weitere neue Systemlösungen für **integrierte Flachdachanwendungen** zu entwickeln. Der oben erwähnte Metallbügel und eine Eternitschale (SolBac®) sind konkrete Produkte, welche aus diesem Projekt hervorgegangen sind und durch eine neu gegründete Firma (SOLSTIS) vermarktet werden. Die Arbeiten werden nun in Hinsicht auf die Anwendung auf Gründächern vertieft. Das Projekt zum Einsatz der **Photovoltaik auf Bahnhofsperrons** [8] konnte durch die zweite Hälfte der Anlage abgeschlossen werden; die Messungen auf dem ersten Teil der Anlage zeigen trotz der unvorteilhaften Orientierung der Module einen jährlichen Energieertrag von 817 kWh/kWp.

Im Rahmen des Projektes ALUCOSOL® für ein **integriertes Photovoltaik-Fassadensystem** [9] bei ALUSUISSE konnte das definitive Konzept noch nicht festgelegt werden, da die vorgesehenen Solarzellen von UNI-SOLAR nicht verfügbar waren und entsprechende Alternativen erwogen werden mussten.

Dabei werden auch kristalline Zellen berücksichtigt. Versuche mit Epoxy als vorderseitige Schutzschicht für kristalline Zellen mussten aufgrund negativer Resultate bei erhöhter Temperatur eingestellt werden. Parallel zu diesen Arbeiten wurden die technischen Spezifikationen bezüglich der Systemtechnik näher definiert und mit einer entsprechenden Kostenanalyse ergänzt.

Das Projekt zur Anwendung der Photovoltaik im **Überkopfbereich** [10] konnte bei ALPHA REAL in Zusammenarbeit mit der EMPA abgeschlossen werden. Dabei konnten die sicherheitstechnischen Aspekte bezüglich der Verwendung von ungehärteten Gläsern geklärt werden. Bei genügendem Abstand der Solarzellen zum Rahmen führt der auftretende Temperaturgradient prinzipiell nicht zu einem Bruch. Das Problem kann jedoch durch den Einsatz von teilvorgespannten Gläsern auf einfachere Art gelöst werden.

TNC konnte das NEFF-Projekt [11] zur Entwicklung von neuen Systemen zur Kombination von **Photovoltaik und Schallschutz** entlang von Verkehrsträgern abschliessen. Aufgrund eines Ideenwettbewerbs zu diesem Thema wurden von 19 Projektteams bestehend aus Photovoltaik- und Schallschutzfirmen 31 Vorschläge eingereicht, aus welchen 13 als realisierungswürdig erachtet wurden. Dabei wurden auf der Photovoltaikseite echte Neuheiten präsentiert. Die ersten 6 Vorschläge sollen nun in 6 x 10 kWp-Prototypen in Deutschland und der Schweiz realisiert werden.

Das LESO befasst sich weiterhin mit der Fortsetzung des Projektes **DEMOSITE** [8], in welchem PV-Konstruktionselemente in kleinen, funktionsfähigen Anlagen nebeneinander betrieben werden. Nebst den 11 vorhandenen Beispielen konnten im Berichtsjahr zwei neue Varianten aufgebaut werden, je eine aus dem Fassade- und dem Dachbereich.

SYSTEMTECHNIK

An der Ingenieurschule Biel wurde das Projekt zur Verbesserung von **Wechselrichtern in der 20kW-Klasse** [12] durchgeführt. Durch technische Massnahmen am Transformator sowie durch die Integration der Messsignalaufbereitung konnten die Herstellungskosten um 28% reduziert werden. Die Resultate werden von Sputnik Engineering in ihre SolarMax20-Wechselrichter einfließen. Das Projekt eines **Modulwechselrichters** [12] wurde anhand von 200W-Prototypen im Feldeinsatz geprüft. Aufgrund des elektrischen Funktionstests wurden einige Änderungen vorgenommen. Der Wirkungsgrad des Laborprototyps war 85%-90% bei Voll- bzw. Halblast, in der Praxis lag dieser aber eher bei 80%. Eine Pilotserie soll im Frühjahr 1997 bei Sputnik Engineering hergestellt werden.

Im neuen EU-Projekt SCMIC (*Single Cell Module Integrated Converter System*) [13], bei welchem seitens der Schweiz ENECOLO, ALUSUISSE und die ETHZ beteiligt sind, werden die Grundlagen eines **Einzellenwechselrichters** erarbeitet. Dieses Konzept, welches bei Dünnschichtzellen zur Anwendung kommen könnte, zeichnet sich durch sehr kleine Spannungen (1-2 V) und hohe Ströme (50-100 A) aus, was an die Elektronik besondere Anforderungen stellt. Der Aufbau und die Kontaktierung des Solarmoduls werden durch diese Anforderungen massgeblich beeinflusst. Die Spezifikationen wurden festgelegt und mögliche Lösungen für die Kontaktierung aufgezeigt. Das Projekt steht im Zusammenhang mit dem Projekt ALUCOSOL.

Das Projekt der **Wechselrichterprüfstelle** an der Ingenieurschule Burgdorf [14] wurde im Berichtsjahr weitergeführt. Die Zahl der untersuchten kommerziellen Wechselrichter wurde für die einphasigen Geräte weiter erhöht, wobei die diversen Messgrössen durch die Bestimmung des MPT-Wirkungsgrades (*Maximum Power Tracking*) ergänzt wurde. Neu wurden auch erste Modulwechselrichter geprüft. Die Zunahme der Zuverlässigkeit neuerer Produktgenerationen konnte bestätigt werden. In einem neuen PSEL-Projekt [14] wird das **Langzeitverhalten** von netzgekoppelten Photovoltaikanlagen untersucht. Die Messungen umfassen Photovoltaikanlagen im Gebirge (Birg 2670m, Jungfrauoch 3454 m), alle Anlagen in Burgdorf sowie in Zukunft eine 18.5kW-Anlage in Liestal. Für die Anlage auf dem Jungfrauoch konnte der jährliche Ertrag auf 1481 kWh/kWp, die Performanz (PR) auf 84.2% erhöht werden.

DIVERSE PROJEKTE UND STUDIEN

Das Projekt zur **Umweltverträglichkeit** verschiedener PV-Technologien wurde durch ALPHA REAL [15] fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurden die Stoffflüsse für verschiedene Solarzellentechnologien zusammengestellt. Für die gängige Siliziumtechnologie zeigten die neuen Resultate gegenüber früheren Publikationen günstigere Aussagen, insbesondere bei der zur Herstellung notwendigen Energie. Gleichzeitig wird auch das

Das NEFF-Projekt eines **optimierten Verkabelungssystems** [15] wurde bei ALPHA REAL abgeschlossen. Das Konzept eines PV-Steckers wurde erfolgreich geprüft und kommt im Solardachziegel zur Anwendung. Ein ähnliches Konzept wird auch durch MULTICON-TACT angeboten. Die Verkabelung von AC-Modulen bildete ebenfalls einen Schwerpunkt dieses Projektes. In einem neuen EU-Projekt soll, ausgehend vom früher entwickelten Lichtbogendetektor, ein umfassendes **Sicherheitskonzept** [15] für Photovoltaikanlagen erarbeitet werden. Im Vordergrund steht das korrekte Ansprechen des verwendeten Detektors. In einem weiteren EU-Projekt, *PV Checker*, soll ein einfaches **Energieerfassungsgerät** [15] für Photovoltaikanlagen entwickelt werden. Hierzu wurden die notwendigen Spezifikationen aufgestellt.

An der Ingenieurschule St-Imier wurde das Projekt zur Untersuchung **neuer Photovoltaiksysteme** [16] weitergeführt. Die 12 Messplätze auf dem Gelände des PV-Kraftwerks Mont-Soleil wurden eingerichtet, mit der notwendigen Datenerfassung versehen und mit entsprechenden Prototypen bestückt. Erste Auswertungen liegen jetzt vor. Parallel dazu wird das Datenerfassungssystem des Kraftwerks unterhalten. Im Jahr 1996 wurde aufgrund günstiger Witterungsbedingungen der bisher höchste jährliche Ertrag von rund 610'000 kWh gemessen.

Das TISO an der Ingenieurschule Trevano setzte seine Untersuchungen **kommerzieller PV-Module** [17] fort. Insgesamt 18 Module wurden bisher dem Testverfahren unterzogen und während mindestens einem Jahr unter Aussenbedingungen geprüft. Neu konnten auch bei einzelnen kristallinen Modulen eine leichte Degradation festgestellt werden. Verschiedene PV-Anlagen aus der ganzen Schweiz wurden mittels thermografischer Messungen analysiert. Ausserdem wurden die Messungen an den bestehenden kristallinen und amorphen Anlagen fortgesetzt. Die Datenbank des TISO [39] umfasst mittlerweile mehr als 600 verschiedene PV-Module.

In einem PSEL-Projekt untersuchte EWI [18] das Betriebsverhalten der 80 kWp PV-Anlage mit **DC-Direkteinspeisung** PARK+RIDE Neufeld in Bern. Trotz des zeitweisen Betriebs ausserhalb des MPP-Punktes können sehr hohe Energieerträge erzielt werden. Die Performanz (PR) dieser Anlage lag 1995 bei 84% während der spezifische Ertrag 1100 kWh/kWp erreichte, also deutlich über dem gesamtschweizerischen Mittel.

Problem des Siliziumrohmaterials und seine in Zukunft zunehmende Bedeutung erkennbar.

Das bereits im Vorjahr fertiggestellte **PC-Planungsinstrument** PVSYST wurde in der *Groupe de Physique Appliquée* [19] weiter verfeinert und liegt nun neu auch in einer englischen Version vor. Es erlaubt als Planungsinstrument umfangreiche Simulationsrechnungen

für Inselanlagen sowie netzgekoppelte Systeme (AC und DC) und entsprechende Vergleiche mit gemessenen Anlagen. Teilabschattungen können eingehend behandelt werden.

Am LESO der EPFL wurde in Zusammenarbeit mit SCHWEIZER und ENECOLO ein neues Projekt angefangen, welches die Machbarkeit eines **Hybridkollektors** (thermisch und Photovoltaik) [20] zum Ziel hat. Aufgrund der Temperaturcharakteristik des amorphen Siliziums soll diese Solarzelle für die vorgesehen Anwendung untersucht werden. Die Wahl des Materials (Metall oder Kunststoff) für den thermischen Kollektor wird ebenfalls geprüft. Es wird angestrebt, die Fragestellung zusammen mit weiteren Industriepartnern zu lösen.

Das **Engineering-Handbuch** für PV-Anlagen [21] wurde im Rahmen eines PSEL-Projektes durch EWI fertiggestellt. Die im Handbuch beschriebenen Hauptanwendungen sind PV-Anlagen der folgenden Kategorien: Systeme mit Nennleistungen ab etwa 50 kWp, Systeme mit hohen Betriebsspannungen, PV-Kraftwerke, grosse gebäudeintegrierte Anlagen. Beim NEFF-Projekt der Solarwasserstoffanlage **HYDROSOL** [21] in Payerne konnten die Probleme mit dem

Elektrolyseur noch nicht zufriedenstellend gelöst werden, sodass vorderhand nur der photovoltaische Teil sowie der Wasserstoff-Speicher genutzt werden können. Die wichtigsten Erfahrungen und Erkenntnisse sind in einem Schlussbericht zuhanden des NEFF zusammengefasst.

Am PSI wird mit Unterstützung des FOGA das Thema der **Thermophotovoltaik** [22] aufgegriffen. In einem ersten Schritt soll unter Verwendung verfügbarer Komponenten die Realisierung eines mit Erdgas betriebenen, wärmegeführten Klein-Blockheizkraftwerks mit ca. 10 kW thermischer Leistung und einigen 100 W elektrischer Leistung angestrebt werden. Mit der gewählten Projektausrichtung steht nicht die optimierte Lösung des photovoltaischen Teils im Vordergrund sondern der grundsätzliche Nachweis der Machbarkeit und die Funktionstüchtigkeit eines derartigen Systems.

Die Abschätzung des **PV-Flächenpotentials** wurde an der Universität Freiburg [23] weiterverfolgt mit dem Ziel, die zur Anwendung gelangenden Reduktionsfaktoren zur Berücksichtigung verschiedener Einschränkungen methodisch besser abzustützen. Die früheren Resultate konnten damit bestätigt und weiter verfeinert werden.

KOORDINATION

Das TISO an der Ingenieurschule Trevano zeichnet, zusammen mit der Programmleitung Photovoltaik, für die Schweizer Arbeiten [24] im Rahmen des IEA-Programms *Photovoltaic Power Systems* (PVPS), *Exchange and Dissemination of Information on PV Power Systems*, verantwortlich. Im Berichtsjahr wurde ein nationaler Übersichtsbericht [40] erstellt, welcher Stand und Entwicklung der Photovoltaik Ende 1995 beschreibt. Der *Newsletter PV-Power* [41] informiert über weltweite Entwicklungen in der Photovoltaik. Zudem wurden Berichte über die Rückliefertarife für netzgekoppelte PV-Anlagen in den beteiligten Ländern der IEA sowie ein Statusbericht über die laufenden Forschungsprogramme und ihre Resultate erstellt [42].

TNC koordiniert den Schweizer Beitrag [25] im IEA-Projekt *Operational Performance and Design of PV Power Systems*. Die Struktur der Datenbank und die Auswertungsmöglichkeiten für ausgewählte PV-Anlagen wurden weitgehend fertiggestellt.

Nun müssen die entsprechenden repräsentativen Datensätze sichergestellt werden. Ausserdem wird eine Übersicht gängiger Mess- und Auswertemethoden für PV-Systeme erstellt.

ATLANTIS beteiligt sich am Projekt *Use of PV Power Systems in Stand-alone and Island Applications* [26]. ENECOLO stellt den Schweizer Beitrag zu *Grid Interconnection of Building-integrated and other Dispersed PV Power Systems* [27] sicher. Die entsprechenden Berichte geben einen Überblick über die existierenden Reglementierungen und die elektrischen Verteilsysteme in den verschiedenen Ländern.

Die Aktivitäten zum Thema **Photovoltaik im Gebäude** werden durch ENECOLO und das LESO koordiniert. Die entsprechenden Arbeiten im *IEA-Programm Solar Heating and Cooling* [27] wurden erfolgreich abgeschlossen. Sie werden ab 1997 im neuen Projekt *PV in Built Environment*, weitergeführt und ausgedehnt.

Nationale Zusammenarbeit

In den einzelnen Teilbereichen des Programms bestehen intensive gegenseitige Kontakte, welche durch entsprechende Zusammenarbeit ergänzt werden. Diese ist vorallem dort ausgeprägt, wo sich die erforderlichen Kompetenzen in einem Projekt günstig ergänzen, so

z.B. zwischen Hoch- bzw. Ingenieurschulen und Planungsunternehmungen sowie der Industrie. Auf der Programmebene besteht mit den relevanten Stellen der öffentlichen Verwaltung und der Elektrizitätswirtschaft eine ausgezeichnete Zusammenarbeit.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit bildet im Programm "Photovoltaik" eine wichtige Komponente, wel-

che im Berichtsjahr weiter intensiviert werden konnte. Das nun seit einigen Jahren laufende Programm der

IEA, *Photovoltaic Power Systems*, zeigt in den verschiedenen Aktivitäten intensive Zusammenarbeit und vermehrte Resultate. Daneben konnte die Beteiligung am EU-Programm Joule in der letzten Ausschreibung erfolgreich ausgedehnt werden. Diese internationale

Zusammenarbeit belegt die anhaltend hohe Qualität der Schweizer Photovoltaikforschung und erlaubt den notwendigen Anschluss an die internationale Entwicklung. Durch die zahlreichen persönlichen Kontakte entstehen auch vermehrt bilaterale Formen der Zusammenarbeit.

Transfer in die Praxis

Aufgrund ihrer Anwendungsnähe einerseits, einer strategischen Bedeutung andererseits, findet für weite Teile der Photovoltaikforschung in der Schweiz ein kontinuierlicher und zunehmender Transfer in die Praxis statt. Dieser Transfer misst sich zum einen in erprobten Lösungen in der Anwendung, zum anderen in einem zunehmenden Interesse der Industrie, vorallem aus den Sektoren Elektrotechnik und Bauindustrie. Dabei sind sowohl die realisierbaren Kostensenkungen

wie auch das erkannte Marktpotential dieser Technologie treibende Kräfte. Vermehrt gelangen industriereife Produkte auf den Markt, nebst dem bisherigen Bereich der Wechselrichter in zunehmendem Masse in der elektrischen Systemtechnik und in Komponenten für die Gebäudeintegration. Qualitätssicherung, Planungshilfen, breite Erfahrungen und Information sind Faktoren, welche die qualitativ hochstehende Anwendung weiter begünstigen.

P&D-Projekte

Thomas Nordmann, Förderprogrammleiter

Die Schweizer P&D-Aktivitäten konzentrieren sich auf den Ausbildungsbereich – von der Elektroberufsschule bis zur Hochschulanlage – sowie auf das Gebiet der Photovoltaik-Gebäudeintegration. Die laufenden Projekte umfassen 17 PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 278 kWp. An 6 dieser 17 PV-Anlagen werden Messungen durchgeführt. Die P&D-Projekte sind im Jahresbericht des Förderprogramms Photovoltaik 1996 ausführlich beschrieben [43]. Die wichtigsten P&D-Projekte mit Tätigkeiten für 1996 sind in der Projektliste aufgeführt [28]-[37].

1996 wurden 7 P&D PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 127 kWp fertiggestellt. Darunter befindet sich ein 20 kWp Projekt an der Ingenieurschule Buchs

SG [32], sowie ein Photovoltaik/Sonnenschutz-Kombinationsprojekt der Stadt Winterthur [36] und die 52 kWp Anlage "Solarbahnhof der Gewerbeschule Luzern" [29].

Gesamthaft wurden im Rahmen des P&D-Programms 9 PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 422 kWp gemessen und ausgewertet. Im P&D-Projekt NOK [34] werden Langzeit-Messungen von 7 weiteren Anlagen nach den EU-Richtlinien ausgewertet. Vom Messprogramm an den Elektroberufsschulen liegen Auswertungen über 289 Messmonate von 17 PV-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 176 kWp vor. Diese Messdaten werden in die Internationale Datenbank der IEA [25] übertragen.

Bewertung 1996 und Ausblick für 1997

Das Programm Photovoltaik konnte 1996 wieder verschiedene wichtige Erfolge verzeichnen. Die Arbeiten des IMT zur mikromorphen Zelle und die bisher erreichten Resultate stossen weltweit auf sehr grosses Interesse; dies vorallem deshalb, weil diese Arbeiten neue und vielversprechende Wege der Dünnschicht-Solarzellen auf der Basis von Silizium aufzeigen. Eine Umsetzung dieser Resultate ist noch verfrüht und erfordert noch einige Jahre intensiver Forschungsarbeit. Mit den am PSI erzielten Resultaten konnte auch für kristalline Zellen der Anschluss an die Weltspitze sichergestellt werden. Angesichts dieser und weiterer hier nicht erwähnter Erfolge kommt einer Umsetzung dieser Resultate in den nächsten Jahren auch in der Schweiz eine immer grössere Bedeutung zu. Es darf nicht sein, dass ein weiteres Mal wichtige Grundlagen erarbeitet werden, welche anschliessend im Ausland umgesetzt und damit der Wertschöpfung in der Schweiz entzogen werden.

Im Gebiet der Modul- und Systemtechnik ist diese Umsetzung bereits weiter fortgeschritten. Das, wenn auch langsam zunehmende Interesse der Industrie belegt, trotz der gegenwärtigen stagnierenden Marktsituation, die strategische Bedeutung dieser Technologie. Selbst bei ungünstiger Wirtschaftlichkeit lässt sich hier ein bestimmtes Marktpotential erschliessen. Immer mehr Lösungen gelangen deshalb als konkrete Produkte auf den Markt und ermöglichen dadurch die angestrebte Vielfalt, die Kostenreduktion und die professionellen Qualität, insbesondere für die Anwendung im bebauten Raum.

Nach den raschen Entwicklungen des Photovoltaikmarktes anfangs der 90er Jahre fand in den letzten Jahren eine teilweise Marktstagnation statt. Im vergangenen Jahr zeigten jedoch einzelne Elektrizitätswerke Initiativen, um auch bei einer ungünstigen Wirtschaftlichkeit eine entsprechende Nachfrage zu generieren, indem sich Kunden individuell und in kleinen Beiträgen an Investitionen oder zu erhöhten Energiepreisen

Photovoltaikstrom sichern können. Es bestehen mittlerweile eine ganze Reihe von Finanzierungsmodellen, welche hierfür zur Anwendung gelangen. Diese Entwicklung sollte in absehbarer Zeit den Markt wieder etwas beleben.

Die grossen internationalen PV-Konferenzen fanden 1996 in den USA und Japan statt. An diesen Konferenzen und aufgrund vieler persönlicher Kontakte entsteht der untrügliche Eindruck, dass sich die Photovoltaik weltweit stärker zu bewegen beginnt. Auch wenn bei weitem nicht alle Ankündigungen ihren konkreten Niederschlag finden und die kurzfristigen Erwartungen vielerorts immer noch zu hoch sind, bleiben genügend Fakten, um festzustellen, dass sich hier etwas tut.

Vor diesem Hintergrund und den eingangs erwähnten Entwicklungen in der Forschung bleibt die Feststellung, dass in der Schweiz mit sehr knappen finanziellen Mitteln ausserordentlich effizient gearbeitet wird.

Es bedeutet aber auch, dass die erreichte Position und das damit verbundene Wissen und Können mittelfristig nur gehalten werden können, wenn der Anschluss an die weltweite Entwicklung sichergestellt ist. Die nächsten Jahre werden darüber entscheiden, inwiefern sich die Photovoltaik in der Schweiz in der ganzen Wertschöpfungskette einen Platz sichern kann.

Das Jahr 1997 wird erneut Gelegenheit bieten den Stand der Photovoltaikforschung national und international zu vergleichen. Im Sommer wird in Barcelona die 14. europäische PV-Konferenz stattfinden und später im Jahr ist eine nationale PV-Tagung vorgesehen. Verschiedene IEA-Projekte werden ihre Sitzungen in der Schweiz abhalten und damit weitere Gelegenheit zu einem vertieften Informationsaustausch bieten. Angesichts der weltweiten Entwicklung der Photovoltaik soll auch im Jahr 1997 die gezielte Information aller interessierten Kreise sichergestellt werden.

Liste der 1996 gelaufenen Projekte

- [1] A. Shah, IMT/UNI-Neuchâtel: *Solarzellen aus amorphem Silizium, phase IV.* (JB+SB) / ENET 9400091 ♦ *HELIOS.* (JB+SB) / ENET 9401261 ♦ *Aluminium-Fassadenelemente mit direkt abgeschiedenen amorphen Silizium-Solarzellen.* (JB) / ENET 9401251
- [2] Ch. Hollenstein, CRPP/EPF-Lausanne: *Grossflächige Abscheidung von amorphen, photovoltaischen Silizium-Schichten.* (JB) / ENET 9400051
- [3] H. Kiess, PSI-Villigen: *Dünne Solarzellen aus kristallinem Silizium.* (SB) / ENET 9200271
- [4] H. Zogg, AFIF/ETH-Zürich: *SWISSCIS.* (JB)
- [5] F. Lévy, IPA/EPF-Lausanne: *EURO-TMDC: MoS₂ and WS₂ thin films for photovoltaic applications.* (JB)
- [6] M. Grätzel, ICP2/EPF-Lausanne: *Cellules solaires basées sur des films semiconducteurs nanocristallins colorés.* (JB) / ENET 9401231
- [7] P. Toggweiler, ENECOLO, Mönchaltorf: *SOFREL : Entwicklung eines flachdach integrierten Photovoltaiksystems.* (JB+SB) / ENET 9200191
- [8] J.-B. Gay, LESO/EPF-Lausanne: *Photovoltaïque sur toits plats - une nouvelle approche.* (JB) / ENET 9554392 ♦ *Installations photovoltaïques intégrées aux marquises de gare.* (JB+SB) / ENET 9400641 ♦ *Site de démonstration d'éléments de construction photovoltaïques intégrés au bâtiment. Phase II* (JB) / ENET 9400261
- [9] M. Weng, ALUSUISSE-LONZA, Neuhausen: *Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen.* (JB) / ENET 9301131
- [10] Chr. Meier, ALPHA REAL: *Untersuchungen für Solarzellenkraftwerk Autobahnüberdeckung.* (JB+SB) / ENET 9400371
- [11] Th. Nordmann, TNC, Männedorf: *Integrale PV-Schallschutz Elemente für den Einsatz entlang von Verkehrsträgern.* (JB+SB)
- [12] V. Crastan, HTL-Biel: *Weiterentwicklung von Wechselrichtern der 20kW Klasse.* (JB+SB) / ENET 9656361 ♦ *Mini-Wechselrichter für direkten Netzanschluss 230 Vac von Solarmodulen.* (JB+SB) / ENET 9300831
- [13] P. Toggweiler, ENECOLO, Mönchaltorf: *Single Cell Module Integrated Converter (SCMIC).* (JB)
- [14] H. Häberlin, HTL-Burgdorf: *Aufbau einer Testanlage für PV-Wechselrichter bis 60kW.* (JB) / ENET 9400561 ♦ *Langzeitverhalten von PV-Anlagen.* (JB).
- [15] M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *Entwicklung eines optimierten Verkabelungssystems für Solarzellenanlagen im Gebäudebereich.* (JB+SB) ♦ *Improving PV system reliability by a new concept including a novel arc detection unit.* (JB) ♦ *PV Checker: Research on low cost PV system checker devices for future application in the individual PV system monitoring.* (JB) ♦ *Modell zur Analyse und Prognose der langfristigen Umweltverträglichkeit verschiedener PV-Technologien.* (JB) / ENET 9008009
- [16] C. Brielmann, EISI, St-Imier: *Programme de recherche sur des cellules PV à haut rendement.* (JB) / ENET 9552187

- [17] M. Camani, DIP. DEL TERRITORIO, Bellinzona: *Tests di componenti e sistemi per progetti nel campo della tecnica fotovoltaica, TISO - periodo IV.* (JB) / ENET 9400931
- [18] M. Keller, EWI, Zürich: *PV-Anlage mit Direkteinspeisung, Park + Ride Neufeld, Bern.* (JB)
- [19] A. Mermoud, GAP/UNI-Genève: *Logiciel pour systèmes photovoltaïques.* (JB) / ENET 9200071
- [20] J.-B. Gay, LESO/EPF-Lausanne: *Capteur hybride d'une nouvelle génération.* (JB) / ENET 9656360
- [21] R. Minder, EWI, Zürich: *Engineering-Handbuch Photovoltaik.* (JB+SB) ♦ *Solarwasserstoffanlage HYDROSOL. Datenerfassung und Evaluation des Anlagenverhaltens.* (JB)
- [22] M. Schubnell, PSI-Villigen: *Thermophotovoltaische Erzeugung von Strom in mit Erdgas betriebenen, wärmegeführten Kleinblockheizkraftwerken.*
- [23] S. Nowak, POLYGON, UNI-Fribourg: *Abschätzung des PV-Flächenpotentials im schweizerischen Gebäudepark.* (JB)
- [24] M. Camani, DIP. DEL TERRITORIO, Bellinzona: *TISO: Valutazione e sorveglianza di lavori nel settore dei sistemi fotovoltaici.* (JB) / ENET 9400991
- [25] L. Clavadetscher, TNC, Männedorf: *Schweizer Beitrag IEA-PVPS Task II.* (JB)
- [26] B. Bezençon, ATLANTIS, Bern: *Schweizer Beitrag IEA-PVPS Task III.* (JB)
- [27] P. Toggweiler, ENECOLO, Mönchaltorf: *Schweizer Beitrag IEA-PVPS Task V, Photovoltaik in Gebäuden. in Zusammenarbeit mit dem entsprechenden IEA-SHCP Task 16, sowie Leitung des Subtask B und Koordination des schweizerischen Beitrages.* (JB+SB) / ENET 9008009

(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden.

P&D-Projekte

- [28] ATLANTIS ENERGIE: *Mobiles Mess-System.*
- [29] Direktion städtische Unternehmungen Luzern: *Luzern Solarbahnhof Gewerbeschule, 52.5 kWp, Anlage + Messung; Luzern.*
- [30] ENECOLO: *Betonelement SCIBEL, Ing., Mönchaltorf.*
- [31] Gesellschaft Sonnenstrom für Ziteil: *PVA Wallfahrtskirche Ziteil, 4 kWp, Anlage + Messung, Ziteil.*
- [32] Interstaatliche Ingenieurschule Buchs: *20 kW Solaranlage Messkampagne, 20 kWp, Messung, Buchs.*
- [33] METEOTEST: *PV-Monitor, Info.*
- [34] NOK: *Megawatt-Solarkette NOK, IEA konforme Datenauswertung; Auswertung.*
- [35] STAR UNITY: *Energie-Ziegel "Sunny Tile", 6 kWp, Anlage + Messung, Fällanden.*
- [36] THEO HOTZ: *Winterthur Shadovoltaik; 37kWp; Anlage + Messung; Winterthur.*
- [37] TNC: *PV-Anlage am Lärmschutz Giebenach, 100 kWp, Giebenach, Anlage + Messung; PV-Anlage SBB Magadino, 100 kWp, Gordola, Messung; PV-Anlage N13 Chur; 100 kWp; Messung, Domat/Ems.*

Referenzen

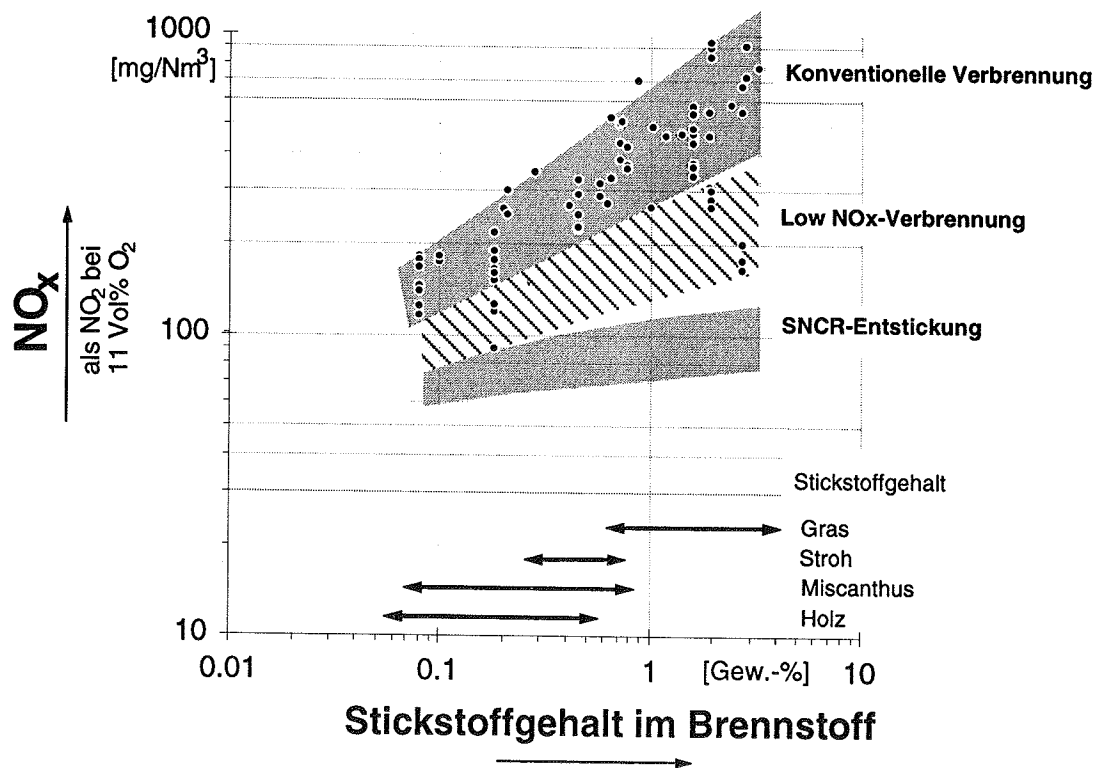
- [38] *Forschungskonzept Photovoltaik 1996 - 1999, S. Nowak, September 1996*
- [39] *Datenbank TISO, Katalogisierte PV Module, TISO, STS, 6952 Canobbio*
- [40] S. Rezzonico, *Status Review of PV Power Applications in Switzerland, July 1996*
- [41] *PV Power, Newsletter of the IEA PVPS Programme*
- [42] *Photovoltaic Power Systems Research and Development - Status, Strategy and Highlights in Switzerland, S. Nowak, March 1996*
- [43] *Förderprogramm Photovoltaik, Jahresberichte 1996, Th. Nordmann, März 1997*

BIOMASSE *

Überblicksbericht 1996
zum Forschungsprogramm 1996

Daniel Binggeli / Martin Hinderling

*) Dieses Forschungsprogramm besteht aus 2 Teilen: Holz (Programmleiter D. Binggeli) und Übrige Biomasse (Programmleiter M. Hinderling).



Stickoxidemissionen bei der Verbrennung von biogenen Brennstoffen

Emissionen in Funktion des Stickstoffgehalts im Brennstoff. Vergleich zwischen konventioneller Verbrennung, Low NOx-Verbrennung mit Luftstufung und SNCR-Entstickung sowie Bereiche typischer Stickstoffgehalte von Holz, Miscanthus (Chinaschilf), Stroh und Gras.

Programmschwerpunkte

Das Forschungsprogramm Biomasse (Bäume und Pflanzen, organische Abfälle aller Art) befasst sich hauptsächlich mit deren Umwandlung in Energie und zu einem geringen Teil mit dem Ernten, Einsammeln und Aufbereiten der Biomasse. Das Programm soll einen Beitrag dazu leisten, dass der Anteil der Biomasse

an der schweizerischen Energieversorgung kontinuierlich erhöht wird. Die Programm-Schwerpunkte 1996-1999 lauten: schadstoffarmes, ökonomisches und effizientes Verbrennen, Vergasen und Vergären, z.T. im Hinblick auf die energetische Nutzung der sog. nachwachsenden Rohstoffe.

Anvisierte Zielpunkte für 1996

Die Zielpunkte 1996 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Voraussetzungen für die Verbreitung von Holzheizungen weiter verbessern: energetischer Wirkungsgrad, Abgasemissionen, Abgaskondensation, Wirtschaftlichkeit (Holz, Altholz)
- Nachweis an 1 oder 2 Vergasern, dass diese in der Lage sind, ein Gas zu produzieren, das sich für motorische Nutzung eignet

- Vergären von Abfällen verschiedener Herkunft: Forschungs-Lücken schliessen; Vergärungsanlagen im ländlichen Raum: Entwicklung vorantreiben
- Interdisziplinäres Forschungsprojekt Energiegras/Feldholz abschliessen.
- Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren (Selektive nicht-katalytische Reduktion) abschliessen.

Im Jahr 1996 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

BIOMASSE BEREITSTELLEN

Vergleich der Wertschöpfung der Mittelwaldbewirtschaftung und Niederwaldbewirtschaftung mit der Wertschöpfung der Hochwaldbewirtschaftung [1]: Die Studie weist nach, dass sich mit der ehemals verbreiteten Mittelwaldbewirtschaftung ("Niederwald" ist ein Wald mit keinem, "Mittelwald" mit nur wenig grosskalibrigem Stammholzanteil) Energieholz kostengünstig produzieren lässt, vor allem dank rationellen

Erntemethoden. Demgegenüber erweist sich die Niederwaldbewirtschaftung als weniger interessant.

Aspects énergétiques des filières d'élimination et de valorisation des déchets animaux [2]: Im Zusammenhang mit dem Rinderwahnsinn werden die Energiebilanzen verschiedener Wege zur Entsorgung problematischer Tierabfälle abgeklärt. Die Kenntnis dieser Bilanzen könnte dann wichtig werden, wenn plötzlich grosse tierische Abfallmengen entsorgt werden müssten.

BIOMASSE UMWANDELN

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Aufgrund der Versuchsergebnisse des abgeschlossenen Projekts Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen [3] können nun die Charakteristiken der untersuchten oder ähnlichen Aggregate, beziehungsweise Bauweisen der Hypokausten-Wärmeerzeugungsanlagen im Einfamilienhaus für Planung und Ausführung mit verlässlichen Daten beschrieben und dimensioniert werden. Der Schlussbericht ist im Frühjahr 1997 zu erwarten.

Entwicklung einer emissionsarmen Kleinschnitzelheizung (NEFF): Das gewählte und für geringe Emissionen weiterentwickelte Feuerungsprinzip konnte in einem Kessel realisiert werden und zeigt, wie eine automatische Holzheizung kleiner Leistung (Leistungsregelung 30-60kW, automatische Zündung) eingesetzt werden kann. Die Feuerung soll dank geeigneter Bauweise und Regelung geringe Verluste durch Strahlung und Konvektion aufweisen und im Praxiseinsatz einen hohen Jahresnutzungsgrad und einen hohen Bedienungskomfort gewährleisten.

MIMI, Kochen und Heizen mit Holz [4]: Ein neues Koch- und Heizgerät, eingesetzt vor allem in zeitgemäss isolierten Ein- und Mehrfamilienhäusern, soll ermöglichen, wahlweise zu kochen und/oder zu heizen. Das Funktionsmuster hat gezeigt, dass sich diese Idee realisieren lässt. Der Schlussbericht ist Mitte 1997 zu erwarten.

Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren zur Entstickung von Holzfeuerungen [5]: Die Auswertungen von Messungen an drei Anlagen mit Wald-, Rest- und Altholz zeigen, dass im Praxisbetrieb eine hohe Entstickung zwischen 70% und 90% möglich ist, wenn die Feuerungsleistung annähernd konstant gehalten werden kann. Aufgrund der Reduktionskammer werden zusätzlich sehr niedrige CO-Emissionen erreicht. Die Mehrkosten bezogen auf die ganzen Anlagen wurden zwischen 25-30% errechnet. Eine Bewertung der Verfahren SNCR, SCR und Low-NOx ist im Bericht vorhanden.

Das Konzept der **Low NO_x-Holzfeuerung** [6] mit zweistufiger Verbrennung und Reduktionskammer wurde an einer praxisgerechten automatischen Holzfeuerung realisiert und es wurden massgebliche NO_x-Minderungen bei Verbrennen von Waldhackschnitzeln und Restholz erreicht. Die Erfahrungen im Berichtsjahr haben jedoch gezeigt, dass Temperaturprobleme in der Reduktionszone entstehen. Weitere Versuche an einer konstruktiv anderen 200 kW Low NO_x-Prototypanlage zeigen, dass die Temperatur eingehalten werden kann. Es werden nun Versuche zur Sekundärluftvorwärmung sowie die Inbetriebnahme der Prozessregelung geplant.

Im Projekt **Abgaskondensation bei Holzfeuerungen** [7] wird ein Systemvergleich für verschiedene Techniken zur Abgaskondensation bei Holzfeuerungen und eine Betriebsanalyse bei der ersten kommerziellen Abgaskondensationsanlage an einer Holzfeuerung in der Schweiz durchgeführt.

Die Betriebsoptimierung einer Altholzfeuerung zur Minimierung der Langzeitemissionen [8] zeigt, dass durch Anpassung der Feuerungsleistung an den effektiven Wärmebedarf und durch optimale Speicherbewirtschaftung die CO-Tagesmittelwerte stark reduziert werden können. Es wird gewünscht, dass vom Planer für zukünftige Anlagen energetische und lufthygienische Minimalanforderungen im Praxisbetrieb verlangt und im Werkvertrag ausgewiesen werden.

Energetische Nutzung von Biomasse (Hofdünger) [9]: Dieses Projekt untersucht, wie sich ein Teil der überschüssigen Hofdüngermengen aus der Landwirtschaft energetisch nutzen lässt (verbrennen, eventuell vergären) und wie durch teilweise Wiedergewinnung der Nährstoffe auch indirekt Energie eingespart werden kann.

UNIGAS [12]: Die positive Wirkung der Drehbewegung auf den Vergasungsvorgang konnte nicht nach

gewiesen werden. Die Wirkung des Drehbetriebs kann somit nicht abschliessend beurteilt werden.

Einfluss von Schwermetallen und Chlor auf die Vergasung von Altholz und ähnlichen Abfällen [10]: Ziel dieses Projektes ist, den Einfluss von Fremdstoffen auf die Produktzusammensetzung (Gase, Teere, Asche) von Wirbelschichtvergäsern zu ermitteln.

Vergasung verschiedener Holzfraktionen mit einem Doppelfeuervergaser [11]: Nach mehr als 500 Stunden Betriebszeit musste dieser Vergaser weder gereinigt, noch aufwendig gewartet werden. Vermutlich müsste man auch bei längerem Betrieb nicht mit ernsthaften Materialproblemen infolge schlechter Gasqualität rechnen.

Adaptation du gazéificateur IISc pour une application en Suisse [13]: Die Resultate des im Jahre 1996 durchgeführten Messprogramms zeigen, dass man mit guter Erfolgsaussicht die Anschluss-Phase beginnen kann, nämlich den Betrieb eines Motors mit dem erzeugten Holzgas.

Festbettvergaser für SGF (Standardised Gasifier Fuel) [14]: Das Ziel dieses EU-Projektes besteht darin, für standardisierten (brikettierten) Biomasse-Brennstoff einen kostengünstigen Vergaser für die Stromerzeugung mit Motoren zu finden. Hauptziel des schweizerischen Beitrages ist, die für kleine Vergaser geeigneten Gasreinigungs-Systeme zu finden und im praktischen Einsatz auszutesten.

Das NEFF-Projekt **Vergasung biogener Brennstoffe zur Strom- und Wärmerzeugung** ist im Berichtsjahr abgeschlossen worden. Gemäss den Messergebnissen eines Wochentests kann der Vergaser aus Altholz ein Gas produzieren, das für die motorische Nutzung verwendet werden kann. Der ausgewiesene Kaltgaswirkungsgrad ist allerdings relativ tief.

b) Biogene Abfälle vergären

Das Projekt **Digestion en discontinu d'herbes énergétiques** [2] klärte ab, inwiefern sich Energiegras (Gras, Silage, Heu) zusammen mit Mist vergären lässt. Am besten funktioniert dies beim Gras, wobei für diesen Fall die anfallende Wärme praktisch nicht genutzt werden kann. Zudem hat sich erwiesen, dass die Zubereitung des Gärgut-Gemisches aufwendig ist und schlecht in den Arbeitsablauf eines landwirtschaftlichen Betriebes hineinpasst.

Vergärung von häuslichen Abfällen im ländlichen Raum [15]: Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung und Erprobung eines Anlagekonzeptes für die gemeinsame Vergärung von rund 2000 Jahrestonnen Grüngut und Mist. Bisher konnten keine stabilen Gärprozessbedingungen erreicht werden.

Etude de critères permettant l'évaluation des systèmes de méthanisation de déchets organiques ménagers, industriels, et des vieux papiers, en Suisse [2]: Die in diesem Projekt entwickelte Methode mit Öko-Punkten erlaubte, den optimalen Grad der Dezentralisierung von Anlagen zum Vergären von häuslichen organischen Abfällen zu ermitteln. Die Methode eignet sich nach

entsprechender Anpassung auch für zahlreiche andere Fragestellungen.

Etude de la digestion de graisses végétales [2]: Die Batchversuche in Kleinfermentern haben gezeigt, dass die Fettvergärung stark behindert wird, wenn die Fettkonzentration im Substrat 10 Vol.% überschreitet.

Zweistufige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen [16]: Dieses Projekt wies nach, dass leicht abbaubare biogene Abfälle (Haushalts- und Gewerbeabfälle usw.) mittels einer 2-stufigen Vergärung in weniger als 5 Tagen zu 80% abgebaut werden können. Es zeichnet sich ab, dass in der Praxis die 2-stufige Vergärung von leicht abbaubarer Biomasse im Vergleich zur einstufigen deutlich kleinere Fermentervolumen benötigt.

Die vom Kanton Bern und vom NEFF finanzierte Studie **Co-Vergärung von festen und flüssigen Substraten** wies in einem 14-monatigen Versuchsbetrieb nach, dass sich organische Gewerbeabfälle mit Erfolg gemeinsam mit Kläranlage-Faulschlamm vergären lassen.

Einfluss der Zugabe von Sauerstoff zur Hydrolyse beim 2-stufigen aeroben Abbau von biogenen Abfallstoffen [16]: Hier geht es darum nachzuweisen, ob eine beschränkte Sauerstoff-Zugabe den Abbauprozess nicht behindert oder eventuell gar verbessert. Gelingt der Nachweis, darf man sich davon konstruktive Vereinfachungen beim Anlagebau versprechen.

KOMPOGAS-Prozess [17]: Eine breite Palette von Untersuchungen gestattete es, verschiedene noch offene Detailfragen beim KOMPOGAS-Prozess zu beantworten: Bestätigung des "Pfropfstromverhaltens" des Grüngutes im Fermenter; Evaluation der verschiedenen Verfahren zur Abtrennung der Feststoffe aus dem Presswasser; Behandlung des von den Feststoffen befreiten Abwassers; Kompostuntersuchungen mit

c) Energiepflanzen

Projekt Energiegras/Feldholz [20]

Um die Überproduktion in der Landwirtschaft zu reduzieren, gilt es, Anbauflächen aus der Lebensmittel- und Futtermittelproduktion herauszunehmen. Werden diese Flächen anders bebaut, oder bleiben sie brach: Immer fällt Biomasse an, die energetisch genutzt werden kann, fossile Energien substituieren hilft, die CO₂-Fracht vermindert und damit einen Beitrag an die Ziele von Energie 2000 liefert. In diesem Umfeld will das Projekt Energiegras/Feldholz landwirtschaftspolitische mit energiepolitischen Zielen verbinden, unter Berücksichtigung der ökologischen Randbedingungen.

Das interdisziplinäre Projekt [20] wurde aufgeteilt in die Teilprojekte: Anbau von Energiegräsern, Chinaschilf; Anbau von Feldholz; Verbrennung und Vergärung von Energiegras und Feldholz; Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung; Stoffflüsse; Ökobilanz; Ökonomie; Logistik.

Ziel war abzuklären, ob die energetische Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz technisch machbar ist und welches die Konsequenzen bezüglich Wirtschaftlichkeit und Ökologie sind. Im Vordergrund stand die energetische Nutzung von Grünland (d.h. von Naturwiesen und mehrjährigen Kunstwiesen), Chinaschilf und Feldholz.

Drei Konversionswege wurden untersucht: Die **Vergärung** ist im angestrebten Leistungsbereich (1 - 2 MWth) nicht praxistauglich. Sie wurde nur am Rande weiter bearbeitet. Die **Verbrennung** von Feldholz kann jener von Waldholz gleichgesetzt werden und stellt keine besonderen Probleme. Anders die Verbrennung von Gras und Chinaschilf: Infolge des tiefen Ascheschmelzpunktes, des Chlor- und des Staubgehaltes sind dies schwer handbare Brennstoffe. Die Feuerungen müssen entsprechend angepasst werden. Die Anforderungen hierfür sind erarbeitet worden. Die **Vergärung** von Gras kann in Feststoff-Fermentern und in Flüssig-Systemen erfolgen. Die nötigen Dimensionierungsgrundlagen für den Betrieb von Praxisanlagen wurden bereitgestellt.

durchwegs positivem Resultat; Möglichkeit zur Nutzung des Presswassers.

Einsatzmöglichkeit von Papier- oder Kunststoffsäcken bei der Einsammlung von Grünabfällen und Abbau in Gäranlagen [18]: Das Wissen wurde zusammengetragen und ausgewertet, um die Vor- und Nachteile von Grünabfuhr mittels Papier- und Kunststoffsäcken im Vergleich zu jener mittels Grün-Container darzustellen und in einer Kurzbroschüre zu veröffentlichen.

PC-Programm zur Berechnung der Biogasproduktion [19]: Ein benutzerfreundliches Windows-Programm wird im Frühjahr 1997 vorliegen, das zeitsparende umfassende Machbarkeitsabklärungen für den Bau von Biogasanlagen erlaubt.

Die **Aufbereitungsform** (Pellets oder Quaderballen) hängt stark vom gewählten Feuerungssystem und von der Leistungsgrösse ab. Für die Vergärung kann Heu oder Silage als Ausgangsmaterial dienen. Der **Anbau** von Reinsaat mit einheimischen Gräsern liefert ähnlich hohe Erträge wie Chinaschilf. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht am günstigsten sind sog. low-input-Systeme, bei welchen nicht der Ertrag maximiert, sondern der Aufwand minimiert wird. **Feldholz** schneidet besonders hinsichtlich Verbrennungseigenschaften und Umweltwirkungen sehr gut ab. Allerdings sind noch keine langfristigen Ertrags-Schätzungen möglich.

Heute ist die energetische Nutzung von Energiegras und Feldholz noch nicht wirtschaftlich. Internalisiert man - so weit dies möglich ist! - die externen Kosten, liegt die Vergärungs-Linie bereits günstiger, die Verbrennungs-Linie sogar deutlich günstiger als die Erdöl-Linie. Im Vergleich zur konventionellen Energiebereitstellung (Erdöl, Gas), bringt die energetische **Nutzung von Gras, Chinaschilf und Feldholz eine deutlich geringere Umweltbelastung.**

Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf, Stroh und Holz [8]: Insgesamt weisen Aschen aus Gras, Chinaschilf und Hanf ein wesentlich besseres Nährstoff-/Schadstoff-Verhältnis auf als Holzasche, Kompost oder Klärschlamm, so dass eine Verwertung als Abfalldünger zulässig ist.

Das Projekt Energiegras/Feldholz stellt viel Grundlagenwissen bereit, das in einer Folge-Etappe möglichst gut genutzt werden soll (die Realisierung einer Pilot- und Demonstrationsanlage ist vorgesehen).

Der im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft erstellte Bericht **Bewertung nachwachsender Rohstoffe** (der Schlussbericht liegt voraussichtlich Ende Februar 1997 vor) scheint die Resultate des gleichnamigen Zwischenberichtes von November 1995 zu bestätigen.

SYSTEME UND EINZELPROJEKTE

Im Projekt **Energie aus Holz, Vergleich von Nutzungsvarianten** [21] sollen die verschiedenen Arten der Nutzungsvarianten für Holzenergie auf ökologischer und ökonomischer Basis miteinander verglichen werden.

Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Ethanol aus Biomasse [22]: Es wurde experimentell gezeigt, dass die räumliche und zeitliche Integration von Fermentation und Pervaporation möglich ist und den angestrebten kontinuierlichen Produktaustrag aus der Fermenterbrühe erlaubt. Das *up-scaling* ist aber mindestens vorerst schwierig.

Biometh [23]: Die Machbarkeitsstudie zeigte, dass Methanol als Treibstoff in der Schweiz mit heute verfügbarer Technologie aus entsorgungspflichtigen Abfällen erzeugt und im Strassenverkehr genutzt werden kann. Die technischen Unsicherheiten und Risiken erscheinen relativ gering, auch wenn bezüglich Vergärungstechnologie und Gasaufbereitung noch einige Unsicherheiten bestehen und vor einer Realisierung der Einsatz der vorgesehenen Rohstoffe in einem Pilotvergaser des Anlagebauers getestet werden müsste.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit zwischen zahlreichen Bundesstellen, andern öffentlichen Institutionen, Ingenieurbüros usw. erfolgte auf nationaler Ebene wie bis anhin. Nach wie vor gibt es wenig firmeneigene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, und man darf davon ausgehen, dass die grosse Mehrzahl der F+E-Projekte im Bereich Biomasse von öffentlichen Institutionen finanziert oder mindestens mitfinanziert werden. Die Zahl der Forscher ist relativ klein und der Wissensaustausch einfach.

Als BEW-Partner und Akteure nationaler Zusammenarbeit wären etwa zu nennen - die Aufzählung ist nicht abschliessend: BLW, BUWAL, praktisch alle landwirtschaftlichen Forschungsstellen, Fachhochschulen ETHZ, ETHL, Paul Scherrer Institut PSI, Universität Neuenburg, HTL Brugg-Windisch, diverse forstwirtschaftliche Dienste, Anlagebauer v.a. aus der Holzheizungs- und Fermenterbranche.

Auch auf internationaler Ebene erfolgt eine rege Zusammenarbeit: Zum einen wird sie durch persönliche Kontakte von Projektleitern, z.B. anlässlich von internationalen Konferenzen und Seminaren, ausgelöst.

Zum andern haben sich innerhalb des 4. EU-Rahmenprogrammes für Forschung und Entwicklung, Ausschreibungsthema "Nicht-nukleare Energie", bereits recht zahlreiche und vielversprechende Beziehungen zwischen Schweizer Institutionen und Ingenieurbüros einerseits und EU-Ländern andererseits angebahnt. Schliesslich verweisen wir auf die Mitgliedschaft der Schweiz im *IEA Bioenergy Agreement*. Dessen Zielsetzung besteht darin, im Bereich Forschung, Entwicklung, Demonstration sowie Informationsaustausch zusammenzuarbeiten. Die Schweiz beteiligt sich an den Projekten *Biomass Utilization* und *Energy Recovery from Municipal Solid Waste* des *Agreement*, in 3 *Activities* (*Biomass Combustion*, *Biomass Gasification*, *Anaerobic Digestion of MSW*), mit 3 Experten, die den Informationsaustausch in "beiden Richtungen" sicherstellen. Die genannten Projekte laufen Ende 1997 aus. Eine *Task Force Group* innerhalb des *Executive Committee* (*Bioenergy Agreement*) ist beauftragt, das Arbeitsprogramm ab 1998 so weit vorzubereiten, dass die einzelnen Länder im Frühjahr 1997 entscheiden können, ob und wie sie weiterhin mitmachen möchten.

Umsetzung in die Praxis, P&D-Projekte

Öffentlichkeit und Fachleute wurden mittels Publikationen, Fachartikeln, Vorträgen, Tagungen Seminaren usw. über den Stand von Forschung, Entwicklung und Demonstration in verschiedenen Biomasse-Teilbereichen informiert. Zu erwähnen wäre etwa: 4. Holzenergie-Symposium an der ETH Zürich mit Vorträgen be-

a) Biomasse verbrennen und vergasen

Verbrennungsregelung an einer Stückholzfeuerung [24]: An einem Stückholzbrenner-Bausatz mit unterem Abbrand für das Hafnergewerbe ist eine Leistungs- und Feuerungsregelung auf der Basis der *Fuzzy-Technologie* angepasst worden. Sie soll zusätzlich zum Bedienungskomfort die Schadstoffemissionen reduzieren und die Verbrennungsleistung optimieren. In einem anschliessendem zweiten Teil dieses Projektes sollen in einem Feldversuch fundierte Daten erfasst werden, um das Verhalten in der Praxis zu prüfen.

treffend Holz und Übrige Biomasse; zahlreiche Veranstaltungen im Rahmen der Beschleunigungsaktion "Energie aus Vergärung" (Tag der offenen Türe, Forum mit Vertretern der Vergärungsbranche usw.); Presseinformationen Logistik etc.

Im Projekt **Innovationsimpuls Klein-Schnitzel-feuerung** [25] wird mit einem Industriepartner eine Feuerungsanlage ausgearbeitet, bei welcher die Erkenntnisse aus einem DIANE-Messprojekt in vier Klein-Schnitzelfeuerungen einfließen konnten. Erste Messungen haben gezeigt, dass der Nutzungsgrad der Anlage über die Heizperiode 76% beträgt, was zu vergleichen ist mit den Jahresnutzungsgraden von weniger als 40% bei den DIANE-Messprojekten.

b) Tier- und Pflanzenabfälle vergären

In der **Regionalen Kompostier- und Vergäranlage "Allmig"** (Baar, [26]) laufen die Anlageteile Kompostierung und Vergärung zufriedenstellend. Allerdings muss noch der Wasserhaushalt der Rotteboxen optimiert werden.

In zwei Schritten (**Kompo-Mobil I und Kompo-Mobil II**, [15]) konnte die Verfahrenstechnik für die Umwandlung von Biogas zu Methan so weit vorangetrieben werden, dass nun praxiserprobte Gasaufbereitungsverfahren auf dem Markt erhältlich sind.

c) Energiepflanzen

Auch im letzten Jahr des von 1992 bis 1996 laufenden Projektes **Energiegras/Feldholz** konnte kein Standort für den Bau einer Pilotanlage gefunden werden.

In der **Bioenergie-Produktionsanlage für pflanzliche technische Öle, Schmierstoffe und Treibstoffe** [27] ist nach den Rapsernten 1994 und 1995 nun die Ernte 1996 in der Verarbeitung. Nach einigen Änderungen und Anpassungen läuft die Anlage problemlos.

Nach Überwindung zahlreicher Schwierigkeiten können nun in der **Raps-Methylester-Anlage von Etoy (VD)** [28] täglich rund 7500 Liter Biodiesel erzeugt werden. Die Anlage kann bis 2000 ha Rapsfläche verarbeiten.

Beurteilung 1996 und Perspektiven für 1997

Die Vielzahl der vorhandenen Biomasse-Arten bringt es mit sich, dass das Program recht breit gefächert ist. Es konnte im grossen Ganzen wie geplant durchgeführt werden. Bei der Verbrennung von Holz gehört die Schweiz zu den führenden Staaten. Das Schwergewicht liegt bei der Demonstration und der Marktunterstützung. Bei der Vergasung (von Holz und übriger Biomasse: Historisch bedingt, sind die entsprechenden F+E-Aktivitäten Bestandteil des Programmes Übrige Biomasse, die P&D-Anlagen Bestandteil des Programmes Holz) kommt man stetig voran. Bei der Verbrennung von Energiegras (im weiten Sinne des Begriffes) liegen wichtige Resultate vor, die auf Umsetzung warten.

Insgesamt haben die Forschungsprojekte wiederum beachtliche, wenn auch nicht spektakuläre Resultate

und Fortschritte erzielt. Leider bestimmt die neue Mineralölsteuerverordnung zum Mineralölsteuergesetz, dass auch Treibstoff aus erneuerbaren Energien besteuert werden muss. Von der Steuer ausgenommen sind nur - unter gewissen Voraussetzungen - Treibstoffe, die in P&D-Anlagen gewonnen werden. Gesamthaft gesehen verschlechtert sich damit die Marktsituation der Treibstoffe aus erneuerbarer Energie: Vor Inkrafttreten des Gesetzes waren sie steuer- bzw. zollfrei, nach Inkrafttreten nicht mehr.

Das Programm 1997 wird im wesentlichen die bisherigen Zielsetzungen weiterverfolgen und für Kontinuität besorgt sein. Man kann davon ausgehen, dass hierfür etwa die gleichen finanziellen Mittel wie 1996 zur Verfügung stehen werden.

Projektliste

F+E-PROJEKTE

- [1] B. Bally, AMBIO, Zürich: *Vergleich der Wertschöpfung der Mittelwaldbewirtschaftung und Niederwaldbewirtschaftung mit der Wertschöpfung aus Hochwaldbewirtschaftung, durchgeführt anhand ausgewählter Standorte* (SB)
- [2] Y. Membrez, EREP, Aclens: *Aspects énergétiques des filières d'élimination et de valorisation des déchets animaux* (SB) ♦ *Digestion en discontinu d'herbes énergétiques* ♦ *Etude de critères permettant l'évaluation des systèmes de méthanisation de déchets organiques ménagers, industriels, et des vieux papiers, en Suisse* (SB) ♦ *Etude de la digestion de graisses végétales* (SB+JB, ENET 9653457)
- [3] P. Siegl u. K. Imbach, HYPOKAUSTEN-HEIZUNGEN, Weesen: *Holzbetriebene Hypokausten-Heizungen* (SB)
- [4] A. Riemens u. B. Salerno, GAAN und ALTENO, Zürich: *MIMI, Kochen und Heizen mit Holz* (JB, ENET 9652672)
- [5] R. Bühler, BÜHLER/IEU/VERENUM, Maschwanden: *Erfolgskontrolle SNCR-Verfahren zur Entstickung von Holzfeuerungen* (SB)
- [6] Th. Nussbaumer u. R. Salzmann, IfE/ETH-Zürich: *Low NOx-Holzfeuerung* (JB ENET 9653890 und 9653891)
- [7] Th. Nussbaumer, VERENUM, Zürich: *Abgaskondensation bei Holzfeuerung* (JB, ENET 9658108)
- [8] P. Hasler u. Th. Nussbaumer, VERENUM, Zürich: *Betriebsoptimierung einer Altholzfeuerung zur Minimierung der Langzeitemissionen* (SB) ♦ *Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf, Stroh und Holz* (SB)

- [9] KANT. FACHSTELLE F. ENERGIE/AMT FÜR UMWELTSCHUTZ, Luzern: *Energetische Nutzung von Biomasse* (SB)
- [10] L.C. de Sousa u. S. Stucki, PSI-Villigen: *Einfluss von Schwermetallen und Chlor auf die Vergasung von Altholz und ähnlichen Abfällen* (JB, ENET 9655229)
- [11] W. Etschmann, HYDROTEST, Emmenbrücke: *Vergasung verschiedener Holzfraktionen mit einem Doppelfeuervergaser* (JB, ENET 9657308)
- [12] M. Müller u. W. Schlachter, HTL-Brugg-Windisch: *UNIGAS* (SB)
- [13] H. Sharan, CENTRE DE COMPÉTENCE-Châtel-St-Denis/DASAG/EICHER+PAULI, Châtel-St-Denis: *Adaptation du gazéificateur IISC - DASAG pour une application en Suisse* (SB+JB, ENET 9653313)
- [14] R. Bühler, HOVERGA, Maschwanden: *Festbettvergaser für SGF (Standardized Gasifier fuel)* (JB, ENET 9654959)
- [15] K. Egger u. U. Meier, INFOENERGIE, FA-Tänikon: *Vergärung von häuslichen Abfällen im ländlichen Raum* (JB, ENET 9651351) ♦ *Kompo-Mobil I* (SB) ♦ *Kompo-Mobil II* (SB)
- [16] M. Gradenecker u. W. Edelmann, ARBI, Maschwanden: *Zweistufige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen, Phase III* (SB) ♦ *Einfluss der Zugabe von Sauerstoff zur Hydrolyse beim zweistufigen anaeroben Abbau von biogenen Abfallstoffen* (JB, ENET 9658427)
- [17] W. Schmid, Glattdbrugg: *KOMPOGAS-Prozess* (SB)
- [18] ANS Schweiz, Baden: *Grünabfuhr mit Säcken? Eine Information für interessierte Praktiker* (SB)
- [19] A. Wellinger, NOVA ENERGIE, Ettenhausen: *PC-Programm zur Berechnung der Biogasproduktion* (JB, ENET 9657307)
- [20] J.-L. Hersener, FA-Tänikon: *Projekt Energiegras/Feldholz* (SB)
- [21] R. Bühler, I.G. HOLZENERGIE: *Energie aus Holz, Vergleich von Nutzungsvarianten; Phase I* (JB)
- [22] S. GRASS FERMENTATIONSSYSTEME, Zürich: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von Ethanol aus Biomasse* (SB)
- [23] J. Leuenberger u. S. Stucki, PSI-Villigen: *Methanol aus Biomasse (Biometh)* (SB)

P&D-PROJEKTE

- [24] C. Chiquet, UNES HANDELS, Ormalingen: *Verbrennungsregelung an einer Stückholzfeuerung für Ofensetzer* (JB, ENET 9655081) (SB)
- [25] A. Jenni, M. Wiget, I/E/U, Liestal: *Innovationsimpuls Klein-Schnitzelfeuerung* (JB)
- [26] H. Brotschi, A. MÜLLER, Baar: *Regionale Kompostier- und Vergäranlage "Allmig"* (JB, ENET 9650764)
- [27] U.C. Knopf, AGROGEN, Freiburg: *Bioenergie-Produktionsanlage für pflanzliche technische Öle, Schmierstoffe, Treibstoffe* (SB)
- [28] P.A. Tardy, CH. VAUD. AGRICULTURE, Lausanne: *Transformation de colza en carburant pour moteurs diesel, à Etoy* (JB)

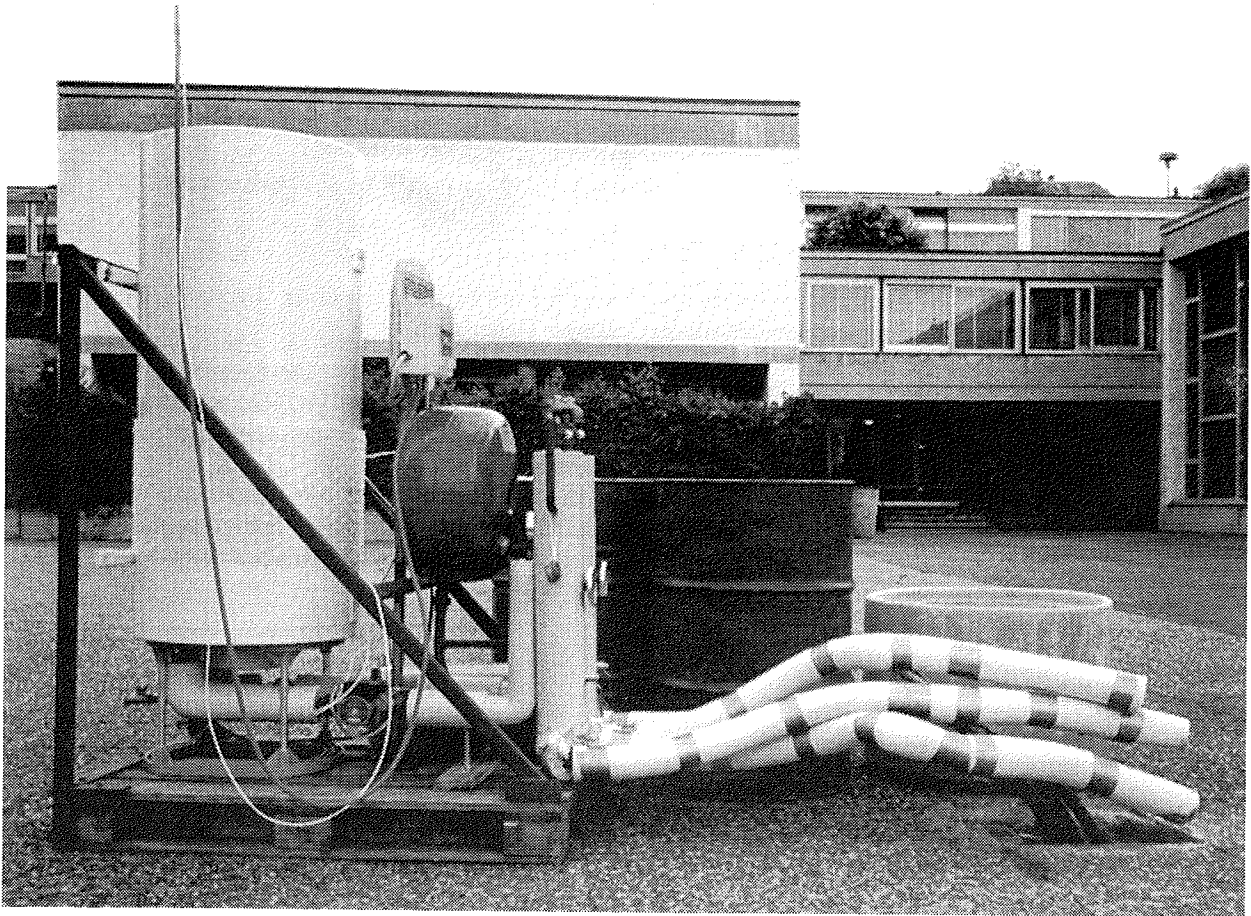
(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

GEOTHERMIE

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Harald L. Gorhan



Thermische Leistungsprüfung einer Erdwärmesonde

Im dargestellten Injektionsversuch dient ein Boiler (4 kW) von 100 l Inhalt als Wärmelieferant. Eine Umwälzpumpe fördert ein Wasser-Glykol-Gemisch durch die Sonden. Die Zuleitungsrohre sind gut isoliert. Gemessen wird die ans Erdreich abgegebene Wärmeleistung.

Programmschwerpunkte und Ziele für 1996

Geothermische Felder werden seit Jahrzehnten weltweit zur Strom- und Wärmeproduktion genutzt. *Deep Heat Mining* (früher *Hot Dry Rock*, HDR-Technologie) ist eine Anwendung dieser konventionellen Technologie in Gebieten ohne vorteilhafte geothermische Bedingungen (z.B. bedingt durch einen normalen geothermischen Tiefengradienten).

Ein erster Meilenstein wurde mit dem Erreichen der folgenden Ziele bis Ende 1996 gesetzt:

- Ausscheiden günstiger Regionen, die für eine Erstellung der ersten HDR-Anlage in der Schweiz in Frage kämen
- Erste Angaben über mögliche Anlagentypen und notwendige Rahmenbedingungen
- Erste Kontakte mit potentiellen Finanzierungsstellen; PR-Tätigkeiten
- Planung der "Machbarkeit"

Um möglichst viel am ausländischen Wissen über den *state of the art* in der HDR-Technologie teizuhaben,

wurde und wird gezielt eine enge Mitarbeit mit ausgewählten HDR-Projekten der IEA (Internationale Energie Agentur) angestrebt.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von konventionellen Erdwärmesonden-Anlagen. Im Zentrum standen hier Verbesserungen – bei gleichzeitiger Verbilligung – von Bohrtechnologien. Ausserdem sollten die Voraussetzungen zur Erhöhung der Erdwärmesonden (EWS)-Dichte im Kanton Jura näher untersucht werden. Dieser Kanton weist noch ein beachtliches Potential für die Verwendung dieser geothermischen Nutzungsmethode auf. Allerdings müssen dabei die speziellen, geologischen Untergrundverhältnisse (Karst-Aquifere) im Jura besonders berücksichtigt werden.

Bei der tiefen, hydrothermalen Geothermie wurden mögliche, gegenseitige Beeinflussungen von Produktionsbohrungen an praktischen Beispielen untersucht bzw. mit Finite Elementen-Programmen simuliert.

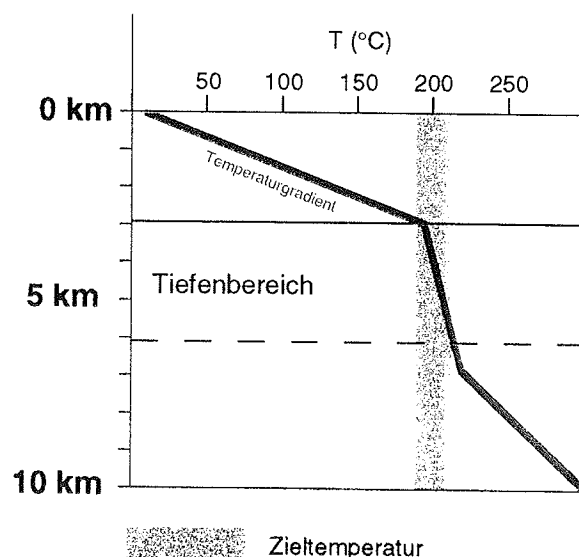
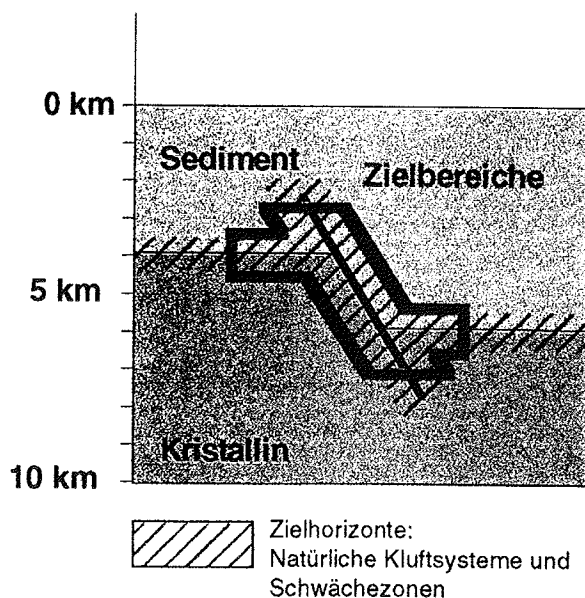
1996 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

DEEP HEAT MINING (DHM), KONZEPTPHASE [1]

Gezieltes Richtbohren, hydraulische Klüftungs-Techniken, Reservoirstimulationen und geophysikalische Bohrlochaufnahmen in grossen Tiefen sind Techniken, die zur Erschliessung von Öl- und Gasreservoirs schon entwickelt wurden. Sie können gleichermassen zur Entwicklung eines Heisswasserreservoirs angewendet werden, wie dies bereits erfolgreich in der Pilotanlage Soultz-les-Forêts (Elsass) getestet wurde. Die gemachten Erfahrungen zeigen, dass Felsformationen mit offenen, wasserführenden Klüften besonders günstig

sind für die Entwicklung eines Wärmetauschers in grösseren Tiefenlagen.

Aussergewöhnlich hohe geothermische Gradienten beobachtet man entlang von Grabenstrukturen. Dies trifft insbesondere für den nordschweizerischen Permo-karbtrog zu, der im Laufe der NAGRA-Felduntersuchungen entdeckt wurde. Als weitere Zielgebiete kann der südöstliche Rheingrabenrand und dessen südliche Erweiterung betrachtet werden.



In der Schweiz werden besonders günstige geothermische Verhältnisse entlang regionaler Grabenbrüche erwartet und gerade dort, wo die Kristallin-Sedimentgrenzfläche tektonisch und nicht stratigraphisch bedingt ist [1].

Bei der Standortwahl spielt die Einspeisung von produziertem Strom in das Netz eine eher untergeordnete

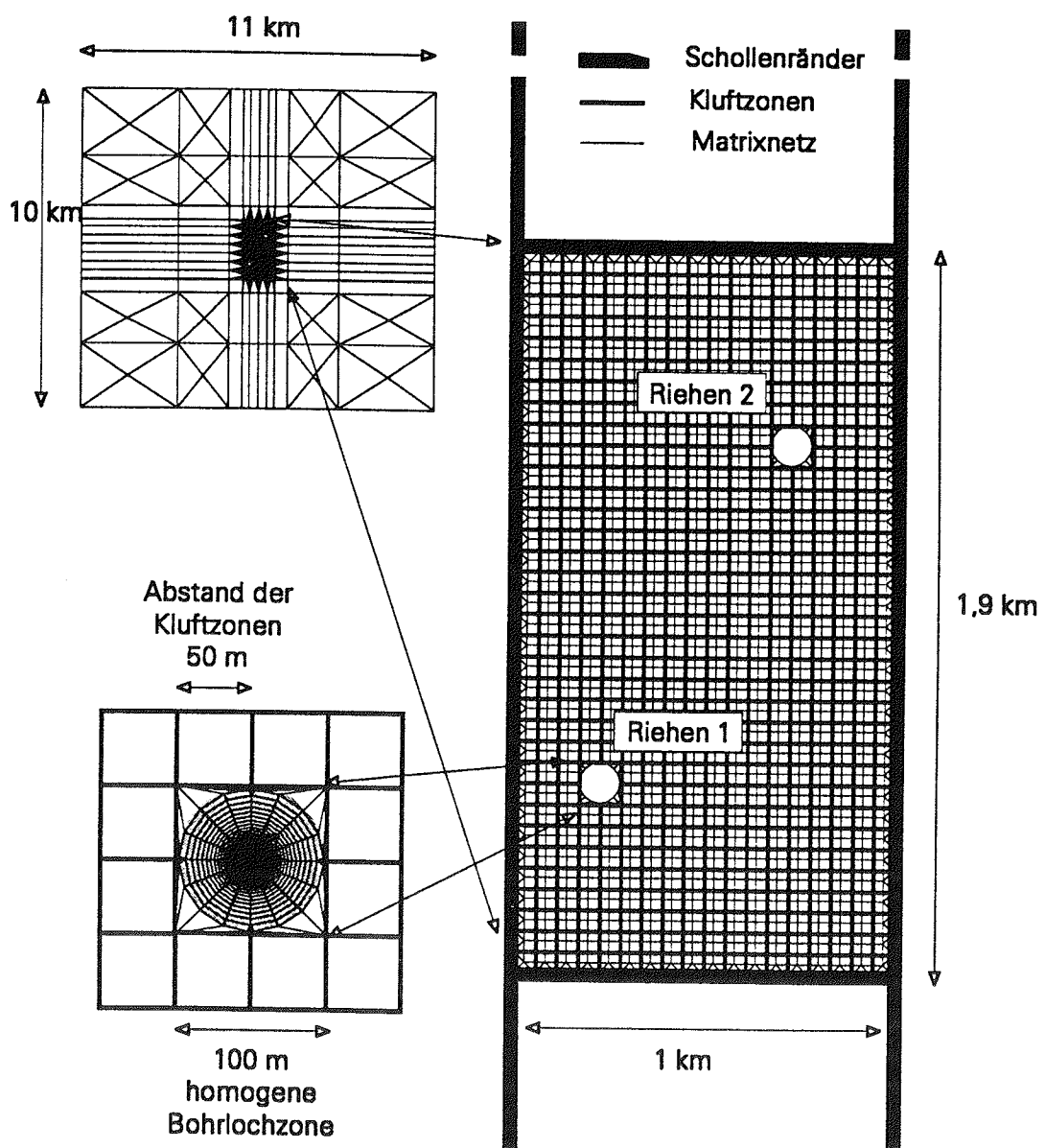
Rolle. Eine reine Stromproduktion lässt sich aufgrund des geringen thermischen Wirkungsgrades (ca. 8 %) aus wirtschaftlichen Gründen allerdings nicht rechtfertigen. Für die anfallende Wärme ist deshalb bei der Standortwahl die Nähe eines Fernwärmenetzes Voraussetzung.

HYDROTHERMALE GEOTHERMIE

Für die Nutzung geothermischer Ressourcen mit tiefen Erdwärmesonden und saisonalen Speicheranlagen werden detaillierte Kenntnisse der geothermischen Eigenschaften des Untergrundes zunehmend notwendig.

Die Zielsetzung des Projektes "Aquifer-Bewirt schaf-

tung für geothermische Wärmenutzungen" [3] war die Erarbeitung der notwendigen hydrogeologischen und geophysikalischen Beurteilungsgrundlagen für die geothermische Wärmenutzung von tiefliegenden Aquiferen



Zweidimensionales Finite Elemente-Modell der Doubletnutzung in Riehen [3]

Zur Abschätzung der grundsätzlichen Rahmenbedingungen einer Aquifernutzung wurden

- die Relevanz von bestimmenden Parametern sowie
- der Zusammenhang zwischen hydraulischen bzw. thermischen Eigenschaften des Untergrundes und maximal möglichen Förderraten bestimmt. Letztere sind besonders in Hinblick auf mögliche Mehrfachnutzungen aus dem selben Aquifer durch benachbarte Förderbohrungen von grosser Wichtigkeit.

In der Schweiz werden zur Zeit aus der Oberen Meresmolasse (in Augwil, Kloten und Bassersdorf) und aus dem Oberen Muschelkalk (in Riehen) warme Tiefenwässer zu Heizzwecken gefördert. Mit Hilfe der Finiten Elementen-Methode wurden die Langzeiteffekte dieser Nutzungen in Bezug auf ihre geothermischen Leistungen untersucht.

Das Ziel des Forschungsprojektes "**Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens (Pilotstudie - Wärmeleitfähigkeit)**" [2]:

- Demonstration des Einflusses dieser Parameter bei Wärmeentzugsrechnungen,
- Inventarisierung bereits vorhandener Wärmeleitfähigkeits-Daten der Schweizer Molasse, ergänzt durch neue Labormessungen
- Berechnung der Leitfähigkeit aus geophysikalischen Bohrlochaufnahmen.

UNTIEFE GEOTHERMIE

Das Projekt "**Erhöhung der Wirtschaftlichkeit geothermischer Bohrungen**" [5] sollte im Lichte des heutigen Preiszerfalles in der Bohrtechnik besser umtitielt werden in: "Gibt es bohrtechnische Lösungen, die beim jetzigen Preisniveau ein Bohrunternehmen wieder wirtschaftlich arbeiten lassen?". Ein auf breiter Ebene durchgeführter Vergleich heutiger Bohrtechnologien hat ergeben, dass diesbezüglich tatsächlich Hoffnung besteht. Ein völlig neues Verfahren in Form eines wasserbetriebenen Imlochhammers aus den USA erscheint sowohl für den Anwendungsbereich bei mitteltiefen EWS (Erdwärmesonden) wie auch bei tieferen Geothermiebohrungen als sehr vielversprechend. Dabei werden sehr hohe Wasserdrücke bis zu 180 bar am Bohrwerkzeug verwendet. Praktische Bohrversuche ergaben bis zu zweieinhalbmal höhere Fortschrittsraten im Vergleich zu anderen modernen hydraulischen Bohrhämmer-Methoden. Somit kann eine EWS-Bohrung wesentlich rascher und damit kostengünstiger abgeteuft werden. Es ist geplant, diese neue Bohrtechnologie möglichst bald bei einem Schweizer Projekt zum Einsatz zu bringen.

Mit etwas zeitlicher Verzögerung konnte nun endlich die SIA-Dokumentation D 0136 "**Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme**" [6] veröffentlicht werden. Dieses Handbuch soll als ein verlässliches Arbeitshilfsmittel für Planer, Heizungsfachleute, Ingenieure, Geologen und Behörden dienen. Das Erdreich ist bereits heute eine wichtige erneuerbare Energiequelle. Ihr Stellenwert wird sich zukünftig noch erhöhen.

- Untersuchung der Beziehung zwischen sedimentären Architektur-Elementen und der thermischen Leitfähigkeit

Die Modellierung einer fiktiven 750 m tiefen Erdwärmesonde zeigte, dass der mögliche Wärmeentzug bereits bei Variation der thermischen Wärmeleitfähigkeit von $\pm 0.5 \text{ W/mK}$ um bis zu 20 % ab- oder zunehmen kann.

Der Einfluss der Wärmekapazität ist viel geringer, gewinnt jedoch an Bedeutung bei der Nutzung von untiefen Erdwärmesonden (70 m - 100 m), oder bei der saisonalen Wärmespeicherung.

Das geothermische Begleitprogramm im Rahmen der "Gewinnung geothermischer Energie aus Tunneln, Teil B" [4] wurde konzipiert, um die im Bau befindlichen Tunneln und Stollen (Vereina, Polmengo, Frutigen, Dixance, Mauvoisin, Transjurane und Sedrun) en route zu bearbeiten. Dabei steht die Erfassung und Verarbeitung der beim Bau anfallenden, für eine eventuelle zukünftige Tunnelwärme-Nutzung relevanten Daten im Vordergrund (Schüttung, Temperatur und Chemismus des Bergwassers). Im Sondierstollen Polmengo konnte mit Felstemperaturmessungen die Annäherung des Tunnelvortriebes an die Piora-Mulde recht gut vorausgesagt werden. Dieses Projekt läuft noch bis Ende 1997.

Das Forschungsprojekt "*Recherche des paramètres permettant d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre verticales*" [7] konnte mit theoretischen Berechnungen und praktischen Feldversuchen zeigen, dass es mit einfachen Mitteln möglich ist, die Wärmeleistung einer EWS leicht zu steigern. Als Hilfswerkzeug für den planenden Ingenieur wurde des weiteren ein Satz von relativ einfachen Nomogrammen zur Dimensionierung von EWS ausgearbeitet.

Das Projekt "*Etude pilote: prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le Jura central, canton du Jura*" [8] hatte zum Ziel, geeignete Standorte zur Erstellung von EWS in Karstregionen abzuklären. In diesen Regionen besteht zwar eine grosse Nachfrage für diese geothermische Nutzungsmethode, allerdings dürfen dabei weder lokale noch regionale Karstwasser-Aquifere gefährdet werden (primäre Grundwasserlieferanten). In Form einer EWS-Karte 1: 50'000 und eines Katasterplans 1: 5'000 wird das nun abgeschlossene Projekt den kantonalen Entscheidungsträgern bei der Bewilligung von EWS-Anlagen eine wertvolle Unterstützung leisten.

Die Arbeit "*Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques*" [9] hatte zur Aufgabe, mögliche Risiken bei Erstellung und Betrieb von EWS festzustellen. Grundsätzlich können hier zwei Arten von Risiken definiert werden:

- Direkte Risiken bestehen in einer möglichen Grundwasser-Kontaminierung durch das Austreten von Kältemittel (Glykolbasis) aus einer mechanisch beschädigten oder korrodierten EWS.
- Als indirekte Risiken gelten mögliche, durch EWS-Bohrungen verursachte, hydraulische Kurzschlüsse zwischen einem oder mehreren Aquiferen.

In der Studie wurden die gängigsten Kältemittel auf ihre Toxizität und Abbaubarkeit im Untergrund untersucht. Die Abschätzung von indirekten Risiken basiert auf einer Analyse von verschiedenen hydrogeologischen Szenarien und der Erstellung von Risikozonenkarten. Die Studie schliesst mit praktischen Wegleitungen für zuständige Behörden, um Bewilligungsverfahren für das Erstellen von EWS-Anlagen speditiv durchführen zu können.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

1996 war insgesamt für die Geothermie ein sehr ereignisvolles und auch erfolgreiches Jahr:

KONGRESSE / FACHTAGUNGEN / WORKSHOPS

- Mitorganisation der Fachtagung "Geothermie-Energie der Zukunft" in Konstanz; mehrere Vorträge von Projektnehmern von Forschungs- und P&D-Projekten.
- In Konstanz, Verleihung der 3. Patricius-Plakette der Geothermischen Vereinigung e. V. 1996 an L. Rybach (ETHZ).
- Vortrag von L. Rybach am 1st. International Geothermal Symposium in Bad Kleinkirchheim (Österreich).
- Vortrag von L. Rybach am International Geothermal Seminar in Ankara, Türkei.
- Geothermie-Tagung in Wien (November 96), organisiert durch die Foralith (Gossau). Dies im Zusammenhang mit einer Projektvorstellung "Flächenteisierung und Schneeschmelzung mittels Erdwärme" für die Pistenverlängerung des Flughafens Wien-Schwechat.
- Vertretung bei der Wärmepumpen Expo'96 in Bern
- Unter grosser Beteiligung (50 Teilnehmer aus Privatwirtschaft, Bund und Kantonen): Abhaltung eines geothermischen Workshops in Zürich (November 96).

ZUSAMMENARBEIT MIT DER INDUSTRIE / NATIONALE KONTAKTE

Hier ist wohl in erster Linie die enge Zusammenarbeit mit Bohrfirmen, EWS- und Energiepfahl-Anlage Herstellern und der Elektroindustrie zu erwähnen. Berührungspunkte bildeten:

- Die bereits erwähnten Anforderungen an bessere und billigere Bohrmethoden. Qualitätskontrolle für die Erstellung und den Betrieb von EWS (in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen, AWP und der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz, FWS).
- Die Entwicklung von neuen Sondentypen für grössere Tiefenbereiche (Druckfestigkeit, Injektionsmethodik).
- Die mögliche Verminderung der Mantelreibung bei "hängenden" Energiepfählen.
- Die Entwicklung eines handlichen Gerätes zur Messung der Wärmekapazität an Boden- und Felsproben (ETH-Zürich)

- Der Einsatz von Wärmepumpen bei innovativen Nutzungsmethoden (z.B. geothermische Tunnelwassernutzung; Installation von EWS in bestehende Bohrungen.
- Die Mitfinanzierung bei der geplanten Machbarkeitsstudie *Deep Heat Mining*.
- An einem Koordinationstreffen zwischen Vertretern der SBB und des BEW zum Thema Tunnelgeothermie (Mai 1996) konnte eine zufriedenstellende Regelung zur Wärmenutzung von geplanten Alp-Transit-Tunnels gefunden werden. Im Prinzip würde die SBB sogar derartige Anwendungen begrüßen, falls sich dadurch die Errichtung von eventuell notwendigen Kühltürmen und Verdunstungsbecken erübrigen sollte.

INTERNATIONALE KONTAKTE

- Gastvorlesungen von L. Rybach am Geothermal Institute, Universität Auckland (Neuseeland).
- Vorbereitung des *IEA-Geothermal Implementing Agreement* durch das *IEA Geothermal Expert Panel* (Chairman L. Rybach). Das *Agreement* mit mehreren Annexen ist unterschriftsbereit; die erste Sitzung des *Executive Committee* soll im März 1997 anlässlich des *International Geothermal Symposium* in Sendai, Japan, stattfinden.
- Am "Science Day Schweiz-Österreich": erste Kontaktnahmen mit privaten Firmen und staatlichen Organisationen in Österreich (Geologische Bundesanstalt in Wien).
- Enge Zusammenarbeit einer Schweizer Forschergruppe (Polydynamics, ETH-Zürich; Projektfinanzierung durch das BBW) am HDR-Projekt in Soultz-sous-Forêts; mehrere Besuche der HDR-Anlage.

Transfer in die Praxis

Als einige ausgewählte, typische Beispiele für den gelungenen Transfer der Forschung in die Praxis, seien hier die folgenden, zur Zeit laufenden P&D-Projekte angeführt:

- Demonstrationsprojekt Erdwärme-Tiefensonde Weissbad (AI).
- Beheizung von Wohn- und Geschäftshaus ohne fossile Brennstoffe genauer (innovative Energiepfahlanlage).
- Wärmenutzung aus dem Rickentunnel.
- Geothermische Wärmenutzung in Riehen.
- Energiepfahlanlage Photocolor in Kreuzlingen
- Energiepfahlanlage Lidwil Gewerbe in Altendorf
- Energiepfahlanlage PAGO in Grabs

- Geothermische Wärmenutzung durch das Bade- und Kurzentrum in Scuol.

Alle diese Anlagen werden laufend messtechnisch überwacht um schlussendlich schlüssige Aussagen über deren Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit anstellen zu können.

- In Morschach wurde kürzlich der grösste Freizeitpark der Schweiz eröffnet. 70 % der, für den Betrieb dieser relativ grossen Anlage benötigten Energie (Heizung und Kühlung) wird aus umweltfreundlicher Erdwärme gewonnen. Dies entspricht ungefähr dem Heiz- und Warmwasserbedarf von ca. 100 Einfamilienhäusern. Als Erdwärmelieferanten dienen 10 m bis zu 500 m tiefe Erdwärmesonden.

Bewertung 1996 und Ausblick für 1997

Sowohl in der Forschung als auch bei den P&D-Aktivitäten konnten die im Jahr 1995 definierten Schlüsselprojekte gestartet bzw. weiterverfolgt werden. Dies betrifft die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei EWS-Anlagen, der Nutzung von warmen Tunnelwässern und der Konzeptphase *Deep Heat Mining*.

Für 1997 ist im Prinzip eine Intensivierung dieser genannten Tätigkeiten sowie die Teilnahme an *IEA-Hot Dry Rock* Forschungsprojekten geplant. Des weiteren sollen mehrere, im kleinen Rahmen durchgeführte Workshops betreffend Qualitäts-Management und ge-

zielter P&R-Tätigkeiten auf dem Gebiet der untiefen Geothermie durchgeführt werden.

Eine überaus interessante Anwendung der Geothermie zeichnet sich für die Flughafenerweiterung in Kloten ab. Aufgrund des schlechten Baugrundes muss breitflächig gepfählt werden. Es besteht nun die Projektidee, die schon aus rein bodenmechanischen Gründen notwendigen Pfähle, als Energiepfähle zum Heizen und Kühlen von Flughafengebäuden bzw. zur Eisfreihaltung von Flugzeugs-Parkierungspisten auszuführen. Wie bereits erwähnt, bestehen ähnliche Planungen für die Flugpistenverlängerung in Wien-Schwechat.

Liste der 1996 gelaufenen Projekte

- [1] ARGE *Deep Heat Mining*, Zürich: *Anwendung der Hot Dry- und Wet Rock Technologie zur Strom- und Wärmeproduktion*. (SB)
- [2] GEOFORM, Winterthur: *Pilotstudie: Geothermische Eigenschaften des Molassebeckens*. (SB)
- [3] L. Rybach, ETH-Zürich: *Aquifer-Bewirtschaftung für geothermische Wärmenutzung*. (SB)
- [4] ARGE ZEWI, Dietlikon und Zürich: *Geothermisches Begleitprogramm im Rahmen der "Gewinnung geothermischer Energie aus Tunneln. (Teil B)"*. (JB)
- [5] FORALITH, Gossau: *Erhöhung der Wirtschaftlichkeit geothermischer Bohrungen*. (SB)
- [6] B. MATTHEY, Montezillon: *SIA Dokumentation D 0136. Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme*. (SB) ♦ *Recherche des paramètres d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre verticales*. (SB)
- [7] Ch. Rieben, MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE, Bienne: *Etude pilote. Prospection et catalogue des sites pour sondes géothermiques dans le Jura Central (Canton du Jura)*. (JB)
- [8] A. Parriaux, GEOLEP/EPF-Lausanne: *Risques de contamination du sous-sol par les sondes géothermiques*. (SB)

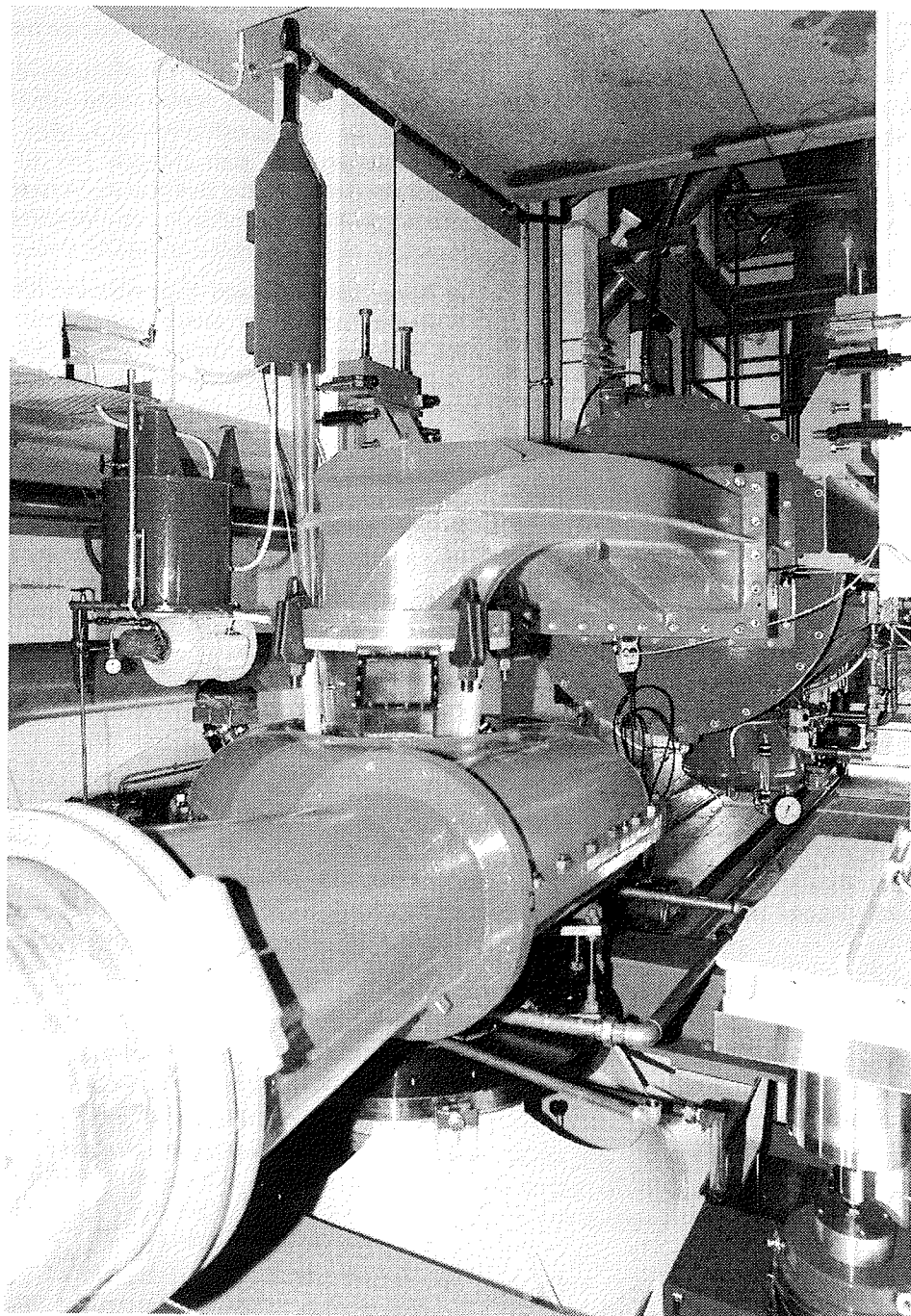
(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

KLEINWASSERKRAFTWERKE

Überblicksbericht
zum P&D-Programm 1996

Hanspeter Leutwiler



MHyLab - Laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand

Vue de la plateforme d'essais depuis le côté "haute pression" du circuit. Au premier plan: modèle réduit d'une turbine Francis.

Programmübersicht

Die Förderung der Kleinwasserkraftwerke beschränkt sich auf Anlagen unter 1000 Kilowatt installierter Leistung.

Sie muss eine schwierige Aufgabe erfüllen, nämlich einen Schrumpfungsprozess in das Gegenteil umzukehren: Stilllegungen infolge steigender Kosten und Umweltauflagen bei den kleinen und insb. bei den kleinsten Wasserkraftwerken sollen gestoppt werden, und es soll wieder in Kleinwasserkraftwerke investiert werden.

Das Projekt DIANE Klein-Wasserkraftwerke (1992 bis 1997) des BEW hat die unter den heutigen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erschliessbaren Potentiale untersucht: es zeigt sich, dass die Produktion der Kleinstwasserkraftwerke bis 300 kW installierter Leistung mit Trinkwasser- und Abwasserkraftwerken nahezu verdoppelt werden kann. In den Kategorien über 300 kW sind auch namhafte Erhöhungen möglich, hier ist jedoch neben der sehr allgemein gehaltenen und nicht mehr ganz aktuellen Studie der Expertengruppe Energieszenarien 1987 (EGES) kein Zahlenmaterial über Potentiale vorhanden. Mit einem Promotionsprogramm werden mögliche Bauherren informiert, ermutigt und begleitet. Lücken im *Know-how* werden geschlossen und vorhandenes Wissen wird zugänglich gemacht. Über Infoenergie wird Bauherren, Planern und anderen Interessierten Information & Beratung angeboten. Mit einer systematischen Pressearbeit wird die öffentliche Akzeptanz verstärkt.

Mit einem Inventar stillgelegter Anlagen hat das Bundesamt für Wasserwirtschaft das Potential für Reaktivierungen aufgezeigt. Kantonsweise laufen in Zusammenarbeit mit dem BBW Reaktivierungsprogramme zur Triage nach Realisierungschancen und Reaktivie-

rung ausgewählter Anlagen. Vom Kanton Bern wurde ein Promotionsprogramm für stillgelegte und veraltete Kleinwasserkraftwerke lanciert, welches vom Programm Energie 2000 namhaft unterstützt worden ist. Verschiedene Kantone haben Anlagen mit Beiträgen unterstützt.

Im Pilot- und Demonstrationsprogramm des Bundes wurden finanzielle Beiträge an Projekte ausgerichtet, insbesondere an solche, deren Umsetzung in das DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke integriert war.

Um die einzelnen Bauherren wirkungsvoll zu unterstützen, wurden in den vergangenen Jahren Förderbeiträge an die nichtamortisierbaren Kosten von 64 Projekten ausgerichtet, zum grössten Teil an Vorstudien. Dabei erwiesen sich die Beiträge an Vorstudien als sehr wirkungsvolles Instrument zur Identifizierung von Projekten und zur Mobilisierung von Bauherren.

In Bezug auf diejenigen Kleinwasserkraftwerke, deren Wirtschaftlichkeit nur knapp ungenügend ist, hat sich die Verbesserung der Vergütungen für die ins öffentliche Elektrizitätsnetz zurückgespiesene Energie gemäss ENB als die wirkungsvollste Förderung erwiesen. Dennoch bleiben etliche Projekte leicht unrentabel. Weitere Hemmnisse bestehen in neuen Umweltauflagen, welche die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen, und bei einigen Fällen in langwierigen Bewilligungsverfahren. Die ungenutzten Potentiale werden nur zögerlich und in vielen Fällen ineffizient erschlossen. PACER, DIANE und direkte Projektunterstützungen haben die Investitionen zwar beschleunigt und den Schrumpfungsprozess aufgehalten, noch ist jedoch der jährliche Zuwachs gemessen an den Möglichkeiten klein.

Programmziele

Das Hauptziel lautet: Erhöhung der Energieproduktion aus Kleinwasserkraftwerken mit Reaktivierungen, Ertüchtigungen, Erweiterungen und Neubauten. Dadurch ergeben sich folgende Ziele für die verschiedenen Stufen:

ENTWICKLUNG

Angestrebt werden geringere Kosten für Herstellung und Unterhalt sowie eine höhere Energieausbeute einzelner Ausrüstungskomponenten. Ein Entwicklungsbedarf besteht bei den folgenden Aufgaben:

- Kostengünstige Picoanlagen (Kraftwerke mit installierter Leistung unter 50 kW) für Selbstinstallation und für Trink-, Abwasser- und Drainagewasserkraftwerke.
- Kostengünstige Kleinstturbinen (bis 300 kW) mit guten Wirkungsgraden und Zuverlässigkeit.
- Sonderbauarten für spezielle Anwendungen mit grossen ungenutzten Potentialen, z.B. für Nie-

derstdruck-Kraftwerke, für kostengünstige Kleinstkraftwerke in Wasserleitungsnetzen und Flüssigmedien der Verfahrenstechnik mit Druckregelaufgaben (siehe Forschungsprogramm Elektrizität), usw.

- Erprobung kostengünstiger Bauarten für Fischaufstiegshilfen mit geringem Unterhalts- und Wasserbedarf, sowie der zugehörigen Bedingungen für ein erfolgreiches Funktionieren.

Diese Ziele können vorderhand nur mittelfristig angegangen werden, indem Initiativen der Wirtschaft oder von Labors technischer Schulen unterstützt werden.

FORSCHUNG

Vertiefte Forschung ist bei Kleinwasserkraftwerken angesichts der weitgehend entwickelten Technik und der dynamischen Anbieterbranche von Ausrüstung in Europa kein Thema. Die Bearbeitung dieses Gebietes

ist somit kein Ziel des Programm Kleinwasserkraftwerke – Ziel ist lediglich eine Koordination allfälliger Aufgaben mit dem Forschungsprogramm Elektrizität und die Mithilfe bei der Umsetzung der Ergebnisse.

P&D-ANLAGEN

Die Erprobung neuer wirtschaftlicherer Technologien gehört zu den passiven Förderzielen des Programmes (Holprinzip: Es können Beitragsgesuche eingereicht werden).

Die breite Demonstration aller noch zu wenig bekannten neuen Methoden und Technologien, welche zum Überwinden der heutigen Schwierigkeiten der Kleinwasserkraftwerke beitragen, wird aktiv verfolgt (Bringprinzip: Projektinteressenten werden aktiv ge-

sucht und beraten). Gesucht sind Lösungen für eine bessere Wirtschaftlichkeit und für die erfolgreiche und kostengünstige Erfüllung von Umweltauflagen. Von besonderem Interesse sind Innovationen für bisher noch wenig genutzte Anwendungsbereiche, sowie für ökologische und ästhetische Bauweisen zur Verbesserung der Akzeptanz. Diese Kriterien sind in einem Merkblatt festgehalten.

MARKT

Die systematische Promotion der Nachfrageseite und die Herstellung von Markttransparenz geschieht im DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke. Das Programm Kleinwasserkraftwerke fördert als Ergänzung dazu Einzelprojekte. Die Schwerpunkte liegen auf der Identifikation von Projekten, auf der Motivation der Bauherren und auf der Unterstützung der Vorprojektphase. Für die Realisierungsphase werden Verbesse-

rungen der Marktstellung der Bauherren und das Verbreiten neuer Modelle für Trägerschaft, Finanzierung und Betrieb als Ziele gesetzt.

Massnahmen für die Aus- und Weiterbildung sind keine notwendig, da es sich um eine Technologie handelt, welche der professionellen Branche genügend zugänglich ist – zudem ist das qualifizierte Angebot im Ingenieurbereich gegenüber dem kleinen Markt gross.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse im Jahr 1996

Mit dem Jahr 1996 schliesst für das Programm Kleinwasserkraftwerke ein erstes **Übergangsjahr** ab. Aktivitäten wurden beendet und ein Neubeginn vorbereitet. Nach innen war es ein Jahr der **Evaluation und Neuorientierung**, und nach aussen ein Jahr des **Stand-by**, um ab 1997 mit überarbeiteter Zielsetzung aktiver

P&D-Beiträge an die Ausführung von Projekten ausrichten zu können sowie und das Programm der Vorstudienbeiträge neu zu starten. Erstmals wurde ein **Vierjahresplan (1966-1999)** verfasst.

Die wichtigsten Programmarbeiten waren:

DIREKTE UND INDIREKTE FÖRDERUNGEN

Beiträge an Vorstudien und P&D-Projekte

Die erste Serie der von **direkten Projektunterstützungen**, welche 1992 mit Beiträgen an Ausführungen und 1993 mit Beiträgen an Vorstudien begonnen hatte, kam zum Abschluss. Im weiteren stand ein bescheidenes Budget für P&D-Projekte zur Verfügung. Budgetbedingt mussten die Beiträge eingestellt werden.

Gegen Ende Jahr wurde bei Anfragen eine Reaktivierung des Vorstudienprogrammes in Aussicht gestellt. Anfragende von prioritär gewünschten Demonstrationsprojekten wurden begleitet. In einem Falle ging die Programmleitung sogar soweit, zusammen mit der DIANE-Arbeitsgruppe "Ökologie und Kleinwasserkraftwerke" ein Projekt für eine besonders kostengünstige Fischtreppe zu erarbeiten.

Das Programm Kleinwasserkraftwerke hat bisher weit-

gehend nach dem **Holprinzip** gewirkt. Dies war gerechtfertigt, da die Branche der Kleinwasserkraftwerke von DIANE sehr systematisch informiert wurde: anlässlich von Fachtagungen, mit der Broschürenreihe DIANE, mit Pressebeiträgen und mit Beilegen von Merkblättern bei Informationsversanden. Das Programme Kleinwasserkraftwerke lieferte Merkblätter, erstellte ein spezielles Gesuchsformular und beriet Anfragende und Gesuchsteller individuell.

Die Bilanz der Förderung der Kleinwasserkraftwerke liest sich wie folgt: (Periode 1992 bis 1996, Stand 27.11.96):

Von 96 behandelten Gesuchen wurden 32 abgelehnt. Die 64 bewilligten Gesuchen betrafen 20 Beiträge an Ausführungen und 44 Beiträge an Vorstudien.

Alle bewilligten Projekte repräsentieren eine kumulierte installierbare Leistung von rund 12.3 MW, wovon 2.3 MW auf Ausführungen und 10 MW auf Vorstudien entfallen. Je ungefähr die Hälfte liegt im Bereich bis 300 kW (Kleinstkraftwerke) und im Bereich 300 bis

1000 kW installierter Leistung. Die Beiträge an die Ausführung tragen zur Realisierung einer mittleren Jahresproduktion von 7.7. GWh bei, von den Vorstudienprojekten kann rund jährlich 11 GWh Produktion erwartet werden.

	Vorstudien	Kleinwasser-Kraftwerke	Abwasser-Kraftwerke	Trinkwasser-Kraftwerke	Bewässerungs-Kraftwerke
Förderbeiträge	bisher total 44 Gesuche bewilligt, davon 1 im Jahr 1996	total 10 Gesuche bewilligt (Förderung 1995 eingestellt)	total 2 Gesuche bewilligt (1995 nur noch P&D Gesuche)	total 4 Gesuche bewilligt (Förderung 1995 eingestellt)	
P & D	1 Vorstudie im laufenden Jahr unterstützt	3 Gesuche unterstützt, davon 2 im Jahr 1996)			1 Gesuch im laufenden Jahr unterstützt
Markteinführung	DIANE Klein-Wasserkraftwerke				
Aus- & Weiterbildung	Letzte Kurse PACER -Kleinwasserkraftwerke (Bundesamt für Konjunkturfragen)				

Evaluation der Wirkungen der Bundesbeiträge an Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke

Mit Hilfe der Durchführung einer externen **Wirkungsanalyse der Vorstudienbeiträge** im Herbst 1996 wurde die Situation bezüglich der Vorstudien speziell analysiert. Es ergaben sich folgende wichtigste Resultate:

- Die Vorstudienbeiträge werden als wirkungsvolles Förderinstrument für den Bereich KWK eingestuft.
- Die Energiegestehungskosten und Realisierungschancen der Vorstudienprojekte sind im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien sehr niedrig.
- Mängel werden eruiert bei der zuwenig aktiven Information potentieller Bauherren (Holprinzip), bei der Qualität einzelner Vorstudien und beim folgenden *Follow-up* der Projekte.

- Die Realisierungszeit von der Vorstudie bis zur Inbetriebnahme ist ausgesprochen lang und durch viele Hindernisse erschwert.
- Der Bericht enthält detaillierte Angaben zum Vorgehen und Stand der Realisierung sowie anderer Auswertungen über die Projekte und das Gesuchverfahren für die Beiträge.

Die Studie kann ab Frühjahr unter dem Titel "Evaluation der Wirkungen der Bundesbeiträge an Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke" beim ENET bezogen werden.

ENTWICKLUNG

Der Bund unterstützt das Entwicklungsprogramm des **Kleinturbinenlabors MHyLab** (*Laboratoire Montcherant*), welches eine den gesamten Einsatzbereich der Kleinturbinen abdeckende Modellreihe entwickelt. Das *Know-how* wird interessierten Turbinenherstellern resp. ihren Kunden im In- und Ausland gegen Tantiemen in Abhängigkeit von der installierten Leistung zur Verfügung gestellt. Da diese Tantiemen bei kleinen Leistun-

gen sehr bescheiden sind, wird ein Entwicklungsimpuls auf kleine und mittlere Unternehmungen in der Schweiz erwartet. Das zur Verfügung gestellte *Know-how* versetzt Kleinfirmer in die Lage, zuverlässige Garantien abzugeben, was die Stellung des Bauherrn sowie das Preis-Leistungs-Verhältnisses von Kleinstturbinen namhaft verbessert.

PUBLIKATIONSREIHEN DER FÖRDERPROGRAMME PACER UND DIANE

Im Laufe des Jahres 1996 ging das Förderprogramm PACER Kleinwasserkraftwerke (Bundesamt für Konjunkturfragen) zu Ende. Gleichzeitig arbeitet das DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke seinem Ende

1997 zu. Die beiden Projekte und stellen umfassende Publikationsreihen zur Verfügung, und das DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke bietet einen Dienst für Information & Beratung an.

INTERESSENGEMEINSCHAFT WASSERKRAFT SCHWEIZ (IG-WKC)

Mit dem Vorhaben des BEW und interessierter Kreise, 1997 eine **Interessengemeinschaft Wasserkraft Schweiz (IG-WKC)** zu gründen, welche unter anderem auch Ressourcen der Wirtschaft zum Fördern der

Kleinwasserkraftwerke mobilisieren soll, kam ein weiteres Element des Abwartens in die Strategie des Programmes Kleinwasserkraftwerke.

Bewertung 1996 und Ausblick für 1997

Die durchgeführten Arbeiten im Jahre 1996 machen klar, dass auch das Jahr 1997 zu einem Übergangsjahr wird: Auch das DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke wird auslaufen, eine Interessensgemeinschaft Wasserkraft formiert sich, und das Programm Kleinwasserkraftwerke aktiviert seine Tätigkeit.

Im Jahr 1997 sollen die folgenden Ziele betreffend der direkten Projektbeiträge verfolgt werden

- Massvolle Reaktivierung der Bundesbeiträge im Sinne einer mittelfristigen Kontinuität, damit sich Bauherren auf die angekündigte Hilfe verlassen können, wenn ihr unter Umständen vom Programm Kleinwasserkraftwerke oder vom DIANE initiiertes Projekt (manchmal erst nach Jahren) ausführungsfähig ist.
- Besseres Erreichen der Sprachregionen.
- Optimaler Einsatz der beschränkten Mittel mittels Konzentration auf Förderung von Vorstudien und definierter Demonstrationsanlagen unter neuen qualitativen Gesichtspunkten.

Da die Kleinwasserkraftwerk-Branche eine grosse Zeitkonstante zwischen Projektidentifizierung, Planung und Realisierung aufweist, kann 1998 nicht damit gerechnet werden, dass alle Ziele der Aktivierung der Beiträge an die Ausführung von P&D-Anlagen bereits voll greifen. Ziel ist jedoch, dass die Branche über die Möglichkeiten informiert ist, und dass eine Anzahl geeigneter Demonstrationsanlagen *in the pipe* sind.

Betreffend der indirekten Projektbeiträge werden im Jahr 1997 die folgenden Ziele verfolgt:

- **Aktualisieren der mittelfristigen Strategie:** Ende 1997 sollen die im Vierjahresplan aufgeführten Ziele und Massnahmen mit der 1997 zu gründenden **Interessengemeinschaft Wasserkraft Schweiz** koordiniert sein, einschliesslich der Beiträge der Wirtschaft. Die Nachfolgeaktivitäten des DIANE Projektes Klein-Wasserkraftwerke werden voll an andere Träger oder an das Programm Kleinwasserkraftwerke abgegeben sein.
- **Umsetzung bestehender Ergebnisse planen:** Die Förderprogramme PACER und DIANE, welche mit einer breiten Palette von Massnahmen die Nutzung der Kleinwasserkraft umfassend zu fördern bezwecken, werden Ende 1997 ihre Aufgabe weitgehend erfüllt haben. Das Programm Kleinwasserkraftwerke ist deshalb nicht als Nachfolgeprogramm für solche indirekte Fördermassnahmen vorgesehen. **Punktuelle Aktivitäten von DIANE**, welche nicht ganz beendet sind oder dauernd weitergeführt werden sollten, werden jedoch ab 1998 vom **Programm Kleinwasserkraftwerke** übernommen. Dies betrifft:
 - a) Das weitere Verbreiten der Publikationen
 - b) Die Weiterführung der Information & Beratung und einer minimalen Medienarbeit
 - c) Die Unterstützung von Informations- und Weiterbildungsveranstaltungen.

Das Programm Kleinwasserkraftwerke unterstützt Aktivitäten der Wirtschaft, der Kantone und anderer Träger, und es sorgt für den Informationsfluss und in Einzelfällen für eine Koordination zwischen verschiedenen Akteuren. Die wichtigsten bereits bekannten Aktivitäten für 1997 sind:

- **MHyLab** (Stiftung Kleinturbinenlabor Montcherant): Das Ende 1996 in Betrieb genommene **Kleinturbinenlabor MHyLab** beginnt mit den ersten Entwicklungsaufträgen. Das BEW unterstützt das Turbinenentwicklungsprogramm. Es ist vorgesehen, dass diese Institution nicht nur Turbinenhydraulik testet und entwickelt, sondern auch zu einem Kompetenzzentrum für Kleinwasserkraftwerke und kommerziell neutrale Dienstleistungen wird.
- **Interessengemeinschaft Wasserkraft Schweiz (IG-WKC):** Das Programm Kleinwasserkraftwerke finanziert die Gründungsphase der IG-WKC, deren Ziel die Förderung kleiner und grosser Wasserkraftwerke und der einschlägigen Exportindustrie ist. In dieser IG sollen alle für Wasserkraftwerke massgebenden Organisationen vertreten sein, einschliesslich Vertreter der Kleinwasserkraftwerke und Organisationen für den Export von entsprechenden Maschinen und von Ingenieurleistungen. Der Bund und Vertreter der Kantone werden Beobachterstatus innehaben. Aufgabe der IG ist, alle fördernden Kräfte zu vereinen und die Zusammenarbeit des Bundes mit der Wirtschaft sicherzustellen.
- **Ausstellungskongress 1997 in Bern:** Im laufenden Jahr wird der Ausstellungskongress kleine und mittelgrosse Wasserkraftanlagen, 10. bis 13. Juni 1997, Bern, stattfinden. Er umfasst eine 4-tägige Sonderausstellung anlässlich der Ausstellung "Gemeinde 97" an der BEA, für welche sich bereits über 70 Aussteller eingeschrieben haben, einen 2-tägigen Fachkongress mit internationalem Publikum und einen Exkursionstag. Eine Wasserkraftausstellung dieser Grösse hat in der Schweiz in überschaubarem Zeitrahmen noch nie stattgefunden. Das DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke hat diese Veranstaltung initiiert und ein *Sponsoring* mit einer in Wirtschaft und Verwaltung breit abgestützten Trägerschaft erreicht. Das BEW beteiligt sich an der Trägerschaft. 1996 richtete es aus dem Budget des Programmes Kleinwasserkraftwerke einen grossen Beitrag an die Vorbereitungskosten aus, und für die Durchführung 1997 gewährt es eine Defizitgarantie.
- **Forschungsprojekte:** Im Programm Kleinwasserkraftwerke besteht kein Budget für Forschungsaktivitäten. Vereinzelt eintreffende Unterstützungen werden an das Forschungsprogramm Elektrizität weitergewiesen. Das Programm Kleinwasserkraftwerke und das DIANE Projekt Klein-Wasserkraftwerke haben bisher als Drehscheibe zwischen Interessenten für bestimmte Spezialanwendungen und Ingenieurschulen gewirkt, Kontakte vermittelt und z.B. die Resultate eines Forschungsprojektes anlässlich einer Tagung umgesetzt. Diese Zusammenarbeit wird fortge-

setzt. Als interessantes umzusetzendes Ergebnis wird 1997 der Bericht "Umrichtertechnologie für erneu-

erbare Energien am Beispiel der Kleinwasserkraftwerke" verfügbar sein (EDMZ, ENET).

Liste der Projekte

Die Liste umfasst lediglich die bisher vom Bund unterstützten Demonstrationsanlagen, sowie die im Bericht erwähnte Kurzevaluation über die Auswirkungen der Bundesbeiträge an Vorstudien und das Projekt MHyLab. Eine Liste der rund 60 subventionierten Vorstudien und Ausführungsprojekte kann direkt bei der Programmleitung bezogen werden.

- [1] GELEISE-, HOCH- UND TIEFBAU, Burgdorf: **Kleinwasserkraftwerk Mülibach Tiergarten, Burgdorf**
- [2] DORFGEMEINSCHAFT-Sarnen, Wasserversorgung: **Trinkwasserkraftwerk Buechetsmatt, Sarnen**
- [3] EBG-Brig 3: **Bewässerungs- und Trinkwasserkraftwerke Wickertwald, Brig-Glis**
- [4] Ch. Künzi, Selden/Gasterntal: **Kleinwasserkraftwerk Leitibach, Gasterntal**
- [5] IGS-Grenchen: **Elektrifizierung der Mühle Büren, Büren an der Aare**
- [6] Kt. EW-NW, Stans: **Drainagewasserkraftwerk Rütenen, Beckenried**
- [7] SAC Sektion Blümlisalp, Thun: **Kleinwasserkraftwerk Baltschiederklause, Baltschieder**
- [8] BUAG IMMOBILIEN USTER, Zürich: **Vorstudie Kleinwasserkraftwerk Baumwollspinnerei Uster**
- [9] BHP, Zürich: **Vorstudien für Kleinwasserkraftwerke: Auswirkungen der Bundesbeiträge; Kurzevaluation**
- [10] M. Chenal, MHyLab-Montcherand: **Laboratoire de mini-hydraulique de Montcherand MHyLab**

WINDENERGIENUTZUNG

Überblicksbericht
zum P&D-Programm 1996

Robert Horbaty



Moderne Windkraft-Anlage auf der Jurahöhe

Drei Windturbinen mit insgesamt 1.8 Megawatt wurden auf dem Mont-Crosin durch die BKW-ENERGIE installiert.

Programmschwerpunkte

Die Forschung auf dem Gebiet Windenergie wurde 1990 mit dem Bericht "Meteonorm Wind" abgeschlossen. Neuste Projekte weisen daraufhin, dass die Windenergie einen spürbaren Beitrag zur Erreichung der Ziele von Energie 2000 leisten kann. Eine Verstärkung im P&D-Bereich wird deshalb angestrebt.

Der Schwerpunkt des Programms besteht in der Öffentlichkeitsarbeit zur Verbreitung des Wissens um die

Windenergie und die Etablierung als ernstzunehmende Form von erneuerbarer Energieerzeugung. Des Weiteren steht die Umsetzung von konkreten Projekten im Vordergrund, die einen echten Beitrag an die Elektrizitätsproduktion leisten, innovative Lösungen zeigen und mit deren Erfahrungen kommende Projekte kostengünstig und umweltverträglich umgesetzt werden können.

Zielsetzung 1996

P&D, FÖRDERUNG

- Vorfinanzierung von zwei Standortabklärungen (Partner: Investoren, Developer, EVU, Private)
- Informations-Infrastruktur für Mont-Crosin-Anlagen (Partner: Interessiertes Fachpublikum, lokale Informations-Führer, Schulen)
- "Cyber-Windenergie" (CD-ROM) (Partner: Interessiertes Fachpublikum, lokale Informations-Führer, Schulen, etc.)
- Förderung einer Anlage auf dem Titlis (30 MWh/a)
- Aktives Förderprogramm evaluieren, mit klaren Förderstrategien bis ins Jahr 2000

MARKT

- Durchführung einer breit angelegten Fachtagung zur Nutzung der Windenergie in der Schweiz mit Medienorientierung (Partner: Deutsches Windenergieinstitut, Energieversorger, Medien, interessiertes Fachpublikum)
- Aufbau einer Informationsstelle Windenergie, Erarbeitung von Prospekten und Kurz-Infos (Partner: Ämter und Behörden, Medien, interessiertes Fachpublikum)
- Medienarbeit
- Erarbeitung einer Wind- und Naturschutzkarte, die Vorranggebiete und die Tabuzonen aus Sicht des Natur- und Heimatschutzes werden mit Windkarten überlagert, Potentialabschätzung. (Partner: Umwelt- und Naturschutzbüros, Umwelt- und Naturschutzverbände, BUWAL)
- Beginn mit Aufbau einer Winddatenbank

1996 durchgeführte Arbeiten

PROGRAMMLEITUNG

- Ausarbeitung und Kommunikation des 4-Jahresplanes, des detaillierten Jahresplanes 1996 sowie der entsprechenden Budget- und Terminpläne.
- Aufbau und Führen einer detaillierten Projektdokumentation, einer Projekt-Datenbank und eines Projekt-Controllings. Kontinuierliche Betreuung laufender Projekte, Prüfung neuer Projekte, enge Koordination mit BEW-Bereichsleiter und E-2000.
- Ideen zur Entwicklung eines Beschleunigungsprogramms "Windenergie", Konzeptionelle Aktivitäten zum Aufbau einer "Gesellschaft zur Abklärung von Standorten für Windkraftanlagen".
- Orientierung und Informationen zu den Möglichkeiten der Windenergie-Nutzung in der Landwirtschaft. (Partner: Deutsches Landvolk, Landwirte, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Berggebiete)
- Ausarbeitung eines Konzeptes "Infrastruktur der Schweizer Armee und Windenergie-Nutzung". (Partner: Amt für Bundesbauten, Schweizer Armee)
- Erste Kontaktaufnahme mit Landschafts- und Umweltschutzorganisationen zur Thematik. (Partner: BUWAL, Naturschutzinspektorat Kant. BE, Umweltorganisationen)

MARKT

Die Infostelle Wind nahm mit Vertragsabschluss vom 19. Juli 1996 ihre Arbeit auf. Sie unterstützt die Kunden mit Informationsmaterialien und Auskünften. Es wurden zwei neue Informationsblätter geschaffen:

- "Die Nutzung der Windenergie" ersetzt das bestehende Blatt "Wind".

- "Windenergie als Option für die Zukunft" macht auf die INFOSTELLE WIND und das Dienstleistungsangebot aufmerksam [2].

Die Fachtagung "Windenergienutzung in der Schweiz" vom 29. November in Olten wurde gut besucht und erzeugte sowohl bei den Besuchern als auch in den Medien ein positives Echo.

Die Erarbeitung einer Wind- und Naturschutzkarte mit Vorranggebieten und Tabuzonen aus Sicht des Natur- und Heimatschutzes sind abgeschlossen. Durch die Überlagerung mit Windkarten, konnten Potentialgebiete mit guten, mittleren und schlechtem Windverhältnissen evaluiert werden. Daraus wurden in einer Potentialstudie folgende Resultate ermittelt:

- Ermittlung der Gesamtleistung der Windkraftanlagen, welche unter Berücksichtigung der einschränkenden Bedingungen wie Erschliessbarkeit, Bebaubarkeit und Landschaftsschutz an den, in oben erwähnter Studie ermittelten Standorten, errichtet werden können.
- Quantifizierung der Energie, welche jährlich mit diesen Anlagen generiert werden könnte - unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Windressourcen und unterschiedlichen Anlagegrössen.
- Ermittlung der entsprechenden Stromgestehungskosten - in Klassen von < 20 Rp./kWh / 20 - 30 Rp./kWh / > 30 Rp./kWh
- Darstellung eines zeitlichen Ablaufs der möglichen Erschliessung der Potentiale für das Jahr 2000, 2010 und 2030
- Quantifizierung der dazu notwendigen Fördermittel, unter Berücksichtigung einer anhaltenden Vergütung der langfristigen Grenzkosten für Strom aus erneuerbaren Energien (1996 = 16 Rp./kWh).

P&D FÖRDERUNG

Der geplante Windpark mit je drei 600kW-Windenergieanlagen wurde im Herbst 1996 auf dem MONT-CROSIN in Betrieb genommen [8] (siehe Titelblatt). Die Vermarktung der Windparks auf dem Mont-Crosin ist durch den Bau des Besucherpavillons und der Planung des Wanderwegs zwischen Mont-Soleil und Mont-Crosin angelaufen. Für Besucherwerbung, Besucherkanalisierung, Besucherführung sind Detailkonzepte erstellt. Für das geplante Cyber-Marketing sind die Module bestimmt und das Detailkonzept abgeschlossen: Kommerzielle Software für die Datenübertragung von den Windanlagen, Elektronisches Besucherinformationssystem (EBIS), Internet Modul, Weiterentwicklung des "PV-Monitor" für Win-

danlagen, Monitor für den virtuellen Rundgang im Windpark.

Die Planung der höchstgelegenen Windkraftanlage in Europa (auf dem Titlis) ist in vollem Gange [5]: Nach der Erteilung des Baugesuches ist die Projektierung des Mastfundamentes in Arbeit. Der Bau konnte aufgrund der Witterung nicht mehr aufgenommen werden, deshalb wird damit im Sommer 1997 begonnen.

Sowohl für die Standortabklärungen eines Windkraftparks auf dem Grenchenberg als auch auf dem Schaber (jeweils eine bestehende Anlage) werden die Arbeiten gerade aufgenommen. Auf dem Schaber werden seit 18.11.96 auf 10m über Grund Winddaten erfasst [3].

Nationale Zusammenarbeit

Die Windanlage auf dem Mont-Crosin wird umfassend vermarktet und ergibt dadurch fachübergreifende Zusammenarbeit zwischen dem Energieversorger, Fachleuten aus der Windenergieplanung, Computerspezialisten sowie Fachleuten für Öffentlichkeitsarbeit (JUVENT, INTERWIND, ANDI HOWALD, METEOTEST).

- Die Zusammenarbeit mit schweizerischen Institutionen ist im Zusammenhang mit dem Besucherinformationssystem, im Bereich der Planung des Lehrpfades, besonders ausgeprägt:

- *Office du Tourisme du Jura bernois* (Touristeninformation)
- *Association de protection de la nature du Jura bernois (Fauna/Flora)*
- *Centre de vulgarisation agricole* (Landwirtschaft)
- Geographisches Institut der Universität Bern (Panorama, Geologie)

Die INFOSTELLE WIND [2] hat im Zusammenhang mit der Windtagung einen Presseversand durchgeführt. Des weiteren wird die Westschweiz einbezogen, da sich dort ja die wichtigsten Standorte der bestehenden Windanlagen befinden.

Internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen der Projekte zur Erstellung von Anlagen ist die Zusammenarbeit mit dem Ausland, insbesondere den Herstellern, Bedingung. Zudem wurden u.a. im Zusammenhang mit den besonderen klimatischen Bedingungen in der Schweiz, speziell beim Projekt Titlis, Kontakt mit dem Deutschen Windenergie-Institut DEWI aufgenommen. Das Interesse von Seiten DEWI ist gross, im Rahmen des EU-Projektes WECO (Wind Energy utilisation in Cold climate) mit der Programm-

leitung Wind zusammenzuarbeiten. Ziel des Projektes WECO ist die Erarbeitung eines EISATLAS von Europa und Mitteln um die Vereisung von Windenergieanlagen zu bekämpfen und so die Produktionsverluste zu reduzieren.

Die INFOSTELLE WIND pflegt im Rahmen ihrer Medienarbeit Kontakte zu den Redaktionen der Fachzeitschriften "Wind Energie Aktuell" und "Wind Power Monthly".

Transfer in die Praxis

Wichtigste Erkenntnis beim Bau des Windparks auf dem MONT-CROSIN [8] sind:

- Grosse Windenergieanlagen können heute Elektrizität zu Preisen produzieren, die vergleichbar sind mit der Elektrizitätserzeugung aus neuen Wasserkraftwerken.
- Entscheidende Einsparungen werden erzielt, wenn der Bau in möglichst kurzer Zeit verwirklicht wird.
- Auflagen des Heimatschutzes (z.B. "schöne" Trafohäuser) verteuern die Anlagen nicht entscheidend.

Die Erfahrungen der ersten Kleinanlage auf dem SCHABER zeigen Mängel bei der Abstimmung zwischen Leistungsverhalten der Anlage und Dimensionierung der Netzeinspeisung [3]. Deshalb wird zur Zeit wegen Leistungsreduktion nur ca. 5000 kWh pro Jahr anstatt der prognostizierten 12'000 kWh erzeugt. Um eine Netzverstärkung zu finanzieren wird nun der Bau einer grösseren Anlage geprüft.

Die Anlage CHÜRSTEIN ist seit November 1996 in Betrieb und liefert seit Februar 1996 zuverlässig Elek-

trizität ins Netz der St. Gallisch-Appenzellischen KRAFTWERKE [6]. Bei tiefen Temperaturen wird die erwartete Produktion unterschritten, da eine hohe Windgeschwindigkeit von 4-5 m/s erforderlich ist, damit die Anlage startet. Reif auf den Rotorblättern verschärft diesen Effekt.

Auch die Produktion der Anlage auf dem Oberen GRENCHENBERG [4] bleibt, beeinträchtigt durch die tiefen Temperaturen, unter den Erwartungen. Zwar hat die beheizte Windmessung das Betriebsverhalten verbessert (Anlage bleibt nicht mehr stehen, weil Windmessung vereist), doch die Einbussen durch die Vereisung der Rotorblätter bestehen nach wie vor und sind schwierig zu quantifizieren. Durch die zum Teil stark schwankenden Winde gestaltet sich die Umschaltbarkeit zwischen den Generatorstufen problematisch.

Die Windkraftanlage auf der SIMPLON-Passhöhe [4] läuft unproblematisch, eine Störung in der Elektromechanik konnte behoben werden und das Betriebsergebnis entspricht dem Vorjahr.

Bewertung 1996

Durch die Inbetriebnahme des Windparks der JUVENT auf dem Mont-Crosin kann in der Entwicklung der Windenergie in der Schweiz von einem echten Quantensprung gesprochen werden:

- Zu den bisherigen relativ kleinen Anlagen (max. 150 kW) in der Schweiz gesellten sich drei grosse Windkraftanlagen (je 600kW).
- 6 mal mehr installierte Leistung: vorher 0.311 MW, heute 2.111 MW
- mehr Energieproduktion pro Jahr: vorher 212 MWh, heute 2012 MWh
- Stromgestehungskosten ca. 30 Rp./kWh.

Diese Entwicklung wurde breit kommuniziert und führte einerseits zu einem grossen Interesse an den Anlagen selbst (bis 1000 Besucher an schönen Herbsttagen!) und zu einem generell erhöhten Interesse an der Windenergienutzung:

- Gut besuchte Tagung in Olten

- Grosses Medieninteresse
- Aktive Infostelle

Mit der Ausarbeitung der Wind- und Landschaftsschutzkarte und den entsprechenden Potentialberechnungen konnte zudem kommuniziert werden, dass

- 3.5% des heutigen Stromverbrauchs mit Windkraft gedeckt werden könnte,
- der Grossteil davon zu Stromgestehungskosten von unter 30 Rp./kWh,
- 3 - 10 % der Ziele von Energie-2000 für Elektrizität aus erneuerbaren Energien mit Windkraft erfüllt werden könnte.
- 3 % entsprechen 11 weiteren 500 kW-Anlagen.

Zum heutigen Zeitpunkt haben diese Voraussetzungen noch nicht zu einem Boom der Nachfrage nach Fördermitteln zum Bau von Windkraftanlagen geführt, weitere Aktivitäten zur Förderung von Projektvorhaben sind deshalb notwendig.

Ausblick 1997

P&D

- Aufbau und Führen der Informations-Infrastruktur Mont-Crosin, Eröffnung des Besucherpavillons im Mai 1997. (Partner: Interessiertes Fachpublikum, lokale Informations-Führer, Schulen)
- Produktion des Informationsmittel "Cyber-Windenergie" (CD-ROM) [7]. (Partner: Interessiertes Fachpublikum, lokale Informations-Führer, Schulen, etc.)
- Förderung einer Anlage auf dem Titlis (0.03 MW, 30 MWh/a)
- Förderung von detaillierten Standortabklärungen, z.B. Windpark auf dem Grenchenberg, weiterer Anlagen auf dem Mont-Crosin, Ausbau des Standortes Schaber, etc.

MARKT

- Generelle Überarbeitung der Publikation "Meteonorm Wind" mit Aufbau Winddatenbank, Leitfaden "Windenergie und Raumplanung", Planungshilfe für den Windenergieplaner.
- Aufbau eines Mess- und Dokumentationsprogramms aller installierten Windkraftanlagen in der Schweiz (analog ISET in Deutschland), (Partner: Anlagebetreiber).
- Aufbau einer Informationsstelle Windenergie Romandie: Erarbeitung von Prospekten und Kurz-Infos, Übersetzung des Blattes "Windkraft und Landschaftsschutz", (Partner: Ämter und Behörden, Medien, interessiertes Fachpublikum).
- Etablierung eines Diskussionsforum Wind.

AGENCE ÉOLIENNE

Das Ressort Regenerierbare Energien von Energie-2000 hat – in enger Absprache mit der Programmleitung Wind – ein Konzept zur Ausarbeitung einer eigentlichen "Beschleunigungsaktion Windenergie" in Auftrag gegeben. Die Windenergieaktivitäten für das Jahr 1997 könnten danach eine neue Struktur erhalten. Die Höhe der Fördermittel für Anlagen und Standortabklärungen dürfte in etwa gleich bleiben.

Die AGENCE ÉOLIENNE, eine privatwirtschaftliche, von den im Bereich Energie interessierten Parteien getragenen juristischen Person, soll Standorte für Windkraftanlagen eruieren und begutachten sowie die raumplanerischen Voraussetzungen für die Realisierung schaffen. Es liegt heute ein Konzept vor, wie marktwirtschaftliche Gesetzmässigkeiten in die ganze Problematik des Erstellen von Windkraftanlagen mit einbezogen werden können.

PROGRAMMLEITUNG

- Ausarbeitung und Kommunikation des detaillierten Jahresplanes 1997 sowie die entsprechende Budget- und Terminpläne.
- Führen der detaillierten Projekt-Dokumentation, der Projekt-Datenbank und das Projekt-Controlling. Kontinuierliche Betreuung laufender Projekte, Prüfung neuer Projekte, enge Koordination mit BEW-Bereichsleiter und E-2000.
- Entwicklung eines "Beschleunigungsprogramms Windenergie", Unterstützung in den Aktivitäten zum Aufbau einer "Gesellschaft zu Abklärung von Standorten für Windkraftanlagen".
- Begleitung Projekt "Infrastruktur der Schweizer Armee und Windenergie-Nutzung". (Partner: Amt für Bundesbauten, Schweizer Armee)
- Etablierung eines "Diskussionsforum Windenergie". (Partner: BUWAL, Naturschutzinspektorat Kant. BE, Umweltorganisationen)
- Vertiefung der Möglichkeiten zur Windenergie-Nutzung in der Landwirtschaft. (Partner: Bauernverband, Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für Berggebiete)

F+E

Im Rahmen eines neuen Forschungsprojekts der EU mit Namen WECO (*Wind Energy utilisation in Cold climate*) befasst sich DEWI unter anderem mit der Vereisung von Anlagen, insbesondere von Rotorblättern [9]. Diese senkt einerseits die Elektrizitätsproduktion der Anlage und erhöht andererseits die Belastung durch den Eisansatz. Die Anlagen in der Schweiz sind durch die klimatischen Verhältnisse besonders von diesem Problem betroffen. Da in Zukunft eine stattliche

Anzahl von Anlagen gebaut werden soll, wird eine Zusammenarbeit mit dem WECO-Projekt angestrebt, um von den Erkenntnissen der Forschungsergebnisse zu profitieren und durch Anlagen, die besser für kalte Standorte geeignet sind sowie – durch Optimierung der bestehenden Anlagen – eine grössere Energieausnutzung zu erzielen.

Projekte 1996

- [1] H. Buser, ÖKOTEST, Gelterkinden, Kunz Stefan, METEOTEST, Bern, Horbaty Robert, ENCO, Liestal: *Windkraft und Landschaftsschutz* (SB).
- [2] P. Hüsler, NOVA ENERGIE, Brugg: *Infostelle Wind* (SB).
- [3] B. Liesch, ADEV, Bern: *Windmessung und Standortevaluation Schaber, Wyssachen, Bern* (JB).
- [4] E. Nussbaumer, ADEV, Liestal: *Kleinwindpark Grenchenberg, Liestal. ♦ Wartung Windkraftanlage Simplan, Liestal.*
- [5] K. Odermatt, KANTONALES ELEKTRIZITÄTSWERK NIDWALDEN, Stans: *Windkraftanlage im Hochgebirge, Chli Titlis, Gemeinde Engelberg* (JB).

- [6] M. Rutsch, APPENZELLISCHER VERBAND ZUR FÖRDERUNG ERNEUERBARER ENERGIE: *Windkraftanlage Chürstein, Herisau* (SB).
 - [7] J. Vollenweider, JUVENT-Berne: *Cyber-Marketingkonzept für das Windkraftwerk Mont-Crosin, Bern* (JB)
 - [8] D. Widmer, JUVENT-Berne: *Kombinierte Besuchereinformation Mont-Crosin, Mont-oleil, Bern* (JB).
- (JB) Jahresbericht 1996 vorhanden
- (SB) Schlussbericht vorhanden.

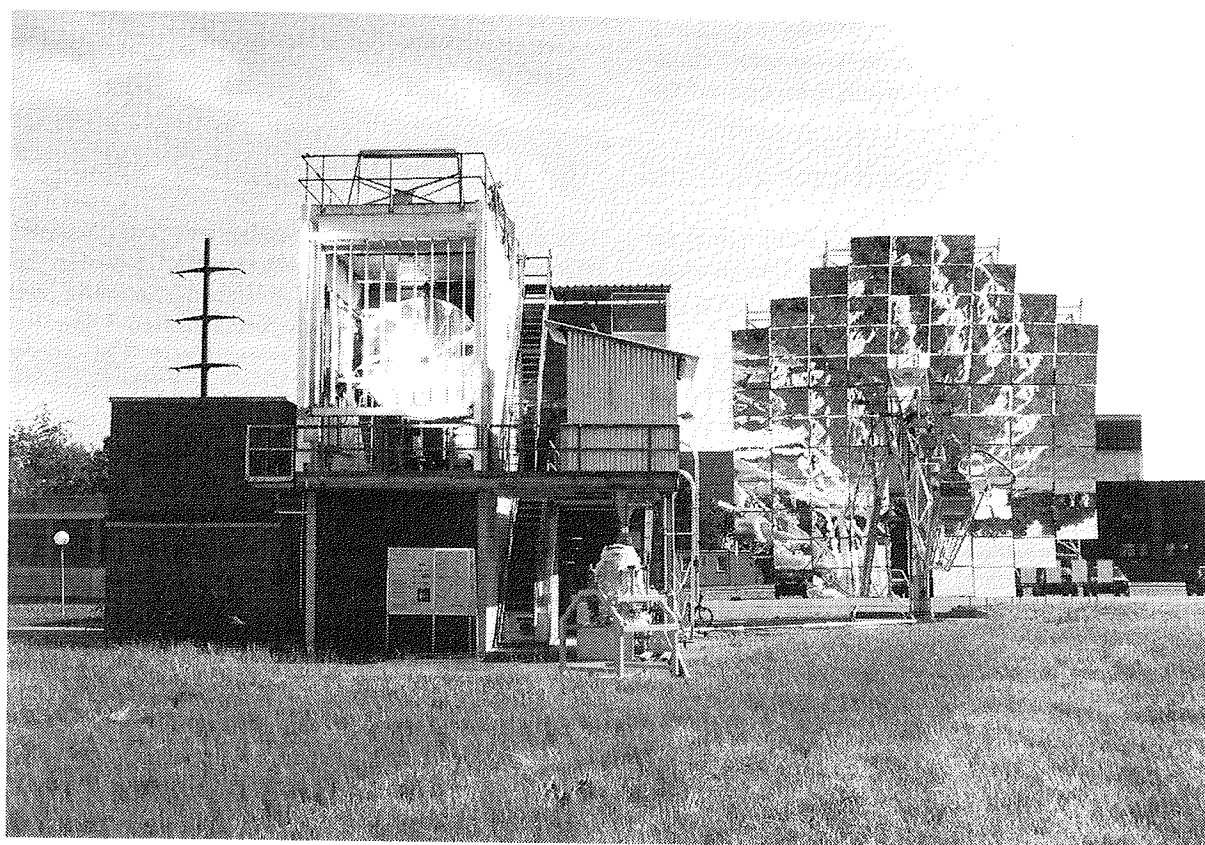
Referenzen

- [9] H. Seifert, Deutsches Windenergie-Institut DEWI: Projektbearbeitung "*The Icing of Wind-Turbines*" und "*Wind Energy utilisation in cold climate*", *Wilhelmshaven*, Deutschland.

SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Armin Reller



Solarkonzentrator-Anlagen am PSI

Durch einen der Sonne nachgeführten Heliostaten und einen festen Parabolspiegel (links) wird konzentriertes Sonnenlicht (10 kW) in den "Sonnenofen" fokussiert. Im Brennpunkt eines sonnengerichteten Parabolspiegels (rechts, 50 kW) erlaubt ein spezieller Reaktor chemische Experimente.

Programm-Schwerpunkte

Hauptmotivationen der Aktivitäten des Programms Solarchemie/Wasserstoff sind, nichterneuerbare, insbesondere fossile Energieträger durch regenerative, insbesondere Wasserstoff, zu ersetzen sowie Kohlendioxid in wiederverwendbare Verbindungen umzuwandeln. Dies geschieht mittels oft neuartiger Prozesse und entsprechender Verfahrenstechniken, welche solare Strahlungsenergie unterschiedlicher Konzentration sowie anderweitige regenerative Energiequellen möglichst effizient und ökologisch verantwortbar in nutzbare Prozesswärme, chemische Energieträger oder Strom umzuwandeln vermögen. Im Programm Solarchemie/Wasserstoff wird sehr viel Gewicht darauf gelegt, dem Zusammenhang zwischen Energietechnologie und den damit intrinsisch verknüpften Stoffumwandlungen angemessene Rechnung zu tragen. Zukunftsfähige Energiesysteme bedingen ein ebenso zukunftsfähiges Stoffmanagement. Deshalb wird den Material- und Werkstoffwissenschaften, aber auch den Energie- und Stoffbilanzen eine angemessene Bedeutung eingeräumt. Die für das Programm Solarchemie/Wasserstoff eingesetzten Mittel können nur dann effizient und erfolg-

reich umgesetzt werden, wenn Grundlagenwissenschaften, Angewandte Wissenschaften und Technische Realisierung sinnvoll und effizient koordiniert werden. Deshalb werden Projektteams aus Hochschulen sowie innovative Unternehmungen zusammengestellt, die in vorgegebenen Zeitrahmen zielgerichtete Arbeiten ausführen. Die angemessene Berücksichtigung internationaler Entwicklungen bzw. die Einbettung der Projektarbeiten in internationale Aktivitäten ist unabdingbar und wird ständig in Entscheidungen miteinbezogen. Die faktischen Eckpfeiler des Programms Solarchemie/Wasserstoff sind:

- Physikalischen Grundlagen der Umwandlung von Strahlung in nutzbare Energieformen
- Regenerative Prozesswärmeerzeugung
- Solarchemische Prozesse und Technische Photosynthese
- Wasserstofftechnologie
- Energierelevante Verfahrenstechnik und Materialwissenschaften

Anvisierte Zielpunkte für das Jahr 1996

Um eine effiziente Umwandlung von Strahlungsenergie in Prozesswärme, Strom oder chemische Energieträger zu erreichen, bedarf es detaillierter Kenntnisse der Wechselwirkungen zwischen Strahlungsenergie und Materie. Im Berichtsjahr wurden entsprechende theoretische Studien vorangetrieben, aber auch die messtechnischen Grundlagen für die Bestimmung der optischen Eigenschaften von Materialien sowie der Messung von Oberflächentemperaturen erarbeitet. Die Resultate sind von grosser Bedeutung für die Erzeugung von Prozesswärme im technischen Massstab. Sie bilden auch die Grundlage für ein vertieftes Verständnis der photochemischen Erzeugung von elektrischer Energie, der photoelektrochemischen Spaltung von Wasser und der thermochemischen Prozesse zur Herstellung von regenerativen Energieträgern.

Im Bereich der Prozesswärmeerzeugung wurden im Berichtsjahr die auf Dünnschicht-Technologie basierende industrielle Fertigung eines Warmwasserkollektors weitergeführt. Die wichtige Frage bezüglich Alterungsprozessen der Absorberschicht wurde experimentell bearbeitet. Die werkstoffseitigen Probleme der in volumetrischen Receivern erzeugten Prozesswärme, die mittels erhitzter Luft in industrielle Prozesse – z.B. der solar unterstützten Trocknung von Nahrungsmitteln oder der Zementherstellung eingekoppelt werden soll, wurden definiert. Lösungen kamen zumindest teilweise in Sicht. Die hochtemperatursolarchemischen Prozesse sollten bezüglich Effizienz und verfahrenstechnischer Realisierbarkeit untersucht werden. Die relevanten chemischen Prozesse wurden identifiziert und im Be-

reich der Reaktorforschung wurden ganz entscheidende Weichenstellungen vorgenommen. Die Arbeiten bezüglich der photoelektrochemischen Spaltung von Wasser sowie der elektrochemischen Reduktion von Kohlendioxid verliefen im Berichtsjahr sehr erfolgreich. Die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Systeme bzw. Prozesse sind sehr vielversprechend. Dies gilt auch für die katalytische Umwandlung von Kohlendioxid in nutzbare Produkte wie Methanol oder Amine. Die Forschungsaktivitäten im Bereich von Wasserstoff konzentrierten sich auf die obengenannte photoelektrochemische Spaltung von Wasser. Für die Speicherung wurden zwei Systeme intensiv untersucht: die Speicherung in günstigen Metallhydriden sowie die grosstechnische Speicherung in organischen Hydriden, d.h. in Methylcyclohexan. Es wurden Nutzungsszenarien definiert, die mittelfristig realisiert werden sollen. Darunter fallen die Ansätze, Quasi-Flüssig-Metall-Hydride für den Einsatz in mobilen Systemen voranzutreiben, die experimentellen Messungen an einem Wasserstoff-Verbrennungsmotor abzuschliessen, sowie industrielle Prozesse zu finden, die gegenwärtig mit nichterneuerbaren Energieträgern betrieben werden, potentiell aber auch mit Wasserstoff durchgeführt werden können. Die Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Hochschulforschung und angewandter bzw. industrieller Forschung wurde vor allem auf der Ebene von kleinen und mittelständischen Unternehmen vorangetrieben, wobei sich eine programmübergreifende Koordination der Aktivitäten als sehr wichtig erwies.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

THEORETISCHE STUDIEN

Das Verständnis der Wechselwirkung zwischen unterschiedlichen Strahlungsarten, d.h. ultraviolettem, sichtbarem und infrarotem Licht mit unterschiedlichen Materialien stellt eine wichtige Grundlage für die im Programm Solarchemie/Wasserstoff angestrebten Prozesse dar. Aber auch die Wechselwirkung von gasförmigen Molekülen mit nanokristalliner Materie erfordert eingehende energetische und strukturelle Studien. Es wurden deshalb quantenchemische Bandstrukturrechnungen unterschiedlich ausgeprägter Oberflächen des Photokatalysators Titanoxid durchgeführt [1]. Die Resultate sind insbesondere von Bedeutung für das

Verständnis der photoelektrochemischen bzw. photokatalytischen Aktivitäten von Titanoxid, z.B. bei der solar gestützten Detoxifikation von verschmutztem Abwasser. Weitere theoretische Studien sind dem Absorptions- und Emissionsverhalten unterschiedlicher Materialien in Strahlungsfeldern variabler Energiekonzentrationen gewidmet. Für die Auslegung von volumetrischen Receivern, aber auch für die direkte Umwandlung von Solarstrahlung in chemisches Potential mittels heterogener Prozesse sind diese Untersuchungen unabdingbar.

ERZEUGUNG VON PROZESSWÄRME

Da solar erzeugte Prozesswärme ein sehr breitgefächertes Einsatzpotential aufweist, wurden unterschiedliche Kollektor- und Receiversysteme weiterentwickelt und optimiert: Die technische Realisierung des in Zusammenarbeit mit der Universität Basel und dem Solarenergie Prüf- & Forschungslabor am ITR in Rapperswil entwickelte Warmwasserkollektors ABSORBER 2000 wurde zusammen mit der Industrie vorangetrieben [3]. Es wurde eine Methode für die Abscheidung von korrosionsbeständigen, solar selektiven metallhaltigen Kohlenwasserstoff-Schichten entwickelt. Die Alterungsbeständigkeit dieser sehr effizienten Beschichtungen wurde getestet. Es konnte auch gezeigt werden,

dass Chrom als zur Zeit eingesetztes Metall durch das weit umweltverträglichere Titan ersetzt werden kann. Die bisher erfolgreichen Untersuchungen erlaubten es, erste Vorversuche zur Entwicklung von Mittel- und Hochtemperaturabsorbern in Angriff zu nehmen. Ein seit einiger Zeit in Entwicklung stehender volumetrischer Receiver, KEREK [18], der auch Lufttemperaturen von $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ erzeugen kann, ist aufgrund von Problemen der thermochemischen und thermomechanischen Stabilität der verfügbaren Absorbermaterialien noch nicht im Pilotmassstab realisierbar. Materialwissenschaftliche Untersuchungen sind im Gange.

SOLARCHEMISCHE ERZEUGUNG VON ENERGIETRÄGERN, INSB. WASSERSTOFF

Die direkte Umwandlung von konzentrierter Solarstrahlung in chemische Energieträger zählt zu den Hauptstossrichtungen des Programms Solarchemie/Wasserstoff [4]. Dabei werden drei grundsätzlich unterschiedliche Lösungswege verfolgt:

- Zwei- oder mehrstufige thermochemische Kreisprozesse, die über Redoxprozesse von Metall/Metalloxid-Systemen die Spaltung von Wasser bzw. die Erzeugung von Wasserstoff als zukunftsfähigem Energieträger erlauben.
- Direkte photochemische Synthese von Energieträgern oder nutzbaren Chemikalien (*Upgrading*) an Halbleiteroberflächen erhöhter Temperatur.
- Prozesse, die auf einem solarfossilen Energiemix basieren, indem einerseits Kohle oder Erdgas mittels Metalloxiden in wertvollere Energieträger bzw. Chemikalien umgewandelt werden und andererseits industrielle Prozesse wie z.B. die Zementherstellung durch Einkopplung solarer Prozesswärme unterstützt werden.

Neben den thermodynamischen Grundlagen, die für alle Prozesse in der Entscheidungsphase in Betracht gezogen werden, sind begleitende grundlagenwissenschaftliche Studien sowie messtechnische Entwicklungen von grosser Bedeutung. Im Berichtsjahr wurden in Zusammenarbeit mit der Gruppe an der Universität Bern [1] quantenchemische Rechnungen der Wechselwirkung von Kohlendioxid mit Titanoxid-

halbleiteroberflächen durchgeführt. Diese Untersuchungen dienen insbesondere der Abschätzung des Potentials von Titanoxid für die Detoxifikation von Abwässern, aber vor allem auch für die Photoreduktion von Kohlendioxid. Während einer Messkampagne in Australien konnte die in den vergangenen Jahren entwickelte Methode zur simultanen Messung von Reflektivität, Bestrahlungsstärke und Temperatur am Ammoniakspaltungsreaktor der *Australian National University* erfolgreich eingesetzt werden. Zusätzlich wurde das Anwendungsspektrum dieser Messmethode beträchtlich erweitert, indem ein nicht-abbildendes Verfahren entwickelt wurde, das eine zeitliche Auflösung ($< 10\text{ sec}$) zulässt. Die Temperaturmessmethode wurde in volumetrischen Systemen zur Bestimmung der "Dreidimensionalen Temperaturverteilung" eingesetzt. Schliesslich wurde ein Emissiometer zur Messung der optischen Eigenschaften von Materialien bei hohen Temperaturen aufgebaut. Insgesamt stehen gegenwärtig bestqualifizierte Messgeräte zur Verfügung, die eine möglichst verlässliche Kontrolle der jeweiligen Prozessparameter garantieren. Bei dem seit einigen Jahren untersuchten Eisenoxidzyklus zur Wasserspaltung ist die solarthermische Reduktion des hochoxidierten Metalls einer der entscheidenden Prozessschritte. Aufgrund der Tatsache, dass Eisenoxidteilchen für diese thermische Reduktion, die bei Temperaturen von mindestens $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ abläuft, einer Strahlungsdichte von mindestens 550 W/cm^2 (7000 Sonnen) ausgesetzt werden müssen,

am PSI mit dem Pulverwolken-Durchflussreaktor aber nur Strahlungsdichten von 350 - 400 W/cm² erreicht werden, wurden Experimente an der Solaranlage des *Weizmann Institute of Science* durchgeführt. Dort sollten Konzentrationen von 8000 - 10'000 Sonnen erreichbar sein. Die Messungen mit dem am PSI entwickelten SunFlux II-System zeigten aber, dass nur Strahlungsdichten von 520 W/cm² (6000 Sonnen) erreicht wurden. Die angestrebte Reduktion von Eisenoxid konnte nicht verifiziert werden. Aufgrund dieser Befunde sowie weiterer Abklärungen wurde im Herbst '96 ein vorgesehenes *Scale-Up* des Pulverwolken-Durchflussreaktors storniert.

Kinetik und Mechanismus des Reoxidationsprozesses und des Wasserspaltungsprozesses wurden intensiv untersucht. Die Resultate sind für die effiziente Gewinnung von Wasserstoff aus der Reaktion von Metalloxiden oder Metallen mit Wasser von weitreichender Bedeutung. Für den Eisenoxidzyklus wurden extensive verfahrenstechnische Arbeiten durchgeführt. Schwerpunkt dieser Aktivitäten war die eingehende Charakterisierung und Modifizierung des am PSI entwickelten Pulverwolkenreaktors. Die nun zur Verfügung stehenden Kenndaten erlauben eine genaue Bestimmung des Einsatzpotentials und der Kenndaten dieses Reaktortyps.

Als zweiter wichtiger Metall/Metalloxidzyklus wurde das Zinkoxidsystem weiter untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass Zinkoxid auch an Luft thermisch reduziert, d.h. direkt in metallisches Zink und Sauerstoff gespalten werden kann. Dieser Befund ist von grosser Bedeutung, da das so synthetisierte Zink entweder zur Wasserspaltung und dementsprechend zur Erzeugung von Wasserstoff eingesetzt werden kann, oder aber als z.B. Batteriematerial weiterverwendet werden kann. Die effiziente Reaktionsführung bedingt den Bau eines angepassten Reaktors. Als zusätzliches wichtiges Resultat konnte gezeigt werden, dass Zinkoxid mit Methan mittels Solarenergieeinkopplung effizient in metallisches Zink und Synthesegas umgesetzt werden kann. Dieser Prozessstyp liefert in einem Schritt

eine wertvolle Grundchemikalie, Zink, sowie ein Gasgemisch, das entweder in einen Energieträger, z.B. Methanol, oder aber in Grundchemikalien umgewandelt werden kann.

Die erfolgreichen Experimente mit Metalloxiden und Methan (in Zukunft auch weitere Erdgaskomponenten) gaben Veranlassung, weitere, technisch interessante Metalloxidsysteme in Betracht zu ziehen. Die vorliegenden Resultate für das als Rohstoff in grossen Mengen vorliegende Eisentitanoxidmineral Ilmenit belegen, dass die solar unterstützte Reaktion mit Methan zu Synthesegas, Eisen und Titanoxiden führt. Dieser an sich komplexe Prozess zeigt, dass im Prinzip in einem Reaktionsschritt ein Metall, Eisen, ein für die Pigmentindustrie wichtiges Metalloxid, Titanoxid, sowie ein weiter nutzbares Gasgemisch, Synthesegas, gewonnen werden kann. Auch für diese Entwicklung wurden parallel Reaktorentwicklungen vorangetrieben, die mittelfristig eine verfahrenstechnische Optimierung garantieren sollen. Diese Arbeiten umfassen auch computergestützte Berechnungen und Modellierungen der Prozessdynamik sowie des Reaktordesigns.

In Zusammenarbeit mit Forschern des *Tokyo Institute of Technology*, und dem *Boriskov Institute of Catalysis*, Novosibirsk, wurden weitere Prozesse im Sonnenofen charakterisiert: hier handelt es sich um die Kohlevergasung mittels Metalloxid-Redoxprozessen und um das katalytische Cracken von Kohlenwasserstoffen. In beiden Fällen ergaben sich vielversprechende Ansätze für die Bereitstellung von Energieträgern oder die Herstellung von Funktionsmaterialien wie z.B. Aktivkohle oder "Nanotubuli". Als sehr praxisbezogener Prozess wurde schliesslich die solare Zementherstellung bzw. das solare Kalkbrennen in Zusammenarbeit mit der Industrie (HOLDERBANK, KRUPP-POLYSISUS, ABB, BOMIN-SOLAR) in bezug auf eine mögliche Realisierung begutachtet. Der Entscheid, ob in Kürze eine kleine Pilotanlage aufgebaut werden soll, ist noch nicht gefällt. Argumente und Kriterien werden zur Zeit mittels einer Machbarkeitsstudie erhoben.

PHOTOELEKTROCHEMISCHE PROZESSE UND SPALTUNG VON WASSER

Ein nunmehr etabliertes Verbundprojekt zwischen den Universitäten Bern [2] und Genf [6] sowie der EPF-Lausanne [9] ist der Photolyse von Wasser gewidmet. Die übergeordneten Ziele sind:

- Photoelektrochemische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff
- Zersetzung von Meerwasser in Wasserstoff und Chlor
- Oxidativer Abbau von organischen Schadstoffen zu Kohlendioxid und Wasser

Im Berichtsjahr wurden sehr wichtige Resultate erzielt. Es gelang, nanostrukturierte, transparente Wolframtrioxid-Schichten herzustellen (Patent soll angemeldet

werden), an denen die Zersetzung von Wasser bzw. Meerwasser mit einem Wirkungsgrad von > 4,5 % erreicht wurde. Diese Fakten wurden an einer Zelle belegt, die von einer Seite bestrahlt wird. Ebenso konnte die Spannung einer in Serie geschalteten Titanoxid-Photoelektrode beträchtlich verbessert werden. Schliesslich gelang es vor kurzem, die Reversibilität der Oxidation von Silber – dem entscheidenden Schritt bei der photoelektrochemischen Oxidation von Wasser an Silberchlorid-Schichten – nachzuweisen. Insgesamt verliefen die photoelektrochemischen Studien erfolgreich. Für die Planung der nächsten Schritte konnten dementsprechend genaue Vorgaben festgelegt werden.

SPEICHERUNG UND TRANSPORT VON WASSERSTOFF

Für eine zukünftige verstärkte Nutzung von Wasserstoff als Energieträger oder als Grundchemikalie wer-

den geeignete Speicher- und Transportformen von entscheidender Bedeutung sein. Im Programm Solarche-

mie / Wasserstoff werden in fünf Projekten realisierbare Lösungen gesucht: An der Universität Genf [8] werden neuartige Metallhydride synthetisiert und charakterisiert. Ziel ist es, leichte und möglichst günstige Metalllegierungen zu identifizieren, in denen maximale Mengen von Wasserstoff reversibel eingelagert und wieder ausgetrieben werden können. An der Universität Fribourg [10] werden ebenfalls Metallhydride zwecks Einsatz in Batteriesystemen oder anderen technischen Anwendungen bezüglich Kinetik und Mechanismus der Beladung und Entladung charakterisiert. Es konnte an einer Lanthan-Magnesium-Legierung gezeigt werden, dass die Hydridbildungsrate mit einem Katalysator, d.h. durch die Bildung einer Compositlegierung der Zusammensetzung Lanthan-Magnesium/Lanthan-Nickel um etwa einen Faktor 10 gesteigert wird. Diese Befunde sind neben den obengenannten Kriterien für eine technische Nutzung von Metallhydriden entscheidend.

NUTZUNG VON WASSERSTOFF

Von der Firma LARAG, Wil, wurde der Einsatz von Wasserstoff als Treibstoff für einen Dieselmotor getestet [17]. Der Umbau des Aggregats konnte erfolgreich abgeschlossen und sowohl Leistungs- als auch Abgasdaten umfassend erhoben werden. Aufgrund der in diesem Projekt erarbeiteten und auch aufgrund internationaler Untersuchungen hat der Wasserstoff-Verbrennungsmotor einen technischen Stand erreicht, der gegenwärtig keine grossangelegten weiteren R & D Aktivitäten erfordert.

Um neue Segmente der Wasserstoff-Nutzung zu eröffnen wird an der Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Paul Scherrer Institut die thermische Reduktion von Metallerzen mit Wasserstoff untersucht [15]. Diese Prozessführung hat die Vorteile, dass im

Ein unkonventioneller, aber attraktiver Ansatz wird an der Ingenieurschule Burgdorf [11] verfolgt: Dort werden sog. Quasi-Liquid-Metal-Hydrides (QLMH) als Wasserstoffträger bzw. als Speicher- und Transportmedium untersucht. Der Vorteil dieser in inerten organischen Flüssigkeiten dispergierten Metallhydride ist darin zu sehen, dass ein leicht handhabbares, quasi-flüssiges System für unterschiedliche Anwendungen realisiert werden kann.

Für die saisonale Speicherung sollen in Zukunft organische Hydride eingesetzt werden. Der am Paul Scherrer Institut bearbeitete Methylcyclohexan-Toluol-Zyklus (MTH-Prozess) stellt den bis heute vielversprechendsten Ansatz dar [5]. Für diesen Prozess relevante verfahrenstechnische Fortschritte wurden durch die Entwicklung von Membranen mit unterschiedlichen Geometrien erzielt [13].

Gegensatz zur grossindustriell üblichen carbothermischen Reduktion kein Kohlendioxid freigesetzt wird und dass metallselektive Reduktionen realisierbar werden. Da die zu verarbeitenden Metallerze in der Regel Gemische von mehreren Phasen darstellen, kann die Wasserstoffreduktion trotz ökonomischer Nachteile gegenüber fossiler Verbindungen zu einer attraktiven Alternative werden.

Die für die Nutzung von Wasserstoff aber auch für die meisten R & D Aktivitäten des Programms relevanten material- und werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen wurden durch Auftragsarbeiten an der ETH-Zürich [12] sowie an der Universität Zürich [16] durchgeführt.

KATALYTISCHE UND ELEKTROCHEMISCHE REDUKTION VON KOHLENDIOXID

Die Untersuchungen der katalytischen und elektrochemischen Reduktion von Kohlendioxid wurde an der ETH-Zürich [14] sowie an der Universität Genf [7] erfolgreich weitergeführt. Neben der Synthese von unterschiedlichen Grundchemikalien konnten vor allem

durch Untersuchungen von Reaktionen in überkritischem Kohlendioxid sehr bemerkenswerte, neue Synthesewege gefunden werden. Die Resultate wurden ende des vergangenen Jahres patentrechtlich geschützt.

Nationale Zusammenarbeit

Mit dem Projekt ABSORBER 2000 besteht weiterhin eine übergreifende Zusammenarbeit zwischen den Programmen Aktive Solarnutzung und Solarchemie/Wasserstoff. Ende 1996 sind mit einem Industriebetrieb erste Versuche zur Beschichtung grösserer Kollektorflächen mit gutem Erfolg durchgeführt worden. Weitere Schritte in Richtung technische Fertigung werden an der Universität Basel und am Technikum Rapperswil erarbeitet.

Durch die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Reaktorsysteme sowie im Bereich der solar betriebenen Prozesse konnte vermehrt das Interesse von Industrieunternehmen geweckt werden. Zur Zeit läuft zusammen mit der Zementfirma HOLDERBANK und dem Anlagebauer KRUPP POLYSIUS eine Machbarkeitsstudie für ein mit solarer Prozesswärme betriebenes oder unterstütztes Zementwerk. Diesem Projekt kommt grosse Bedeutung zu, da die genannten Unternehmen weltweit, insbesondere auch im "Sonnengürtel" aktiv sind.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wurde im Berichtsjahr weiter ausgebaut. Die Tatsache, dass der Programmleiter in einem EU-Land arbeitet, konnte hinsichtlich möglicher Beteiligungen an europäischen Forschungsprogrammen ausgenutzt werden.

Folgende IEA-Programme werden von der Schweiz geleitet:

- *Solar Chemistry*,
- *Photoelectrochemical Hydrogen Production*,
- *Case Studies of Hydrogen Energy Systems*.

Die gegenwärtig gute Infrastruktur und die hohe Fachkompetenz der Projektnehmer bilden die Grundlagen für weitgespannte und intensive internationale Zusammenarbeiten. Als wichtigste Partnerinstitutionen sind zu nennen:

- Universität Hamburg, Institut für Anorganische und Angewandte Chemie, Deutschland
- Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln, Deutschland
- *Plataforma Solar de Almería*, Spanien
- *Sandia National Laboratories*, Albuquerque, New Mexico, USA
- *Solar Energy Research Center*, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg, Deutschland
- *Borshkov Institute of Catalysis*, Novosibirsk, Russland
- *Tokio Institute of Technology*, Japan
- *NREL*, Golden, Colorado, USA

Transfer in die Praxis

Viele Arbeiten des Programms Solarchemie/Wasserstoff wurden an nationalen und internationalen Konferenzen und Symposien mit gutem Erfolg vorgestellt. Veranstaltungen, die massgeblich mitorganisiert und teilweise mitfinanziert wurden, sind: *Hydrogen '96 in Stuttgart*, das *International Symposium on Metal Hydrogen Systems*, *Les Diablerets*, *XIIIth International Symposium on the Reactivity of Solids*, Hamburg sowie

das *8th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, Köln.

Es wurden viele neuen Industriekontakte geknüpft, die als wichtige Grundlage für die Umsetzung der erzielten Forschungsergebnisse zu betrachten sind. Gerade durch die genannte Machbarkeitsstudie eines solaren Zementwerks oder durch Vorbesprechungen mit der Firma Nestlé eröffnen sich neue und aussichtsreiche Umsetzungspotentiale.

Bewertung der Ergebnisse

Im Berichtsjahr konnten sehr wertvolle Ergebnisse erzielt sowie wichtige Weichenstellungen vorgenommen werden. Im Bereich der aktiven Solarenergienutzung musste der geplante *Scale-Up* des Pulverwolkenreaktors zwar zurückgestellt werden, aber durch die zielstrebige Weiterentwicklung des ABSORBER 2000 sowie durch die neuen Prozesse zur Herstellung von Wasserstoff mittels Metalloxidzyklen und die Reduktion von Metallerzen mit Wasserstoff wurde eine sehr gute Ausgangslage für technische Nutzungen geschaffen. Dies gilt ebenfalls für die Fortschritte bei der photoelektrochemischen Erzeugung von Wasserstoff und bei der Speicherung von Wasserstoff in Metallhydriden.

Durch gezielt geknüpfte Industriekontakte konnten die für eine Umsetzung der Resultate unabdingbaren Voraussetzungen geschaffen werden.

Insgesamt wurde das Programm Solarchemie/Wasserstoff weiter umstrukturiert und auf Schwerpunktthemen konzentriert. Die angestrebte Verbesserung der materialwissenschaftlichen Grundlagen erbrachte nennenswerte Erfolge, so bei der vielversprechenden Entwicklung von Elektrodenmaterialien für die photoelektrochemische Spaltung von Wasser oder bei der Verbesserung effizienter Absorber-Schichten. Insgesamt konnte der internationale Stellenwert der Forschungsaktivitäten klar verstärkt werden.

Ausblick für das Jahr 1997

Die grundlagen- und materialwissenschaftlichen Arbeiten sollen zielgerichtet vertieft werden. Dadurch soll nicht nur die Basis für die gegenwärtig laufenden Projekte gesichert bleiben, sondern vor allem auch die Ausgangslage für neue, technisch realisierbare Prozesse und Produkte verbessert werden. Die Industriekontakte müssen intensiviert werden, um baldmöglichst P & D Projekte realisieren zu können. Es zeichnet sich klar

ab, dass programmübergreifende Projekte immer bedeutungsvoller werden, da die in die Praxis umsetzbaren Resultate in der Regel vielfältige Kriterien erfüllen müssen, deshalb sehr unterschiedliche Fachkompetenz erfordern.

Ein Meilenstein in der Geschichte der schweizerischen Solarenergieforschung wird die Errichtung des aus Ei-

genmitteln des Paul Scherrer Instituts finanzierten Parabol-Konzentrators mit einer maximalen Konzentrationsfähigkeit von 13'000 Sonnen sein. Diese Anlage, die voraussichtlich im kommenden August eingeweiht wird, ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Mess- und Experimentierkapazitäten, sowie – mit geeigneten Sonnenöfen – eine klare Erweiterung der Palette durchführbarer chemischer Prozesse. Dies wird

ohne Zweifel einer wünschenswerten Intensivierung der internationalen Kollaborationen förderlich sein.

Der Ausbildung von Fachleuten und der Kommunikation der Resultate soll noch mehr Gewicht beigemessen werden. Ein konkreter Schritt ist die Organisation und Ausrichtung des *International Symposium on Solar Chemistry* am PSI vom 6. - 8. Oktober 1997.

Liste der Projekte

- [1] F. Savary und G. Calzaferri, UNI-Bern: *Tight-binding calculations on TiO₂ und Interaction of CO₂ with small rutile crystallites.* (SB)
- [2] G. Calzaferri, UNI-Bern: *Photochemische und elektrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie.* (SB)
- [3] P. Oelhafen, et al., UNI-Basel: *Optisch selektive Schichten für die thermische Konversion von Solarenergie.* (JB)
- [4] A. Wokaun, et al., PSI-Villigen: *Direkte Umwandlung von konzentrierter Sonnenenergie in chemische Energieträger.* (JB) ♦ *Entwicklung und Untersuchung von Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe mittels konzentrierter Solarstrahlung.* (JB)
- [5] T. Schucan und E. Newson, PSI-Villigen: *Seasonal Storage of Electricity.* (SB)
- [6] J. Augustynski und M. Ulmann, UNI-Genève: *Photolysis of water and solar generation of hydrogen and oxygen.* (JB)
- [7] J. Augustynski, UNI-Genève: *Réduction électrolytique et photocatalytique du bioxyde de carbone.*
- [8] K. Yvon, UNI-Genève: *New Metal Hydrides for Hydrogen Storage.* (JB)
- [9] M. Grätzel, EPF-Lausanne: *Photolyse de l'eau et production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire.* (JB)
- [10] L. Schlappbach und A. Züttel, UNI-Fribourg: *Niedertemperatur-Hydridlegierung höherer Speicherdichte.* (JB)
- [11] T. Bücherer und K. Marti, HTL-Burgdorf: *Niedertemperatur-Hydridlegierung höherer Speicherdichte.* (SB)
- [12] V. Shklover, ETH-Zürich: *Materialwissenschaftliche Untersuchungen.* (JB)
- [13] D.W.T. Rippin, et al., ETH-Zürich: *Application of Tube and Foil Membranes.* (SB)
- [14] A. Baiker und R. Köppel, ETH-Zürich: *Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen CO₂-Quellen.* (SB)
- [15] A. Reller und U. Sazama, UNI-Hamburg: *Thermochemische Prozesse mit Wasserstoff.*
- [16] P. Hug und H.R. Oswald, UNI-Zürich und A. Reller, UNI-Hamburg: *Festkörperchemische und materialwissenschaftliche Untersuchungen des thermo-chemischen Reaktionsverhaltens von Phasen, die für die chemische Speicherung von Sonnenenergie relevant sind.* (SB)
- [17] M. Jäger, LARAG, Wil: *Wasserstoffmotor für das MTH-System.* (SB)
- [18] H. FRICKER, Rickenbach: *KEREC: Keramisches Absorber-/Receiversystem*

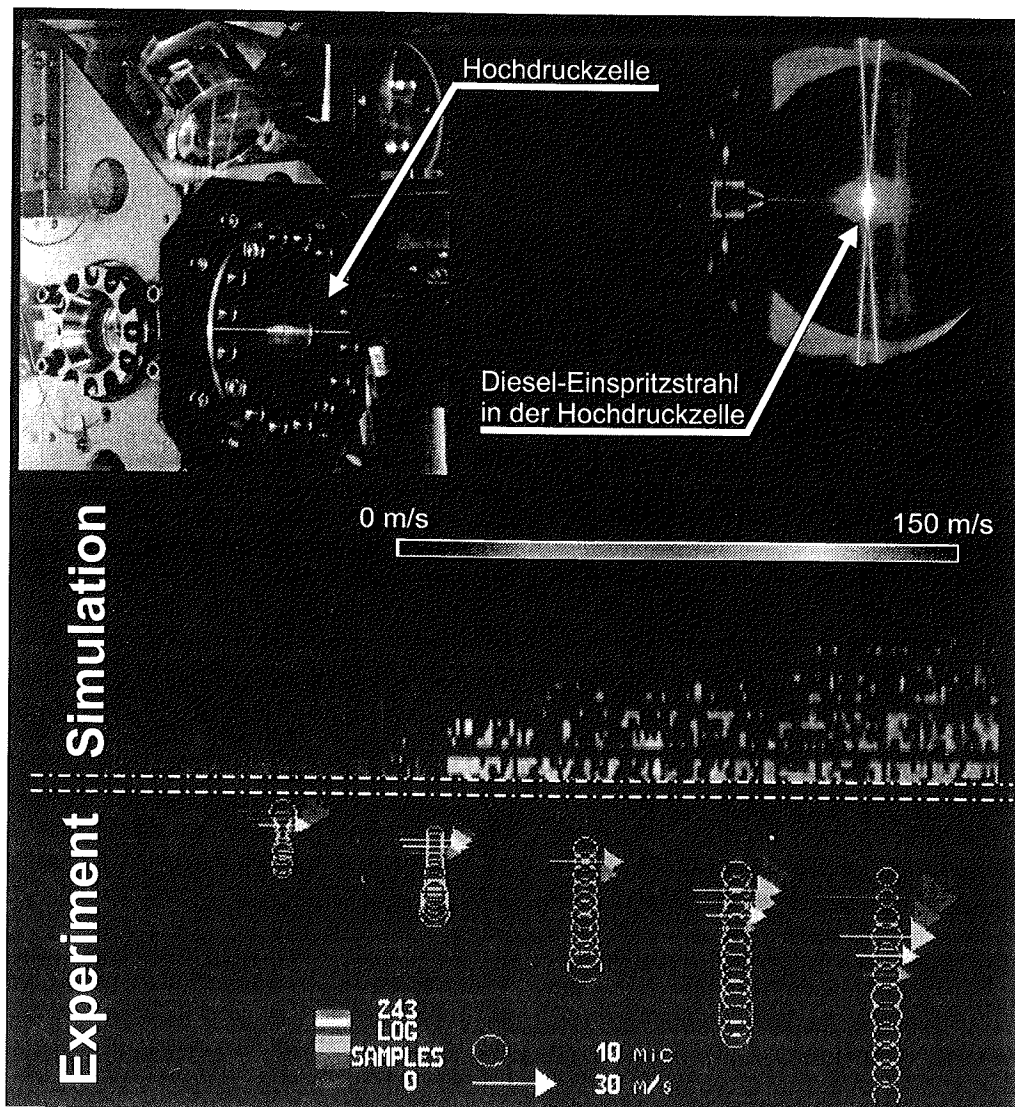
(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Alphons Hintermann



Laseroptische Messungen

an Brennstoffstrahlen und der Gemischaufbereitung unter dieselmotorischen- resp. Gasturbinenbedingungen in der **Hochtemperatur- und Hochdruckzelle** (ETH-Zürich und PSI). Vergleich der theoretischen Berechnung der Geschwindigkeiten des Einspritzstrahls mit dem Experiment.

Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1996

Das Forschungsprogramm **"Feuerung & Verbrennung"** befasst sich seit 1988 mit den **Grundlagen der Verbrennungsprozesse**. Das Spektrum dieses Schwerpunkts bewegt sich von den stationären Feuerungen zur motorischen Verbrennung bis hin zu den Verbrennungsvorgängen in Gasturbinen und Abfallverbrennungsanlagen. Mit den erarbeiteten Grundlagen sollen die Wissenslücken geschlossen werden, damit die Verbrennung so gesteuert werden kann, dass neben optimaler Leistung die Luftreinhalte-Grenzwerte ohne Abgasnachbehandlung unterboten werden, resp. Die Grenzwerte dank neuentwickelter Technologien weiter verschärft werden können. Das mit den heute zur Verfügung stehenden modernen Methoden der Computer- und Lasertechnologie erarbeitete Grundlagenwissen wird daher **aktiv** in der Privatwirtschaft **umgesetzt** und umgekehrt werden Bedürfnisse aus der Praxis an den Hochschulinstituten bearbeitet.

Das Hauptwerkzeug zu den Grundlagen wird in den beiden Programmschwerpunkten **"Numerische Simulation"** und **"Optische Messmethoden"** erarbeitet. Sie bedingen sich gegenseitig – der eine dient zur Validierung des andern – und beide sind einem raschen Technologiewandel unterworfen. Immer schnellere Computer und effizientere Algorithmen erlauben einen immer detaillierteren Einbezug der komplexen chemischen Reaktionen während des Verbrennungsprozesses und fordern beispielsweise als Input bessere experimentelle Daten von Reaktionskonstanten und/oder die Detektion kurzlebiger Radikale. Hier ist der Laserexperimentator gefordert.

Einen weiteren Programmschwerpunkt bildet die **Schadstoffreduktion und die Schadstoffanalytik**, wobei die Bildungsmechanismen von Schadstoffen während der Verbrennung im Vordergrund stehen.

Überhaupt sind die einzelnen Schwerpunkte nur thematisch leicht auseinander zu halten. In den einzelnen Projekten kommen meist alle zusammen, jedoch mit unterschiedlicher Gewichtung, zum Einsatz.

Es liegt in der Natur der Sache, dass diese Programmaktivitäten vorzugsweise an den Hochschulen und am PSI angesiedelt sind. Einerseits, um im hochgradig interdisziplinären Gebiet der Verbrennungsforschung die Synergien des Umfeldes und dessen Ressourcen optimal zu nutzen, andererseits um das erarbeitete Wissen in der Lehre umzusetzen und der Fachwelt zur freien Verfügung zu stellen. Dieser freie Zugang zum erarbeiteten Fachwissen ist bei reinen Industrieprojekten stark eingeschränkt. Bei Zusammenarbeitsprojekten der Hochschule mit der Privatwirtschaft steht zumindest das Hochschulwissen mit einer gewissen Zeitverzögerung allen zur Verfügung.

Die Hauptanliegen im Berichtsjahr waren die Wahrung der Kontinuität und des erreichten internationalen Standards in der Forschung, das Ausarbeiten des Forschungsprogramms 1996-1999 und die verstärkte Umsetzung der Forschungsergebnisse. Die Organisation und Durchführung zweier internationaler Konferenzen in Zürich im September 1996 bildeten wichtige Meilensteine im Programm. Sie dienten auch als Kontaktbörse für neue Industriepartner im EU-Raum.

Das Forschungsprogramm 1996-1999 [21] wurde von der Eidg. Energieforschungskommission CORE genehmigt und vom BEW zur Ausführung freigegeben. Die Umsetzung des erarbeiteten Grundlagenwissens soll jedoch noch weiter verstärkt werden. Sie wird deshalb zusammen mit der Wahrung der Kontinuität in der Forschung ein zentrales Anliegen in den kommenden Jahren sein.

1996 durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Im Projekt **Turbulenzparameter von Strömungen** [1] konnten die international stark beachteten, weltweit erstmaligen örtlich und zeitlich koinzidenten dreidimensionalen Laser-Doppler Messungen [22] des Strömungsfeldes im Verbrennungsmotor abgeschlossen werden. Mit einem neuen numerischen Code für die Verbrennung bei tiefen Machzahlen, der auch die Chemie berücksichtigt, konnten erste Resultate am 26th int. *Symposium on Combustion* im August 1996 in Neapel präsentiert werden. Eine rege Zusammenarbeit besteht mit der Princeton University, dem PSI, der ABB und der ETH-Lausanne.

Ein numerisches Modell zur Simulation der laminaren, katalytisch stabilisierten Verbrennung von Methan in Kanälen wurde im Vorhaben **Experimentelle und numerische Untersuchung der Kopplung von heterogener und homogener Tieftemperaturverbrennung bei hohen Drücken und turbulenten Strömungsbedingungen** [5] fertiggestellt. Es enthält einen detaillierten

Chemismus für die Gasphase und die katalytische Oberfläche. Erste Simulationsresultate sind vorhanden; sie sollen später mit den geplanten Experimenten zur Klärung der gegenseitigen Beeinflussung der Prozesse in der Gasphase und auf der Oberfläche verglichen werden [23]. Die Technik der katalytisch stabilisierten Verbrennung ist besonders attraktiv für die Anwendung in Gasturbinen. Daher wird insbesondere der Einfluss des Drucks berechnet und später auch experimentell untersucht werden.

In Zusammenarbeit des Laboratoriums für Verbrennungsmotoren und Verbrennungstechnik (LVV) der ETHZ und des PSI wurde in den letzten beiden Jahren eine **Konstantvolumen-Hochtemperatur und Hochdruckzelle (HDTZ, siehe Titelbild)** entwickelt. Sie ermöglicht die Untersuchung von dieselmotorischen Vorgängen wie der Einspritzung, Tröpfchenbildung/-Zerstäubung des Einspritzstrahls, der Zündung des Gemisches und dessen Verbrennung sowie der Schad-

stoffbildung. Im Gegensatz zu einem realen Motor kann mit dieser Zelle ein grösserer Bereich von Parametern, z.B. Druck und Temperatur der Verbrennungsluft abgedeckt werden. Der Zugang für laseroptische Messmethoden ist durch fünf grosse Fenster gewährleistet. Die Laseroptik und die HDTZ bilden eine Einheit. Die HDTZ ist für experimentelle Parameterstudien wie auch zur Validierung von Computersimulationen von Verbrennungsprozessen konzipiert. Die am LVV erarbeiteten Diagramme im Titelbild zeigen den Vergleich von Experiment und Rechnung der radialen Geschwindigkeitsverläufe der eingespritzten Tropfen bei einer Distanz von 25 mm vom Düsenaustritt mit guter Übereinstimmung. Mit der schon 1996 operativen HDTZ am LVV sollen vor allem physikalische Parameter während der Verbrennung gemessen und mit der Theorie verglichen werden. Ab 1997 steht eine zweite HDTZ am PSI im Einsatz, an der im Projekt **Anwendung laseroptischer Messmethoden in der Hoch-**

druckverbrennung [6] vorwiegend chemische Komponenten wie Spezies-, NO- und Stöchiometrieverteilungen gemessen werden sollen.

Die HDTZ ist Hauptversuchsträger im Projekt **Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung** [2]. Für eine Akkumulier-Einspritzdüse wurden Gastemperatur und -Druck für verschiedene Arbeitszyklen in der HDTZ gemessen. Auf der theoretischen Seite wurde ein Zerfallsmodell für Brennstoffstrahlen und -Tropfen entwickelt, welches die verschiedenen Grundmechanismen des Tropfenzerfalls einbezieht und die Simulation des Flüssigkeitskerns am Düsenaustritt zu berücksichtigen erlaubt.

Weitere Grundlagen der Verbrennung werden insbesondere mit den verschiedensten, zum Teil recht innovativen optischen Messmethoden erarbeitet, die in den folgenden Projekten samt Anwendungsbereichen beschrieben sind.

OPTISCHE MESSMETHODEN

Unter dem Titel **Methoden der digitalen Bildverarbeitung zur Ermittlung eines 2D-Geschwindigkeitsfeldes** [3] wurde das Einsatzfeld planarer Lasermessmethoden zur Erfassung eines zweidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes erarbeitet und gleichzeitig das Einsatzpotential der digitalen Bildverarbeitung abgeschätzt. Bildaufnahme, -Aufbereitung und -Auswertung wurde mittlerweile in ein einsatzbereites neues Lasermessverfahren integriert. Mit ihm konnte das Geschwindigkeitsprofil sowie die Rezirkulationszonen in einem Stufenkanal gemessen werden. Ausserdem gelang es, bei höheren Reynoldszahlen die Schwingungsphänomene der Strömung qualitativ zu erfassen. Die Vergleiche mit der direkten numerischen Simulation ergeben eine sehr gute Übereinstimmung.

Im Vorhaben **Messungen von relativen und absoluten Konzentrationen instabiler Moleküle in Flammen mit laserspektroskopischen Methoden** [7] gelangen verschiedene Messmethoden zum Einsatz. Kurzlebige Spezies wie NH in Flammen konnten mit *Two Colour Resonant Four Wave Mixing* nachgewiesen werden [24]. Mit dieser Methode gelang es, aus einer Fülle von zum Teil überlappenden Spektrallinien ausgewählte Linien mit sehr gutem Signal-Rauschabstand zu messen. Damit werden bestimmte Spezies unabhängig von der störenden Flammenumgebung nachweisbar. Die Verteilungen von OH und NO in einem industriellen Ofen [25] wurde als Auftragsforschung aus der Industrie mit Laser induzierter Fluoreszenz visualisiert und quantifiziert. Mit modifizierten Auswertemethoden wurden CARS- und LDA-Messungen in partikelgeladenen Flammen erfolgreich durchgeführt. Ferner gelang es, mit einer pyrolytischen Radikalenquelle CH₃-Radikale in einem Molekularstrahl zu erzeugen. Die erzielten Dichten erlauben eine Untersuchung mit nichtlinearen Spektroskopien.

Durch die Aufnahme zweier Hologramme mit Licht, das für eine der Spezies resonant ist, und simultan dazu mit Licht neben einer Resonanz, konnten durch diese Spezies verursachte Brechungsindexänderungen unab-

hängig von der unbekannten Gaszusammensetzung bestimmt werden. Mit dieser resonanten holographischen Interferometrie konnte im Projekt **Temperatur- und Turbulenzstrukturierung in Flammen** [8] die Verteilung der Temperatur und der Konzentration von NH- und OH-Radikalen in einer NH₃/O₂ Flamme eines WOLFHARD-PARKER Brenners gemessen werden.

Im nun abgeschlossenen Projekt **Schnell-Messverfahren in Flammen** [10] wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die qualitative Temperaturverteilung einer Flamme auf rasche, unkomplizierte Art visualisiert werden kann. Messprinzip ist die Aufnahme und Verarbeitung der thermischen Flammenstrahlung. Die theoretischen Grundlagen sowie eine ausführliche Beschreibung der Einsatzmöglichkeiten und Grenzen dieses Messsystems sind in einer Dissertation [26] zusammengefasst. Ein solches Schnell-Messverfahren kann in der Entwicklung von schadstoffarmen Brennern eingesetzt werden. Das 1995 aufgebaute Demonstrationssystem **FLAMIR** wurde im Berichtsjahr vervollständigt und interessierten Industriefirmen – mit aufgrund der heutigen Wirtschaftslage leider mässigem Echo – vorgestellt. Hingegen scheint sich ein Technologietransfer zum Institut für technische Chemie der ETH-Zürich anzubahnen. Dort wird ein Einsatz von FLAMIR für die Analyse von verbrennungsähnlichen Prozessen bei der Erzeugung neuer Werkstoffe ins Auge gefasst.

Entscheidende Fortschritte bei den experimentellen Arbeiten und bei der numerischen Simulation wurden 1996 im Projekt **Flammenstrahlung in Gasturbinen-Brennkammern** [11] und in dem in Kürze abgeschlossenen NEFF-Projekt **Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck** [27] erzielt. Die Messeinrichtung für die lokale Russkonzentrationsmessung am Versuchsträger DIVA (ABB-Baden) wurde soweit verbessert, dass bei allen praktisch vorkommenden Drücken und Konzentrationen Messungen durchgeführt werden können. Das Dispersionsquotienten-Verfahren wurde neu auf drei Laserstrahlen ausgebaut. Die Grösse der Russpartikel während des Verbren-

nungsprozesses konnte damit eindeutig bestimmt werden.

Die im NEFF-Projekt **Gesetzmässigkeiten des wandnahen Wärmeübergangs in instationären Verbrennungssystemen** [28] untersuchten Wärmetransportvorgänge sind für die Motorenindustrie von grossem Interesse. Dazu wurde ein neues optisches Verfahren zur Messung dreidimensionaler Temperaturfelder entwickelt. Die geforderte Hologrammauflösung von 1/1000 Streifenabstand konnte erreicht werden und Temperaturen können mit einer Genauigkeit von 0,1°K und

einer örtlichen Auflösung von $\pm 2 \mu\text{m}$ gemessen werden.

Neuartige Messmethoden, die via eine Sondenspitze, welche in die Glühkerzenbohrung eines Motors eingeschraubt werden kann, kommen im NEFF-Projekt **Verfahren zur Einspritzoptimierung von Direct Injection-Dieselmotoren** [29] zum Einsatz. Erste Versuche mit dieser Sondenspitze zeigen vielversprechende Resultate bezüglich des Russaufbaus: Ab Mittellast ist unter Motorbetrieb keine Russschichtbildung mehr feststellbar.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSVORGÄNGEN

Der numerische Teil des Projekts **Modellierung der NO-Bildung in Flammen** [12] ist nun abgeschlossen. Dabei wurden die Stickoxidbildung an verschiedenen Wasserstoff/Helium Flammen numerisch unter Verwendung der Verbrennungsmodelle PEUL und Flamelet untersucht und mit Messdaten (Spezies und Temperaturdaten von SANDIA (USA), Geschwindigkeitsmessungen an der ETHZ) validiert und eine gute Übereinstimmung von Rechnungen und Messungen gezeigt. Ein detaillierter Bericht zu den Rechnungen liegt in Form einer Dissertation [30] vor. Die Wasserstoff/Helium Flammendaten wurden von den Experten am internationalen *Workshop on Measurement and Computation of Turbulent Nonpremixed Flames*

(Naples, Juli 1996) einstimmig in den internationalen Katalog der Standard-Flammen aufgenommen.

Im Berichtsjahr wurde im Projekt **Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern** [13] transiente, vorgemischte Flammen numerisch untersucht und das bestehende Modell in ein transientes Laminare Flamelet Modell erweitert. Das instationäre Flammen kann damit erfolgreich simuliert werden. Die Modelle sind im kommerziellen *Computational Fluid Dynamics-Code* TASKFLOW eingebaut und können von andern Anwendern relativ einfach bedient werden. Mit einer Dissertation [31] ist dieses Projekt zu einem vorläufigen Abschluss gebracht worden.

SCHADSTOFFREDUKTION UND SCHADSTOFFASPEKTE

Basierend auf Ergebnissen [32] von Vorläuferprojekten wird im Vorhaben **NO_x-Reduktion mit Harnstoff-SCR** [9] die Realisierbarkeit von Harnstoff-SCR bei Fahrzeugen untersucht. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von beschichteten SCR-Katalysatoren, welche beim Einsatz an mobilen Dieselmotoren, d.h. bei instationärem Betrieb, bessere Eigenschaften aufweisen sollten. Zwei neuere Vollkatalysatoren wurden an der Dieselmotor-Versuchsanlage vollständig ausgetestet und zeigten hervorragende Resultate. Diese weisen darauf hin, dass sich das Katalysatorvolumen prinzipiell verringern lässt, was eine der Hauptbedingungen für den Einsatz bei Fahrzeugen ist.

Mit über Erwartungen hohen Reduktionsgraden konnte das gemeinsame NEFF-BEW-ETH-Projekt **Stickoxidmin-derung bei stationären Dieselmotoren** [14] abgeschlossen werden. Durch die Massnahmen Miller Prozess und Abgasrezirkulation sind an einem stationär betriebenen und mit einem neuen ABB-Turbolader ausgerüsteten Sulzer 9S20 Grossdieselmotor ohne Leistungsverlust NO_x-Reduktionen von 40% erreicht worden. Das entwickelte Konzept zur Hochdruckabgasrezirkulation mittels eines zweiten Turboladers wurde zusammen mit ABB patentiert. Durch den Einbau einer elektronischen Einspritzung wird eine zusätzliche NO_x-Reduktion von 10 - 20% im Abgas erwartet. Auf der Simulationsseite konnte wie geplant ein Modell entwickelt werden, das bei entsprechender Anpassung der wichtigsten Parameter auch für andere, ähnliche Motoren eine Voraussage über das Emissionsverhalten er-

möglichen [33]. Die vom Laboratorium für Technische Chemie entwickelten Misch-Aerogele zeigten im Teilprojekt Katalyse sehr gute Resultate und die entwickelten Mikrokinetik-Modelle bilden die Grundlage für weitergehende dynamische kinetische Betrachtungen an Honeycomb-Katalysatoren. Drei Dissertationen rundeten den erfolgreichen Abschluss dieses Projekts mit starkem Pilotcharakter ab.

Als recht komplex zeigt sich die Erforschung der Russpartikelentstehung während der Verbrennung. Im neu gestarteten Projekt **Ermittlung des geometrischen Aufbaus von Russ-Primärpartikeln und Validierung der Simulation des Russbildungsmechanismus** [4] wird einerseits eine früher entwickelte lasergestützte Streulicht-Messmethode zur Erfassung der Partikelgrössenverteilung [34] verbessert. Für die Auswertung von Streulichtsignalen an Russpartikeln ist die Kenntnis der geometrischen Partikelform und daher das Problem der Formerkennung sehr wichtig. Messresultate und numerische Modelle ermöglichen genauere Voraussagen über die Partikelhistorie. Die Messmethode und die Theorie sind soweit fortgeschritten, dass 1997 erste Resultate zu erwarten sind. Die Industrie wie auch die EMPA zeigen grosses Interesse an diesen Ergebnissen.

Mit dem Ziel, den zuständigen Fahrzeugzulassungsbehörden Entscheidungsgrundlagen für die Bewertung von Abgasemissionen von Erdgasfahrzeugen zur Verfügung zu stellen, wurde das Vorhaben **Wirkungsorientierte Bewertung von Automobilabgasen** [15] gestartet. Die EMPA setzt dabei ihre modernsten chemi-

schen Methoden zur Abgasanalytik ein. Vertreter aus der Automobil- und Gasindustrie sowie den schweizeri-

schen Zulassungs- und Umweltschutzbehörden werden als Experten beigezogen.

Nationale und internationale Aktivitäten und Zusammenarbeit

Infolge des Rücktritts des Direktors wurde das **Laboratorium für Energiesysteme (LES)** der ETHZ aufgelöst und das **Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTNT)** ins Leben gerufen. Die Aktivitäten der LES-Gruppe, die sich vor allem mit der numerischen Simulation von stationären Feuerungen befasst, werden weitergeführt. Somit ist die Kontinuität dieser Forschungsrichtung für die nächsten Jahre gesichert.

Bis Ende 1996 unterstützte der NEFF den Forschungsbereich "Feuerung&Verbrennung" mit namhaften Beiträgen. Die durch den Ausfall des NEFF entstehende Lücke wird zur Zeit von den neuen Fonds FOGA (Gaswirtschaft) und FEV (Erdölwirtschaft) nur in bescheidenem Masse ausgefüllt. Eine gemeinsame Förderungsstrategie ist nur ansatzweise vorhanden und sollte in den nächsten Jahren ausgebaut werden.

Folgende Ereignisse prägten 1996 den nationalen und internationalen Erfahrungsaustausch und dienten gleichzeitig als Kontaktbörse für Zusammenarbeitsprojekte zwischen Forschern von Hochschulen und der Privatwirtschaft:

- Am PSI in Villigen wurde am 27. Juni das vierte Jahrestreffen des **ERCOFTAC-Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffbildung** mit rund 50 Teilnehmern aus Industrie und Hochschule durchgeführt.
- Mit dem Ziel, einen internationalen Standard für numerische und experimentelle Datensätze auf dem Gebiet der turbulenten, nicht vorgemischten Flammen zu definieren, fand am 26. - 27. Juli 1996 der *Workshop on Measurement and Computation of Turbulent Nonpremixed Flames* in Neapel statt. Unsere im Projekt [12, 30] erarbeiteten Resultate wurden zusammen mit den ergänzenden Datenätze der Sandia Laboratories (USA) an der Konferenz in den Katalog der internationalen Standardflammen aufgenommen. Sie werden künftig weltweit zur Validierung neuer Verbrennungsmodelle zur Verfügung stehen und mithelfen, Doppelspurigkeiten in der internationalen Forschung zu vermeiden.
- Das alle zwei Jahre organisierte internationale Highlight der Verbrennungsforschung, das *26th Int. Combustion Symposium*, fand am 28. 7. - 2. 8. 1996 ebenfalls in Neapel statt. Einige unserer Projekte konnten als Vortrag resp. Poster den über Tausend Kongressteilnehmern vorgestellt werden.
- Das 18. *Task-Leaders Meeting* des *IEA-Implementing Agreements Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* [35] wurde am 6. - 9. August 1996 an der *Cranfield University* im üblichen Rahmen, jedoch mit minimaler britischer Industriebeteiligung, abgehalten.
- Auf starkes Echo stiess die vom LTNT der ETHZ initialisierte und organisierte *First European Conference on Small Burner Technology and Heating Equipment*, die am 25./26. September 1996 in Zürich abgehalten wurde [36]. Mit rund 220 Teilnehmern aus 15 Nationen entsprach sie offenbar einem echten Bedürfnis. Das angebotene breite Spektrum der über 70 Beiträge stiess nicht nur bei den Forschern, sondern auch bei den anwesenden Vertretern aller massgebenden europäischen Brennerfirmen auf grosse Beachtung und wird Folgekonferenzen auslösen.
- Mit der Gründung der **Schweizerischen Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV)** im Jahre 1995 wurde die bisherige Interessensgemeinschaft für Feuerungsforschung aufgelöst. Künftig wird die SVV auch die Interessen der gesamten Verbrennungsforschung abdecken. Dank guter Beziehungen des IVUK der ETHZ zur deutschen Vereinigung für Verbrennungsforschung (DVV) kam am 27. September 1996 in Zürich das 10.DVV/1.SVV Kolloquium *"Hochtemperatur-Brennstoffzellen und katalytische Verbrennung"* [37] zustande. Seitens der DVV wurde der Wunsch geäussert, die neu entstandenen Kontakte künftig zu vertiefen.

P & D-Projekte und Transfer in die Praxis

Die starke Grundlagenorientierung des Programms hatte zur Folge, dass in den ersten Jahren des Programms Projekte mit Industriebeteiligung eher die Ausnahme als die Regel waren. Dies hat sich nun dank dem akkumulierten Fachwissen, das die ETHZ und das PSI für die Privatwirtschaft interessant macht, geändert. In zunehmendem Masse werden Projekte mit Pilotcharakter ins Programm integriert. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass die Wünsche der Hochschul- und Industriepartner gut aufeinander abgestimmt sein müssen und mit klar strukturierten und koordinierten Teiletappen gearbeitet werden muss, damit solche Pro-

jekte zur beidseitigen Zufriedenheit abgeschlossen werden können.

Die numerische Simulation von Strömungs-, Einspritz- und Verbrennungsvorgängen im Brennraum zweier Dieselmotoren der Firma NEW SULZER DIESEL sind Gegenstand des Umsetzungsprojekts **Einsatz der rechnergestützten Simulation für die turbulente Verbrennung in der industriellen Produktentwicklung** [16]. Die Strömungsuntersuchungen beinhalten Kompressions- und Expansionszyklen ohne Brennstoffeinspritzung (geschleppter Betrieb) sowie mit Einspritzung, jedoch ohne Verbrennung. Der Einbau eines

weiterentwickelten Modells zur Beschreibung des Tropfen- und Strahlaufbruchs brachte entscheidende Fortschritte bei der Anwendung auf den NSD-S20-Dieselmotor. Derzeit wird mit sehr ermutigenden Ergebnissen mittels Parametervariationen versucht, den realen Brennverlauf nachzubilden.

Mit einer Dissertation [18] konnte das Projekt **Thermische Verwertung von Abfallschlamm in zirkulierender Wirbelschichtfeuerung (ZWS) unter Berücksichtigung des Einflusses der Aufgabe- und Bettkörnung** abgeschlossen werden. Da aufgrund der komplexen Gas/Feststofffluidodynamik und den damit eng gekoppelten Reaktionsabläufen die Auslegung von neuen Feuerungen sich hauptsächlich auf Erfahrungen mit bestehenden Anlagen stützt, ist eine geschlossene Modellierung noch nicht abschbar. Für noch nicht industriell eingesetzte Brennstoffe ist man deshalb zwingend auf experimentelle Untersuchungen an Versuchsanlagen von betriebsnaher Grössenordnung angewiesen. Zu diesem Zweck wurde beim Industriepartner VON ROLL UMWELTECHNIK eine halbindustrielle ZWS-Anlage mit verzögerungsfreier Feststoffrückführung aufgebaut. Mit 1,5 MW_{th} Leistung wurde damit, ohne Einsatz öffentlicher Mittel, eine der weltweit grössten Versuchsanlagen dieser Art realisiert. Es konnte u.a. gezeigt werden, dass für zwei Abfallschlamm als Brennstoff die gewünschten feinen Bettmaterialkörnungen erreicht und stationär gehalten werden konnten, ohne dass dazu eine zusätzliche Inertmaterialzufuhr oder eine Bett- oder Flugascherückführung notwendig ist. Um den Vergleich zwischen ZWS-Anlagen industrieller Grössenordnung und kaltbetriebener Anlagen zu ermöglichen, wurde im Vorhaben **Messung von Scale-up Parametern energieeffi-**

zienter und umweltfreundlicher zirkulierender Wirbelschichtanlagen [19] zusammen mit zwei französischen Industriepartnern eine optische Sonde weiterentwickelt. Erste Geschwindigkeitsmessungen wurden an einer heiss betriebenen Feuerungsanlage durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem Forschungsprogramm "Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung" wird unter dem Kurztitel **Swiss-Motor** [17] mit zwei Hochschulen und zwei Industriepartnern ein emissionsarmer Gasmotor entwickelt. Die ETHL arbeitet am Magermotorkonzept, an der ETHZ werden umfangreiche Simulationsrechnungen und Auslegearbeiten für massive Abgasrückführungen durchgeführt und anschliessend die Versuche auf dem Prüfstand der EMPA vorgenommen. Die Verbesserung des an einem LIEBHERR-Motor realisierten Magermotorkonzepts, das gegenüber dem Stand der Technik deutlich reduzierte NO_x-Emissionen beinhaltet, verspricht bereits kurzfristige Chancen auf dem europäischen Markt.

Das Erfahrungspotential der ETHZ und der EMPA in Sachen numerische Simulation kommen im Industrie-projekt **Grundlagen der Skalierung von Gas-Brennwert-Units im Leistungsbereich um 1MW** [20] zum tragen. Das Ziel ist, Kompletteräte mit leistungsmoduliertem Brenner und abgestimmter Brennkammer inklusive Regelung auf den Markt zu bringen. Das Schadstoffreduktionspotential moderner Verbrennungssysteme liegt in der Reduktion der Anzahl der Ein- und Ausschaltvorgänge. Für die Umsetzung in industrielle Produkte werden diese Zusammenhänge in der Ende 1996 gestarteten 2. Projektphase an einer Pilotanlage beim industriellen Partner mit einem speziell dafür konzipierten Prüfstand quantifiziert.

Bewertung 1996 und Ausblick 1997

Dass unsere Beiträge an internationalen Konferenzen auf ein verstärktes Interesse stossen und die Bereitschaft für gemeinsame Projekte zunimmt ist erfreulich. Nicht zuletzt ist dies dem vorhandenen guten Forschungspotential und der Kontinuität in der Forschung zuzuschreiben. Diese Fakten widerspiegeln sich auch in den recht vielen Dissertationen, die im Berichtsjahr abgeschlossen werden konnten.

In Übereinstimmung mit den Programmzielsetzungen 1996-1999 waren die Aktivitäten 1996 der verstärkten Umsetzung der Forschungsergebnisse gewidmet. Neue Industriepartner konnten vor allem im motorischen Bereich (LIEBHERR-Motoren) mit den Projekten **Swiss-Motor** [17], **Swiss Common Rail** (Start Ende 1996) und YGNIS [20] gefunden und zur engen Zusammenarbeit mit der ETHZ und dem PSI vertraglich verpflichtet werden. Im Sinne der Verbesserung der Umsetzungschancen werden auch möglichst früh die Zulieferindustrien in die Motoren-Projekte einbezogen.

Nach Abschluss des interdisziplinären Industrie-Hochschulprojekts [14] kommen 1997 zwei Zusammenarbeitsprojekte ETHZ/PSI/ABB als Nachfolgeprojekte des 1995 abgebrochenen CVC-Vorhabens zur Ausführung.

Die langwierigen Vertragsverhandlungen konnten im Berichtsjahr abgeschlossen werden.

Künftig werden alle industrieorientierten Projekte mittels schriftlich fixierten, mindestens halbjährlichen Zielvorgaben und anschliessendes *Milestone-Control*ling abgewickelt. Bei Bedarf können so Projekte frühzeitig umorientiert oder rechtzeitig abgebrochen werden. Die praxisnahe Umsetzung der Forschungsergebnisse soll damit besser zum Tragen kommen.

Für 1997 kann mit den zur Verfügung stehenden Mitteln die Kontinuität der laufenden Forschungsarbeiten gewährleistet werden. Ein besonderes Augenmerk wird die neugegründete Schweizerische Vereinigung für Verbrennungsforschung (SVV) erhalten, deren Aktivitäten künftig die gesamte Verbrennungsforschung und deren Umsetzung abdecken soll. Ihre Struktur soll 1997 durch ein für Firmen attraktives SVV-Konzept gefestigt werden und sie soll mittelfristig zu einer Kontakt- und Ideenbörse für verbrennungsrelevante Fragen gestaltet werden. Die Werbung neuer Mitglieder wird für die SVV in naher Zukunft ein zentrales Anliegen sein.

Dem zur Zeit stattfindenden Strukturwandel in der Privatwirtschaft (Firmenübernahmen durch ausländische Grosskonkurrenten und Auslagerung der hiesigen Entwicklungslabors in den EU-Raum zwecks Nutzung von Synergien) soll im Programm durch die Aquisition neuer Industriepartner und Kollaborationen mit Part-

nern u. a. aus dem europäischen Umfeld (EU-Projekte) ein Gegengewicht gesetzt werden. Damit stehen die Chancen für die geplante verstärkte Integration der Forschung in die Privatwirtschaft durch gemeinsame Projekte – und mit ihr die **effizientere Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis** – weit besser.

Liste der Forschungsprojekte

- [1] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Turbulenzparameter von Strömungen*. (JB)
- [2] B. Steiner et al., LVV/ETH-Zürich: *Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung*. (JB)
- [3] K. Herrmann et al., LVV/ETH-Zürich: *Methoden der digitalen Bildverarbeitung zur Ermittlung eines 2D-Geschwindigkeitsfeldes*. (SB +JB-Zusatz)
- [4] B. Mandel et al., LVV/ETH-Zürich: *Ermittlung des geometrischen Aufbaus von Russ-Primärpartikeln und Validierung der Simulation des Russbildungsmechanismus*. (JB)
- [5] P. Benz et al., PSI-Villigen : *Experimentelle und numerische Untersuchung der Kopplung von heterogener und homogener Tieftemperaturverbrennung bei hohen Drücken und turbulenten Strömungsbedingungen*. (JB)
- [6] P. Obrecht et al., PSI-Villigen: *Anwendung laseroptischer Messmethoden in der Hochdruckverbrennung*. (JB)
- [7] T. Gerber et al., PSI-Villigen: *Messungen von relativen und absoluten Konzentrationen instabiler Moleküle in Flammen mit laserspektroskopischen Methoden*. (JB)
- [8] A. Tsannis et al., PSI-Villigen: *Temperatur- und Turbulenzstrukturerfassung in Flammen*. (JB)
- [9] M. Koebel, PSI-Villigen: *NO_x-Reduktion mit Harnstoff-SCR*. (JB)
- [10] P. Stuber et al., LTNT/ETH-Zürich: *Schnell-Messverfahren in Flammen*. (SB)
- [11] S. Martens et al., LTNT/ETH-Zürich: *Flammenstrahlung in Gasturbinen-Brennkammern*. (JB)
- [12] M. Schlatter et al., LTNT/ETH-Zürich: *Modellierung der NO-Bildung in Flammen*. (JB)
- [13] J. C. Ferreira und J. Gass, LTNT/ETH-Zürich: *Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern*. (JB)
- [14] Ph. R. Von Rohr et al., IVUK/LVV/ETH-Zürich: *Stickoxidminderung bei stationären Dieselmotoren*. (SB)
- [15] Ch. Bach, EMPA, Dübendorf: *Wirkungsorientierte Bewertung von Automobil-Abgasen*. (JB)

(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden (via ENET)
 (SB) Schlussbericht vorhanden (via ENET)

Liste der P+D - Projekte

- [16] K. Boulouchos et al., LVV/ETH-Zürich: *Einsatz der rechnergestützten Simulation für die turbulente Verbrennung in der industriellen Produktentwicklung (CRFD)*. (JB)
- [17] A. Zbiorczik et al., LVV/ETH-Zürich, R. Röthlisberger et. al., LENI/EPF-Lausanne: *Swiss-Motor, Demonstration eines besonders umweltfreundlichen Gasmotors für den stationären Einsatz*. (JB)
- [18] Ch. Steiner, IVUK/ETH-Zürich: *Thermische Verwertung von Abfallschlämmen in zirkulierender Wirbelschichtfeuerung unter Berücksichtigung des Einflusses der Aufgabe- und Bettkörnung*. (SB) und Dissertation ETH-Zürich No. 11888.
- [19] Y. Caloz und L. Reh, IVUK/ETH-Zürich: *Messung von Scale-up Parametern energieeffizienter und umweltfreundlicher zirkulierender Wirbelschichtanlagen*. (JB)
- [20] H. Dreher, IGNIS, Ruswil, J. Gass et. al. LTNT/ETH-Zürich: *Grundlagen der Skalierung von Gas-Brennwert-Units im Leistungsbereich um 1MW*. (JB)

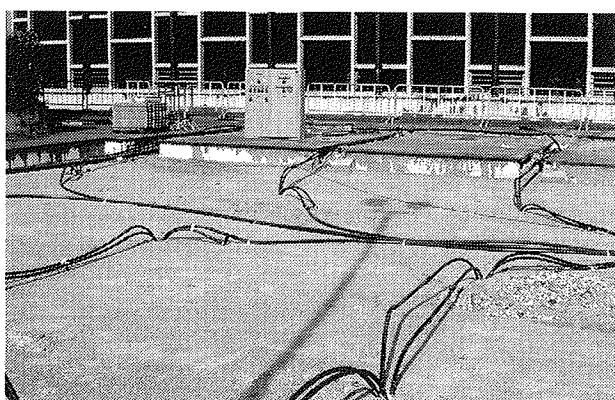
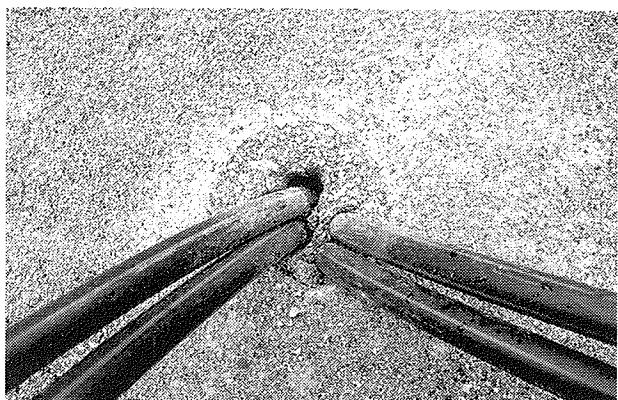
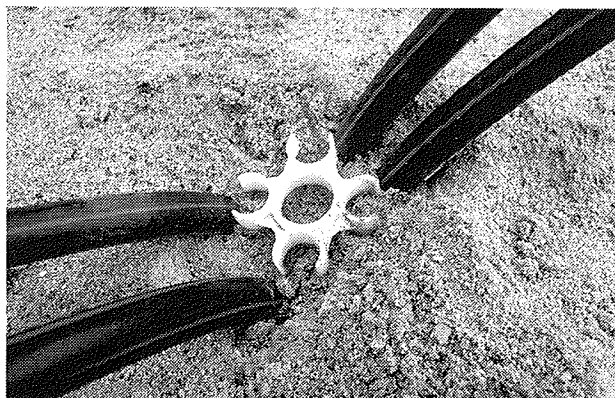
Referenzen

- [21] A. Hintermann: *Forschungsprogramm 1996-1999 "Feuerung&Verbrennung"* BEW, zu beziehen bei ENET.
- [22] G. Valantino et al.: *Appropriate Cut-Off Frequencies for Cycle Resolved Turbulence Parameters in Engines*, Proc. 26th Int. Symposium on Combustion, *Neapel*, (1996).
- [23] A. Schlegel et al.: *Catalytic Stabilization of Lean Premixed Combustion: Method for Improving NO_x Emissions*, Combustion and Flame 105, 332-340, (1996).
- [24] P. P. Radi et al.: *Stimulated Emission Pumping of OH and NH in Flames by Using Two-Colour Resonant Four Wave Mixing*, Chem. Phys. Letters, 265, 271-276, (1997).
- [25] W. Hubschmid et al.: *Sound-Velocity Measurements in Gases by Laser-Induced Electrostrictive Gratings*, Appl. Phys. B62, 103-107, (1996).
- [26] P. Stuber: *Bestimmung von Flammentemperaturen aus Infrarot-Strahlungsintensitäten von H₂O, CO₂ oder Russ*, Dissertation ETH-Zürich No. 11622, (1996).
- [27] B. Spiess et al. LTNT/ETH-Zürich: *Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck*, (NEFF-SB).
- [28] B. Ineichen et al. LVV/ETH-Zürich: *Gesetzmässigkeiten des wandnahen Wärmeübergangs in instationären Verbrennungssystemen*. (NEFF-SB)
- [29] M. Stöckli et al. LVV/ETH-Zürich: *Verfahren zur Einspritzoptimierung von Direct Injection Dieselmotoren*. (NEFF-SB).
- [30] M. Schlatter: *Modelling of Turbulence Chemistry Interaction with Respect to NO-Formation in Turbulent Non-Premixed Flames*, Dissertation ETH-Zürich No. 11979, (1996).
- [31] J. C. Ferreira: *Flamelet Modelling of Stabilization in Turbulent Non-Premixed Combustion*, Dissertation ETH-Zürich No. 11984, (1996).
- [32] M. Koebel et al.: *NO_x-Reduction in Diesel Exhaust Gas with Urea and Selective Catalytic Reduction*, Combust. Sci. and Tech. 121, (1996).
- [33] H. Stebler et al.: *Reduction of NO_x-Emissions of D.I. Diesel Engines by Application of the Miller-System: An Experimental and Numerical Investigation*, SAE 960844, *Detroit*, (1996).
- [34] B. Mandel: *Charakterisierung von Russteilchen mittels moderner laseroptischer Messverfahren*, Dissertation ETH-Zürich No.11705, (1996).
- [35] G. B. Drummond, Ed.: *XVIII Task-Leaders-Meeting*, Proc. IEA-Conf. *Cranfield*, September 1996.
- [36] J. Gass, Ed., Proc. *First European Conference on Small Burner Technology and Heating Equipment*, Zürich, (1996).
- [37] J. Gass, Ed., Proc. 10. DVV/1.SVV Kolloquium *Hochtemperatur-Brennstoffzellen und katalytische Verbrennung*, Zürich, (1996).

STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse
sur les activités 1996 du programme de recherche

Jean-Christophe Hadorn



Stock souterrain diffusif du Collège de Peseux à Neuchâtel

29'000 m³ de sous-sol sont sollicités par 30 sondes en forme de long double-U de 60 m de profondeur.
Le forage est rempli de sable de quartz relativement bon conducteur de chaleur (projet BMIC-Montezillon).

Introduction

Le programme de recherche en matière de stockage de chaleur faisait partie jusqu'en 1995 du programme "solaire thermique", mais est désormais autonome.

Bien entendu, le stockage joue un rôle absolument déterminant en Suisse pour l'énergie solaire au caractère intermittent. Nous savons l'alternance du jour et de la nuit, la suite de périodes ensoleillées et de périodes brumeuses, le retour après un hiver aux besoins en chauffage et faibles apports solaires directs, d'une saison estivale durant laquelle plus de 60% de l'énergie solaire annuelle nous touche. Ainsi, le stockage saisonnier de chaleur solaire revêt une importance particulière pour le développement à large échelle du solaire dans un pays comme la Suisse.

Mais le stockage de "chaleur" ou de "froid", si l'on place une limite artificielle à la température de 20 °C, celle qui nous est agréable, a d'autres applications que le solaire, par exemple, pour la régularisation d'une production de chaleur ou l'écêtement de pointes tarifaires. Il intéresse donc plusieurs domaines énergétiques.

Le stockage de chaleur à court terme, pour quelques heures ou quelques jours est relativement bien maîtrisé par la technique de la cuve à eau isolée. Des progrès sont cependant possibles dans trois axes:

- le renforcement et le maintien de la stratification, favorable au captage solaire du point de vue énergétique,
- la gestion du stock,
- la caractérisation des paramètres d'un stock.

Le stockage de chaleur à moyen et long terme nécessite des volumes importants pour ne pas devoir isoler artificiellement de manière très importante le milieu stockeur. Depuis 20 ans, le stockage saisonnier de chaleur en sous-sol fait l'objet de recherches. Le sol est en effet un milieu qui peut se prêter au stockage de chaleur en grands volumes. Les connaissances ont beaucoup avancées tant pour le stockage diffusif que pour le stockage en aquifère.

Le stockage diffusif à basse température (5 à 25 °C) dispose de réalisations pilotes en Suisse en cours de suivi. Les pompes à chaleur pour des installations de taille importante nécessitent souvent un stockage de chaleur de l'été à l'hiver pour obtenir une source froide de qualité. A plus haute température (30 à 60 °C), peu d'expériences ont encore été réalisées, malgré les espoirs qui découlent des simulations numériques. Le coût d'investissement d'une grande installation solaire est encore un facteur limitant.

Le stockage de chaleur de 25 à 60 °C en aquifère est plus délicat à maîtriser. La Suisse a été pionnière dans le domaine en 1975-1985, mais les projets d'envergure ont ensuite fait défaut pour développer une technique qui nécessite beaucoup d'expériences de terrain.

A plus haute température (plus de 100 °C), les applications de stockage de chaleur sont pour le moment à court terme (quelques heures) et limitées aux processus industriels. Elles sont satisfaites par des procédés traditionnels dans lesquels des améliorations sont possibles mais souvent peu rentables. Les centrales chaleur-force pourraient cependant à l'avenir nécessiter en été un stockage de chaleur de taille conséquente pour absorber la part produite en chaleur.

Le stockage latent a également fait l'objet de quelques recherches en Suisse. Le problème du prix des matériaux et de leur conditionnement reste le principal obstacle.

Le stockage de froid pour des procédés industriels ou l'écêtement de pointe tarifaire est actuellement résolu industriellement, mais pénètre peu en pratique.

Enfin, le stockage saisonnier de "froid" à 5 ou 10 °C, d'hiver en été, pour des besoins de climatisation ou simplement de refroidissement estival, est en plein essor dans les pays nordiques, par exemple en combinaison avec un groupe de froid utilisé en pompe à chaleur en hiver.

Principaux axes du programme

a) Stockage à court terme:

- améliorer la connaissance de la stratification thermique et de sa gestion optimale dans les cuves à eau de toute taille,
- évaluer l'intérêt de nouveaux dispositifs pour le recours à des matériaux à changement de phase.

b) Stockage à long terme:

- réduire le coût d'investissement des stocks souterrains diffusifs par la recherche de nouveaux types d'échangeurs de chaleur, par l'optimisation de l'échange fluide-sol et par l'optimisation de l'ensemble du système, en liaison avec le type de sous-sol rencontré.

- évaluer la faisabilité d'installations de stockage en aquifère de 1'000 à 10'000 m³, soit une taille réduite par rapport aux volumes visés initialement lors du développement de ce mode de stockage (plus de 50'000 m³). Ceci est motivé par le fait que dans un pays comme la Suisse sans forte implantation de réseau de chaleur à distance, la demande potentielle actuelle pour des stocks saisonniers de chaleur concerne surtout la gamme des constructions neuves de 50 à 500 équivalent-habitants. Deux problèmes se posent pour les aquifères de petite taille: les pertes thermiques sont importantes et le balayage par écoulement naturel peut détruire totalement le stock. Pour lutter contre ce dernier effet, deux procédés sont testés en Suisse: la stabilisation de

la nappe par pompage (cas de U-Sierre et de Saillon) et l'écran hydraulique réalisé par boues de lavage de carrière, qui constituent en outre des déchets à valoriser.

Dans le cadre du programme de recherche "Solaire actif • Chaleur", des systèmes réels comportant divers types de stocks de chaleur sont suivis. Les conclusions de ces travaux sont, en ce qui concerne le stockage de chaleur, également observées pour orienter le présent

programme. Dans l'ensemble, les technologies de stockage mises en oeuvre en Suisse sont développées en Suisse. Dans le domaine du stockage latent, des importations de matériaux ou de conditionnement (boules) sont cependant nécessaires.

De nouveaux axes de recherche concernant des matériaux tels la zéolithe sont dépendants d'applications pratiques et de budget à disposition.

Buts visés pour 1996

STOCKAGE LATENT

La mise au point finale d'un modèle simple et validé expérimentalement pour les effets thermiques de courants de convection dans un accumulateur à boule latente.

STOCKAGE EN CUVE À EAU

La caractérisation de la stratification et de la quantité d'énergie dans une cuve au moyen d'une sonde de températures unique (École Technique de Burgdorf).

L'analyse des résultats de deux ans de mesures sur une installation solaire familiale avec stockage saisonnier en cuve à plus de 100 °C et la meilleure stratégie de réglage.

STOCKAGE DIFFUSIF

La mise sur pied d'un projet regroupant plusieurs partenaires à l'École Technique de Winterthur.

STOCKAGE EN AQUIFÈRE

Rechercher la possibilité de conserver la chaleur d'été dans un aquifère de 4'000 m³ protégé par un mur de confinement hydraulique par simulation au moyen d'un nouveau modèle 3D.

La mise en route du programme de recherche, avec sa présentation critique à la CORE.

Travaux effectués et résultats obtenus

STOCKAGE LATENT

Afin d'étudier expérimentalement les effets thermiques de courants de convection autour de petites sphères contenant un matériau à changement de phase, un accumulateur expérimental a été réalisé à l'ETS d'Horw. D'un volume parallélépipédique de 150 litres, il comprend 241 boules de marque commerciale Cristopia STL 27 contenant un hexahydrate de calcium-chlorure stable, à température de changement de phase à 27 °C [3].

Un modèle de calcul simplifié, basé sur le seul nombre de Grashof, et adaptable à la simulation d'installation solaire car peu coûteux en temps calcul, a été développé par l'EMPA sur la base des résultats expérimentaux

obtenus pour divers débits de charge, hauteur d'empilement et température d'entrée de l'eau. Les deux cas de stratification stable et instable peuvent être traités par le modèle, avec la hauteur d'empilement pour longueur caractéristique. Il est supposé qu'une géométrie de stock cylindrique ne modifiera pas les conclusions.

Ce projet est financé en complément du projet NEFF 515 qui comprend la mise au point d'un module de simulation pour TRNSYS. Une optimisation d'installations solaires avec ce type de stockage peut désormais être étudiée avec un modèle pour ce type de stock latent.

STOCKAGE EN CUVE

La maison familiale Tagmann, à Niedergösgen, de 1'580 m³ SIA, et très fortement isolée, est équipée de 62 m² de capteurs solaires chargeant un stock hebdomadaire de 5 m³ lui-même connecté à un stock saisonnier de 38 m³ pouvant atteindre 120 °C. L'appoint est constitué par un poêle central à bois. L'installation a été instrumentée par le SPF Rapperswil durant deux cycles annuels et l'analyse détaillée a été faite en 1996 [2]. Le but du suivi était de déterminer la meilleure stratégie de réglage de l'installation à deux stocks pour capter le plus d'énergie solaire incidente, sans tenir compte dans un premier temps de la consommation électrique

des circulateurs auxiliaires. Cette stratégie a été déterminée progressivement, selon les expériences acquises, et se compose en fin de compte de 30 règles simples. Pour une demande annuelle de 12'770 kWh, la fraction solaire a atteint 83% durant l'année 94/95. Le stock saisonnier, entouré de 50 cm d'isolation, a atteint 116 °C à mi-août 94 sans problème particulier, pour redescendre à 40 °C à fin février 95. En hiver des conflits de stratégie sont apparus si l'on laisse l'utilisateur décider seul du moment de l'appoint au bois. Le rapport final donne de précieuses indications pour la conception d'installations solaires familiales avec stockage long

terme, un sujet d'actualité sur le marché du solaire thermique, pour lequel on essaie de réduire le plus possible le volume de stockage.

Un projet de réhabilitation thermique d'une maison familiale à Chambésy a été fait par son propriétaire depuis 1990. Le projet **RENOVA** a permis de doubler la surface habitable en réduisant de moitié la consommation totale, par isolation poussée et serre passive. La dernière phase du projet, à savoir le solaire actif avec stockage saisonnier a été réalisée en 1996 grâce à l'appui du Canton, de l'OFEN et de la commune. Le projet de recherche débuté en fin 1996 vise à mesurer l'installation qui comprend 30 m² de capteurs intégrés en toiture, 10 m³ de stock en cuve à eau et un dispositif d'injection de chaleur excédentaire d'été dans le sous-sol [5]. L'installation de mesure a été posée par le CUEPE, la mise en service partielle du solaire a eu lieu en fin 1996. La recherche devra préciser l'intérêt de l'utilisation du sous-sol situé sous la maison pour absorber les excédents estivaux et pour fournir éventuellement une contribution au chauffage de la villa.

A Neuchâtel, la cuve de stockage saisonnier de l'installation solaire du futur bâtiment de l'**Office fédéral de la Statistique** a été installée en 1995 et restera hors exploitation jusqu'à mi 97. En profitant de cette période, un procédé de mesure des pertes thermiques en régime permanent de la cuve de 2'500 m³ a été définie par SORANE [1]. La mesure du coefficient K global sera précieuse pour l'analyse complète ultérieure de l'installation solaire, dans la mesure où les exemples d'installations similaires mesurées en Europe (Ingelstadt, Växjö, Rotweil) ont toujours conduit à une incertitude sur les causes réelles des pertes thermiques du stock saisonnier.

STOCKAGE DIFFUSIF

Le nouveau bâtiment de **THALI**, à Hitzkirch est chauffé par une installation de pompe à chaleur utilisant un stockage souterrain de l'000 m de sondes coaxiales, rechargé par le dégagement de chaleur de la salle informatique en été. Des mesures de l'installation ont débuté en 1996 dans le but de trouver le fonctionnement optimal de l'installation. Les premiers résultats montrent un sous-dimensionnement des échangeurs de récupération de chaleur, la température de sortie des sondes ayant passé de 14.1 à 15.5 °C seulement après 3 mois de recharge. Le comportement décharge/charge sera analysé dans le détail durant le cycle 96/97 [4].

A l'École d'Ingénieurs de Winterthur (TWI), un projet de recherche sur la possibilité de réduire le coût du **stockage souterrain diffusif** avec ou sans pompe à

A la fin de la Tâche 15 du programme solaire de l'Agence Internationale de l'Energie en 1993, le bureau SORANE sa avait développé un logiciel de prédimensionnement d'installations solaires avec stockage saisonnier. Le logiciel dénommé anciennement "Tâche 15" a été adapté à Windows et sera disponible début 1997 sous le nom "**Solar option**" [1]. C'est un outil à usage de planificateurs, ingénieurs ou urbanistes permettant d'évaluer très rapidement et avec des paramètres simples une solution solaire avec stockage saisonnier pour un groupe d'immeubles ou un quartier nouveau ou à rénover. On peut en outre "ballader" l'installation à toute latitude européenne pour mesurer l'effet du climat sur le dimensionnement.

Mentionnons également dans le domaine du stockage en cuve, les travaux de recherche accomplis au département "Energietechnik" de l'École d'Ingénieurs de Burgdorf. Ce projet placé dans le programme solaire actif, a pour but de caractériser le contenu énergétique d'un stock stratifié avec une seule sonde de mesures capable de fournir une **température moyenne sur la verticale d'un stock**. Une première sonde de 4 points de mesures seulement, au lieu d'un continuum, suite à une erreur du fabricant a été testée mais n'a pu remplir totalement le rôle prévu. Une nouvelle sonde a été réalisée conformément au cahier des charges de l'Ecole et les essais ont été répétés. La sonde reproduit parfaitement la moyenne des températures d'un stock de 300 l chargé et déchargé de diverses manières. Il est dès lors possible d'envisager une gestion optimale d'un stock même stratifié en n'utilisant qu'une seule sonde ou de connaître précisément le contenu énergétique d'un stock [8].

chaleur a débuté en 1996 [6]. Deux pistes sont suivies: l'amélioration de l'échangeur (la sonde) et/ou de la méthode de mise en place (battage, forage, vibration,...) ainsi que l'optimisation de l'ensemble du système. Dans le domaine, des résultats théoriques récents, que nous avons suivis et orientés, obtenus par M. Pahud lors d'un travail de deux ans à Lund, sont en partie disponibles. Ils montrent que le coût de capteurs reste le principal obstacle dans le cas d'une solution solaire [9], [10]. Il a donc été demandé que les travaux du TWI se basent sur des cas concrets d'immeubles ou de quartiers neufs ou à rénover. On tient compte ainsi de contraintes et de conditions d'architecture et de sous-sol réalistes. Du fait du budget du programme, ce projet constituera l'axe principal du programme dans les deux ans à venir.

STOCKAGE EN AQUIFÈRE

Le Laboratoire de Géologie de l'EPFL (GEOLEP) a proposé de réaliser une **barrière hydraulique à l'écoulement naturel dans les aquifères de surface**, sous forme de paroi en boues de lavage de gravier. Après avoir montré en 1994 et 1995 que le matériau s'y prêtait et que la mise en oeuvre jusqu'à 10 m de profon-

deur était possible, un projet pour un héliport en Valais a été simulé à notre demande avant réalisation. Un modèle thermohydraulique 3D disponible au GEOLEP et prenant en compte les effets de la convection naturelle a été utilisé avec des conditions aux limites les plus réalistes possibles. Diverses configurations des ouvra-

ges de charge/décharge ont été étudiées par simulation, de même que l'effet d'isolation thermique artificielle renforcée en surface. Les résultats montrent que le stock projeté de 4'000 m³ n'est pas possible, la chaleur utile injectée en été par l'équivalent de 1'000 m² d'absorbeurs solaires étant totalement dissipée à fin octobre. Ceci est principalement dû à la convection naturelle dans le stock, entraînant un brassage préjudiciable à

l'exergie du stock [7]. Les sites à perméabilité verticale faible seraient ainsi plus favorables pour le stockage en aquifère, la barrière hydraulique jouant quant à elle parfaitement son rôle anti advectif horizontalement. La recherche des limites inférieures de taille du stockage en aquifère, que l'on sait possible en grand volume, est encore à faire, car le coût de réalisation de tel stock est attractif.

Coordination et collaboration nationale

La coordination avec d'autres programmes de recherche connexes tels que Géothermie et Chaleur de l'environnement est effectuée de manière fréquente pour rechercher les synergies entre moyens et travaux principalement dans le domaine des stocks diffusifs [14].

Nous avons en outre présenté dans divers séminaires les activités en matière de recherche et P&D en stockage souterrain [15].

La coordination entre les programmes "stockage de chaleur" et "solaire actif" est excellente.

La collaboration entre différents chercheurs en Suisse est favorisée le plus possible: un chercheur de l'EPFL participe à un projet du TWI, Winterthur pour ce qui est de l'optimisation de système avec stockage diffusif.

La collaboration avec une industrie est difficile: en matière de stockage latent, il n'y a plus à notre connaissance d'entreprises spécialisées sur le marché en Suisse. En matière de stockage en cuve à eau, nous recherchons une collaboration. En matière de stockage diffusif ou en aquifère, il n'y a pas d'industrie spécialisée, mais plutôt des savoir-faires d'entreprises, encore parcellaire et peu synthétique.

Coordination et collaboration internationale

Nous suivons les travaux internationaux (allemands, suédois, finlandais et hollandais, etc) en matière de stockage de chaleur par le biais des publications et de conférences (Séminaire Eurotherm no 49 "*Physical models for thermal energy stores*", mars 1996, Conférence internationale EUROSUN'96, octobre 1996) et faisons rapport à l'OFEN ou dans ENET News en tirant les tendances et implications pratiques [11, 12, 13].

Nous avons été sollicité comme membre du comité scientifique du prochain symposium Megastock '97.

Dans le cadre des projets européens *JOULE/THERMIE*, il n'y a pratiquement pas d'activités portant l'étiquette stockage pour le moment.

En ce qui concerne l'AIE, un programme créé en 1995 sous le titre UTES (*Underground Thermal Energy Storage*) regroupe plus de 10 pays depuis 1996 pour mettre en commun l'expérience en matière de stockage diffusif surtout et en aquifère. La Suisse n'a cependant pas souhaité participer.

Transferts à la pratique, Projets P&D

La recherche 1996 en matière de stockage a été très appliquée et a souvent eu pour objet l'amélioration ou la caractérisation de réalisations pratiques ou commerciales. La liaison avec la pratique est donc bonne.

Nous dirigeons aussi le programme P&D en matière de stockage de chaleur. Les synergies avec le programme de recherche sont ainsi facilitées.

Les projets P&D sont orientés principalement sur le stockage diffusif, avec pompe à chaleur et recharge estivale, pour des bâtiments d'une certaine taille (collège, université, industrie). Donc en bonne liaison avec le projet de recherche lancé en 1996 au Technikum Winterthur.

Compte tenu de la taille des objets qui nécessitent un cycle projet-décision-réalisation de plus de trois ans et de la difficulté observée de mise au point d'installations techniques qui paraissent pointues notamment pour ce qui est de la régulation, les résultats mesurés en P&D ne sont pas encore disponibles.

Le stockage en aquifère de Saillon (7'500 m³), projet solaire pilote, montre des résultats mitigés qui confirment la très grande difficulté du stockage en aquifère de petite taille et justifie le projet de recherche du GEOLEP visant à évaluer la faisabilité générale du concept.

Pour l'habitat individuel, trois projets pilotes sont suivis, l'un de stockage solaire en fûts de récupération de 200 l (Les Brenêts), les deux autres en cuve centrale avec injection des excédents de chaleur dans le sol environnant (Soleri) ou le sous-sol de la maison (Renova).

Nous aimerions cependant voir plus de projets de stockage de chaleur dans les processus industriels, permettant de déboucher sur de nouveaux produits ou concepts industrialisables, et pouvoir co-financer, avec l'industrie suisse des cuves de stockage qui pour le moment n'est pas demandeuse, des projets novateurs. La recherche de nouveaux matériaux stockeurs de chaleur pour les futurs véhicules solaires, ou pour le confort vestimentaire ou autres usages domestiques de ni-

che pour lancer une production nous semblerait également indiquée. Le budget du programme de recherche

est cependant limité à court terme et nous nous concentrons sur le bâtiment.

Evaluation 1996

Différents projets ont été terminés positivement. La définition de l'orientation 1996-1999 a été effectuée et

discutée avec la CORE en décembre 1996 [16]. L'impulsion initiale du programme a été donnée.

Perspectives 1997

Les travaux seront centrés sur la recherche de stocks diffusifs plus économiques à Winterthur et l'évaluation

du stockage en aquifère à l'EPFL via sans doute une thèse de doctorat en géologie appliquée.

Liste des projets de recherche

- [1] P. Jaboyedoff, SORANE, Lausanne: *Solare Wärmespeicherung / Stockage saisonnier (IEA CHSPSS Working group). ♦ Mesures des pertes de chaleur de la cuve de stockage de l'Office Fédéral de la Statistique à Neuchâtel.*
- [2] U. Frei, SPF/IT-Rapperswil: *Regelstrategie einer Saisonspeicheranlage. Messresultate und Erfahrungen aus dem Betrieb.* (RF)
- [3] P.W. Egolf, EMPA/KWH, Dübendorf, R. Furter, B. Frei, ZTL-Horw: *Konvektion im Wasserraum von Latentwärmespeichern mit kugelförmigen Elementen.* (RF)
- [4] P. Stähli, IEM, Konolfingen: *Dienstleistungsgebäude mit Niedrigenergiehausstandart. Gebäude der Firma THALI in Hitzkirch. Messkampagne der EWS Speicher Anlage.* (RA)
- [5] B. Lachal, CUEPE, Genève: *RENOVA: Installation solaire active avec injection de chaleur en sous-sol.* (RA)
- [6] H. Juzi, TWI, Winterthur: *Saisonale Speicherung von Sonnenenergie im Erdboden zur Wärmeversorgung von grösseren Überbauungen.* (RA)
- [7] A. Parriaux, GEOLEP/EPF-Lausanne: *Optimisation du stockage d'eau chaude en nappe perméable par confinement avec des boues de lavage de gravier. Phase II.* (RF)

(RA) Rapport annuel 1996 disponible

(RF) Rapport final disponible

Références

- [8] C. Hilgenberg, Ingenieurschule Burgdorf: *Mittlere Temperatur in Behältern;* (RF)
- [9] D. Pahud. *Simulation of Central Solar Heating Plants using a duct store: an application for Switzerland;* Department of Mathematical Physics, Lund University, Sweden, July 1996; under Swiss NF grant
- [10] B. MATTHEY, Montezillon: *Collège des Coteaux à Peseux. Dimensionnement du stock souterrain de chaleur par sondes verticales;* Note technique, Commune de Peseux, 7 février 1995
- [11] J.-C. Hadorn: Compte-rendu du séminaire *Physical models for thermal energy stores* – Eurotherm Seminar No 49, Eindhoven, March 25-27, 1996 – Lausanne, avril 1996
- [12] J.-C. Hadorn: Compte-rendu de la Conférence EUROSUN'96, Freiburg-in-Breisgau; ENET News Décembre 1996
- [13] J.-C. Hadorn: *Solar thermal energy research in Switzerland. A review of period 1985-1995. Paper to Eurosun'96 10 internationales Sonnenforum*
- [14] J.-C. Hadorn: *Proposition d'idées pour assurer la qualité des installations avec sondes* – Séminaire nationale du programme de recherche "Géothermie", 14 novembre 1996, EWI, Zürich
- [15] J.-C. Hadorn: *Utilisation thermique du sous-sol. Recherche et applications* – Séminaire organisé par l'OCEN Genève, "Utilisation de la chaleur du sous-sol et application pour le chauffage ou le rafraîchissement des locaux", 21 novembre 1996, Genève
- [16] J.-C. Hadorn: *Programmes de recherche "Solaire actif • Chaleur" et "Stockage de chaleur" 1996-1999, ENET*

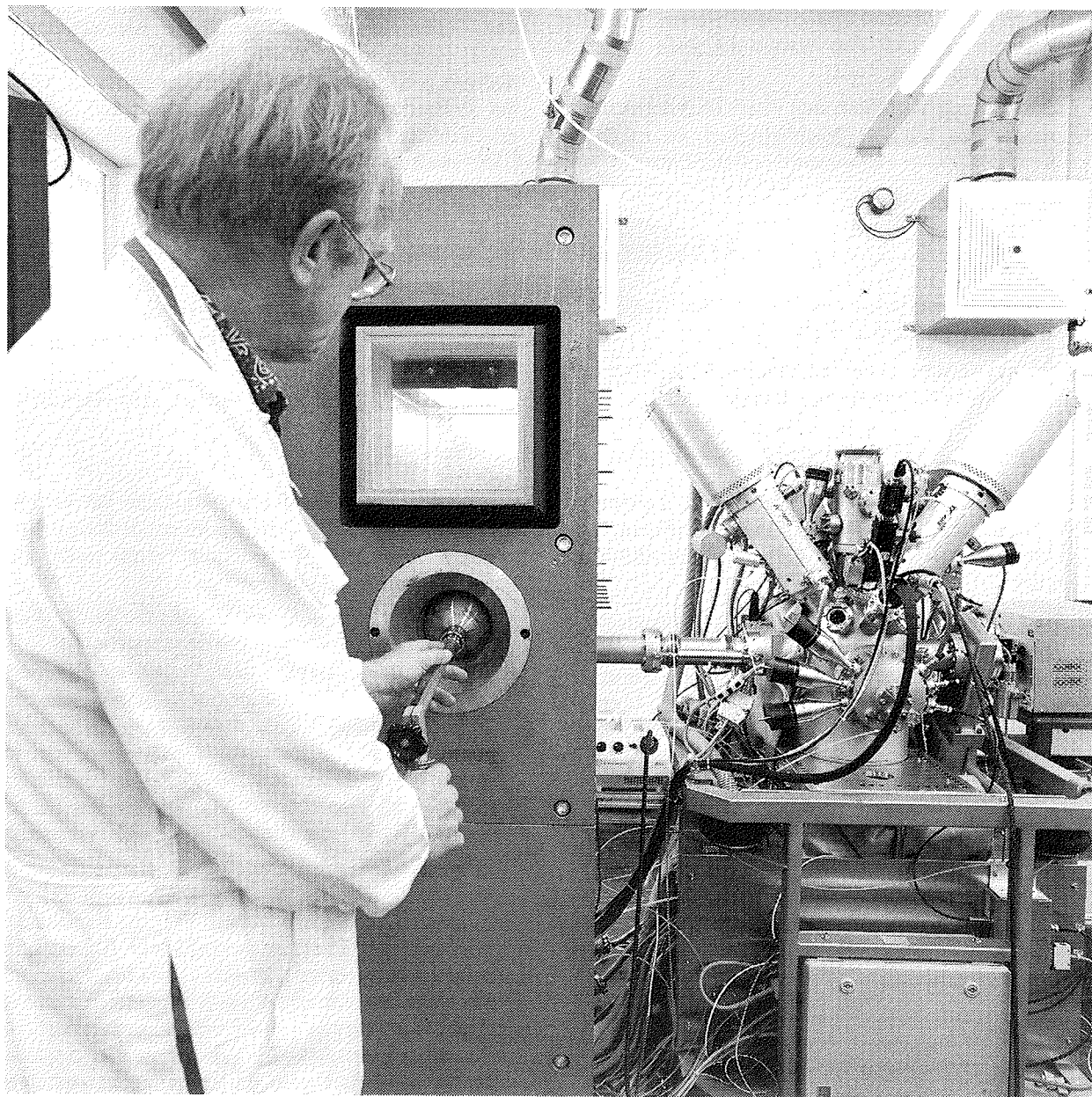
Liste des projets P&D

- [1] C. Kapp, NEK UMWELTTECHNIK, Zürich: *Erdwärmesondenfeld (Heizen- Kühlen- Speichern) für den Produktions-Neubau MEISTER + CO, Wollerau SZ.* (RA)
- [2] A. Hemmi, Unterseen, M. Blatter-Spaling, Münchenstein: *SOLERI: Erdspeicher für Wohnhaus Hemmi, Unterseen.* (RA)
- [3] J.-P. Rossy, ENERGIE SOLAIRE, Sierre: *Projet U-Sierre 350: suivi de l'installation durant 2 cycles.* (RF, avril 1996)
- [4] B. MATTHEY, Montezillon: *Installation solaire pour le collège des Coteaux à Peseux avec stockage saisonnier par sondes verticales et pompe à chaleur à gaz.* (RA)
- [5] H. SCHÄR, St Gallen: *Erdspeicheranlage für das Weiterbildungszentrum Hochschule St. Gallen.* (RA)
- [6] F. FLEURY, Epalinges: *Villa solaire avec stockage saisonnier en molasse.*
- [7] P. LÉCHAIRE, Les Brenêts: *Maison solaire avec stockage saisonnier central chauffé par capteurs à air.* (RA)
- [8] A. WERNER, Burgdorf & Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern: *Thermoprogramm Erdwärmesonden Burgdorf.* (RA + RF)
- [9] C. Kapp, NEK UMWELTTECHNIK, Buchrain: *EWS-Anlage Tschannland, Buchrain.* (RA)
- [10] CODHAVA, Chavornay: *Chauffage solaire avec stockage saisonnier en molasse.*
- [11] P. Stähli, IEM, Konolfingen: *Optimierung Gewerbehaus THALI.* (RA)
- [12] J. WILLERS, Rheinfelden: *Verwaltungsgebäude Buchenhof, Aarau. Messkampagne des saisonales Erdspeichers.* (RA)

KERNTECHNIK UND NUKLEARE SICHERHEIT

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Wolfgang Kröger



SIMS - Sekundärionen-Massenspektrometer des PSI

Das SIMS dient der oberflächenanalytischen Untersuchung von Materialproben. Es erlaubt, sehr präzise, hochauflösende Information über die isotopische Zusammensetzung der Materialoberfläche zu erhalten. Das PSI verfügt über eines der wenigen abgeschirmten SIMS in der Welt, das erlaubt – mit Fernbedienung – radioaktive Proben zu analysieren.

Programmziele

Forschung auf dem Gebiet sicherer Kerntechnik in der Schweiz dient heute primär

- der ständigen Angleichung der Kompetenz an den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik,
- der Ausbildung von fachlichem Nachwuchs durch attraktive Forschung in Kooperation 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 abzeichnender Anforderungen bis hin zur Nachhaltigkeit an zukünftige Kernanlagen, Brennstoffkonfigurationen und

-zyklen und der Evaluation diesbezüglicher technischer Lösungen.

Schwerpunktmässig findet diese Forschung im Bereich "Nukleare Energie, Sicherheit" (F4) des Paul Scherrer Instituts (PSI) statt. Die Beiträge der Hochschulen konzentrieren sich auf die Lehre; Diplomierende und Doktorierende führen allerdings ihre Forschungsarbeiten meist ebenfalls am PSI durch. Im Jahr 1996 wurden am PSI insgesamt ca. 190 Personen-Jahre (davon ca. 38 für Infrastruktur) und Sachmittel von ca. 5.1 Mio. Fr. in diese Forschung investiert. Etwa 45 % der Saläre und Sachmittel wurden durch die Elektrizitätswirtschaft (UAK) und NAGRA, die HSK sowie den ehemaligen NEFF finanziert. Die HSK steuerte ca. 11.5 % der Drittmittel bei; darauf geht der nachfolgende Jahresüberblick "Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK" nochmals gesondert ein.

Arbeiten und Ergebnisse 1996

Die Forschungsarbeiten am PSI, die hier kurz dargestellt werden, gliedern sich in

- Sicherheit und sicherheitsbezogene Betriebsprobleme schweizerischer Kernkraftwerke,

- Entsorgung radioaktiver Abfälle,
- sicherheitsbezogene technische Merkmale zukünftiger Reaktorkonzepte,
- ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen.

FORSCHUNG ZU SCHWEREN UNFÄLLEN

Auf dem Gebiet der vom Unterausschuss Kernenergie der Elektrizitätswirtschaft (UAK) mitfinanzierten quelltermbezogenen Studien liefen mehrere Aktivitäten parallel:

- Experimentelle Daten aus dem internationalen Projekt ACE wurden zur Validierung der Codes IMPAIR3 (Jodverhalten), WECHSL (Wechselwirkung Kern-Beton) und VANESA (Aerosolfreisetzung aus der Reaktion Beton-Corium) eingesetzt; die Validierung wurde abgeschlossen und die Resultate dokumentiert.
- Das Projekt **POSEIDON-Loop** [1] wurde Ende 1996 erfolgreich abgeschlossen. Die Messdaten zeigten wesentliche Modellierungsdefizite in den Codes zur Aerosolrückhaltung in Wasservorlagen. Die Untersuchung der Blasenhydrodynamik bei turbulenter Strömung in offenen Pools ist Thema einer nachfolgenden Doktorarbeit.
- Das experimentelle Programm AIDA (als Teil des **ALPHA**-Projektes s. unten) zur Auswirkung der Aerosolpartikel auf den Wärmetransport im Kondensator eines passiven Containment-Kühlsystems (SBWR als technische Referenz) während eines schweren Unfalls wurde budgetgerecht abgeschlossen. Die Tests zeigten, dass die Effizienz des Kondensators sehr stark von der Konzentration, Grösse und Zusammensetzung der Aerosolpartikel abhängt: Tests mit löslichen Aerosolen zeigten keine Ablagerung im Kondensator; Tests mit SnO₂-Partikeln, die unlösliche Aerosolpartikel simulierten, zeigten erhebliche Aerosolablagerung mit starkem Effizienzverlust

als Folge. Die von den internationalen Partnern und dem PSI durchgeführten Rechnungen haben die in den Experimenten festgestellten Trends bisher nicht reproduzieren können.

- Ein OECD-Workshop zur "Jodchemie in der Reaktorsicherheit" wurde am PSI organisiert, um Information auszutauschen, offene Fragen zu diskutieren und notwendige Entwicklungen zu besprechen. Etwa 70 Fachleute haben teilgenommen und 34 Arbeiten präsentiert. Schliesslich wurde empfohlen, das PSI in das bereits laufende EU-Projekt "Jodchemie" zu integrieren; entsprechende Verträge mit der EU und dem BBW wurden zwischenzeitlich unterschrieben.
- Einige für schwere Unfälle repräsentative Szenarien wurden für das KKW Gösgen analysiert [2]. Die hauptsächlich angegangenen Fragen betrafen ein Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) unter hohem oder niedrigem Primärkreislaufdruck, mögliche Accident Management Massnahmen, um ein Hochdruckversagen zu vermeiden, Verlauf des Containmentdruckes, das Verhalten von Spaltprodukten bzw. Aerosolen im Containment und deren Freisetzung bei dessen gezielten Druckentlastung. Ein Abschlussbericht ist in Vorbereitung.

Das Forschungsprojekt **CORVIS** [3] dient der Untersuchung eines potentiellen Versagens der unteren RDB-Kalotte unter Wirkung von geschmolzenem Corium während eines Kernschmelzunfalls. Bis Juni 1996 war CORVIS durch die HSK mitfinanziert; seit 1996 trägt das PSI zusammen mit 5 EU-Partnern mit CORVIS zu einem EU-Projekt bei. Es wurden drei Schmelzexper-

mente durchgeführt: Ein Test zur Beobachtung thermisch isolierender Oxydkrusten sowie je ein Test mit oxidischer Schmelze am Modell einer SWR-Entwässerungsleitung und an DWR-Instrumentierungsrohren. Folgende Schlüsse können gezogen werden:

- Ein Strahl metallischer Schmelze aus der Kernregion führt mit Sicherheit zum Bruch der Entwässerungsleitung innert weniger Sekunden nach Kontakt mit der Schmelze. Ein RDB-Versagen durch Erosion ist nicht auszuschliessen.
- Oxidische Schmelze in der unteren RDB-Kalotte gefährdet dagegen bei niedrigem Systemdruck die Integrität der Entwässerungsleitung wahrscheinlich nicht. Die Schmelze kann in die 40 mm breite Leitung mindestens so weit eindringen, wie kein Restwasser vorhanden ist. Sollte ein Leitungsbruch doch stattfinden, so würde ein wesentlicher Anteil der Kernschmelze mit eher hoher Freisetzungsrate austreten.
- Einmal gebildete oxidische Krusten verzögern durch thermische Isolation das Schmelzen metallischer Strukturen wesentlich.
- Nur eine kleine Menge oxidischer Schmelze kann in die engen Instrumentierungsrohre eines DWR eindringen; ein Rohrbruch wegen der Schmelzepenetration allein ist daher unwahrscheinlich.

KOMPONENTENSICHERHEIT

Das Berichtsjahr markiert den Anfang eines neuen Forschungsprogrammes, das primär der Unterstützung des sicheren Betriebes der schweizerischen KKW durch eine verbesserte Voraussage der Restlebensdauer von Komponenten bzw. die Identifizierung, Charakterisierung und Voraussage von Alterungs- und Schadensmechanismen, wie Spannungsrisskorrosion, Materialversprödung (unter Neutronenstrahlung) und duktiler Bruch, dient [4]:

- Im von der HSK mitfinanzierten Projekt **Spannungsrisskorrosion** [5] wird das umgebungsbedingte unterkritische Risswachstum in ferritischen Stählen untersucht. Derzeit finden Experimente in Reinstwasser (Leitfähigkeit 0.25-0.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$, O_2 -Gehalt 0.30-0.55 ppm) unter hohem Systemdruck (bis 9 Mpa) und bei 288°C statt. Die Messdaten sollen die Basis für eine rechnerische Lebensvorhersage unter betriebsnahen Bedingungen bilden.
- Im Rahmen der erwähnten Quelltermanalysen wurde untersucht, welche Faktoren den Aufheizvorgang des RDB nach dem Abstürzen des geschmolzenen Kernmaterials beeinflussen. Man hat Angaben über Absturzvorgang, Schmelzmengen und -bedingungen aus den thermohydraulischen Analysen benutzt und Kriechen bzw. thermoplastisches Materialverhalten berücksichtigt, um Aussagen über Versagenszeit und -art des RDB zu erarbeiten.
- Im Auftrag von BERNEX wurden die Untersuchungen zum Thema der thermisch bedingten Rissbildung in Rohrleitungen weitergeführt. Mit Hilfe von Thermographie-Temperaturmessungen konnten die Annahmen über die Wärmeübergänge verbessert

- Bei niedrigem Druck und stagnierender oxidischer Schmelze wird die RDB-Wand in der Nähe einer Durchführung nicht innert kurzer Zeit zerstört. Die Temperatur an der Aussenoberfläche des nichtisolierten Stahls stabilisiert sich bei ca. 1100°C. Ein Versagen in der Nähe des Entwässerungsleitungsstutzens ist dennoch möglich, wenn (entgegen experimentellen Beobachtungen) ein früher Bruch der Leitung selbst stattfände, denn in diesem Fall könnte der Schmelzfluss nicht gestoppt werden.
- Bei niedrigem Druck sind Durchführungen und die umliegende Fläche der RDB-Wand wahrscheinlich nicht die kritischsten Versagensbereiche. Verschiebungen sind nur bei langsamen Kriechraten möglich. Andere Vorgänge, z.B. ein globaler Bruch der unteren Halbkugel, könnten daher diesen Mechanismus überdecken.

Angesichts der angespannten finanziellen Lage hat das PSI beschlossen, das Projekt CORVIS zugunsten anderer grösserer Projekte nicht mehr zu unterstützen. Ein Vorschlag des PSI, CORVIS als fremdfinanziertes OECD-Projekt weiterzuführen, wurde von den Mitgliedstaaten nicht unterstützt. In der Folge wurden die experimentellen Aktivitäten per Ende 1996 eingestellt. Die rechnerische Auswertung der Experimente wird fortgesetzt.

und damit das Rechenprogramm verfeinert werden. Dies ergibt eine gute Basis für das Verständnis und die Beherrschung dieses Wärmebehandlungsprozesses.

- Für das KKW Leibstadt (KKL) wurden die zwei Umwälzpumpengehäuse bruchmechanisch untersucht. Dabei wurden die mit dem Finiten-Elemente-Code ADINA berechneten bruchmechanischen Werte eines rissbehafteten Vollmodells (3-D) mit bekannten analytischen Resultaten einer einfachen rissbehafteten Platte verglichen. Ferner wurde nach einer Betriebszeit von 10 Jahren im Rahmen des Surveillance Programmes das Verhalten von unbestrahltem und bestrahltem Material verglichen.

Die von den Kernkraftwerken und dem UAK mitfinanzierte Arbeit im Rahmen des Projektes **EDEN** [6] (Entwicklung, Demonstration und Evaluation von Nachbestrahlungsuntersuchungen) befasste sich mit folgenden Themen:

- Im Rahmen der NFIR-Gruppe (*Nuclear Fuel Industry Research*) hat das PSI an einem *Round-Robin-Test* zur Messung der Ausscheidungen in Zircaloy-4 teilgenommen, um die grössenbestimmenden Variablen zu untersuchen und die Messvorgänge zwecks Erhöhung der statistischen Ergebnisgenauigkeit zu optimieren. Resultate aus 14 Labors zeigten einen grossen Einfluss der Analysetechnik (SEM vs. TEM). Für TEM-Analysen war der Variationskoeffizient des Mittelwertes ca. 25 %; Resultate des PSI stimmen mit jenen der anderen Laboratorien gut überein. Ferner wurde eine TEM-Präparationstechnik für unbestrahlte Metall-Oxyd-Proben

entwickelt, womit man hochauflösende Bilder der Schnittstelle Metall-Oxyd aufnehmen und Details der kristallographischen Korrelation zwischen den zwei Phasen zeigen konnte.

Der Einfluss von Bestrahlung und Temperatur auf die intermetallische Ausscheidungen in Zircaloy wurde für drei Legierungstypen mit unterschiedlichen Ausscheidungsgrößen analysiert. Für alle drei hat die Bestrahlung (Fluenz $8 - 11.4 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$) die Form der Größenverteilungskurve nicht wesentlich beeinflusst. Die Abnahme der numerischen Dichte der Partikel (um ca. einen Faktor 8 bei ca. 650K bzw. um ca. 2.5 bei 600K) deutet jedoch in beiden Fällen auf eine Auflösung der Ausscheidungen hin. Die Verteilungsänderung unter Bestrahlung könnte mit einer konstanten Abnahme des Durchmessers der Ausscheidungen (unabhängig ihrer Grösse) erklärt werden. Um den Einfluss der Größenverteilung auf den Korrosionsvorgang in einer Zircaloy-Modellegierung zu untersuchen, wurde eine Doktorarbeit in Angriff genommen.

In der Phase III des NFIR-Projektes wird für Hochabbrand-Brennstäbe die Korrelation zwischen H_2 -Gehalt und mechanischem Verhalten unter Zug- und Berstbedingungen berechnet. In einer ersten

Testserie mit hydrierten unbestrahlten Proben wurde den Einfluss von Wasserstoffgehalt und Temperatur auf das Zugverhalten nachgewiesen. Während bei Raumtemperatur und ab einem gewissen H_2 -Gehalt die einheitliche Dehnung des Rohres scharf abfällt, stellt man bei 300°C und bis zum doppelten H_2 -Gehalt nur eine langsame Abnahme fest:

- Strahlungsinduzierte Änderungen in B_4C -basierenden Materialien mit unterschiedlichem Herstellungsprozess, Borgehalt und Hüllmaterial wurden hinsichtlich Gasfreisetzung, Schwellung und Li-Reaktion mit Feuchtigkeit untersucht. Cermets und stahlumhüllte Proben zeigten das beste Verhalten; bei Alumhüllten Proben fanden schwere metallurgische Reaktionen wegen des niedrigschmelzenden Eutektikums Al-Li statt.
- Um das Grundverständnis von strahlungsinduzierter Spannungsrisskorrosion (IASCC) zu verbessern, läuft eine Doktorarbeit über die Relation von strahlungsinduzierten mikrostrukturellen Schäden mit der Entwicklung von Deformationsstrukturen in rostfreiem Stahl. Daneben wurde ein HSK-finanziertes Projekt in Angriff genommen, um einen Überblick über Stand der Technik und spezifische schweizerische Bedürfnisse zu gewinnen.

COMPUTERUNTERSTÜTZTE TRANSIENTEN-ANALYSEN (STARS)

1996 war das letzte Jahr des von der HSK finanziell unterstützten Projektes **STARS-II** [7]. Ein Vorschlag für die dritte Phase wurde der HSK unterbreitet. Die Anpassung existierender Anlagenmodelle wurde fortgesetzt. Dabei hat man ein anlagenspezifisches RELAP-Inputdeck von KKG in ein Inputdeck für RETRAN-3D konvertiert. Die Überprüfung der von KKG unterbreiteten PSA-Studien wurde um die Frage erweitert, wie sich die Grösse des minimal zulässigen Bruches ändert, wenn nur ein beschädigtes Kern-Notkühlssystem und keine sekundärseitige Druckentlastung verfügbar sind. Man kam zum Schluss, dass sich diese Dimension nicht ändert; dennoch würde die angenommene Notkühlssystem-Beschädigung lokal zu Kernschäden führen, da für kurze Zeiten die Hüllrohr-Spitztemperatur 1400 K überschreitet. Es wurde ferner gezeigt, dass der Kern, trotz Annahme eines stark beschädigten Notkühlsystems nach einem "grossen Bruch" kühlbar bleibt; auch hier aber verlören einige Stäbe ihre Integrität.

Im Rahmen der sog. *On Call*-Analysen wurden drei Studien mit folgenden Ergebnissen durchgeführt:

- Die Analyse des Anlagenverhaltens während einer MSIV-ATWS für das KKL fokussierte auf dem Vergleich eindimensionaler und punktkinetischer Kerndarstellung. Sie zeigte, dass für diesen Typ von SWR-Transienten eine punktkinetische Analyse nicht konservativ ist.
- Eine kritische Überprüfung der Herstellercodes, die für die Sicherheitsanalyse des KKG verwendet wurden, mündete in eine Expertise über die Zulänglichkeit solcher Codes für Sicherheitsanalysen.

- Für die Analyse eines "kleinen Bruches" bei niedriger Leistung für das KKL wurde ein anlagenspezifisches Herstellermodell in den öffentlich erhältlichen Code TRAC-BF1 transferiert. Die Resultate der PSI-Simulation waren in der Regel vergleichbar mit jenen des Herstellers. Differenzen in der zeitlichen Entwicklung der Reaktorleistung werden den unterschiedlichen benutzten Codeversionen und der Kerndarstellung (3D-Kinetik beim Hersteller vs. 1D-Kinetik am PSI) sowie bekannten Defiziten von TRAC-BF1 zugeschrieben. Dennoch kann man aus beiden Analysen die gleichen Schlüsse hinsichtlich Akzeptabilität der Folgen der analysierten Szenarien ziehen.

Des weiteren hat man stärker forschungsorientierte Arbeiten durchgeführt:

- Der Beitrag thermischer Neutronen zur Brennstofftemperatur-Reaktivitätsrückkopplung wurde in Funktion des Abbrandes untersucht. Es zeigte sich, dass dessen Vernachlässigung (eine übliche Vereinfachung in vielen heutigen Kerndynamik-Codes) zu einer optimistischen Abschätzung dieses Effektes und damit sicherheitsrelevanter Brennstoffparameter (z.B. Temperatur, Spitzenenthalpie) führt.
- Die Anwendbarkeit der Chexal-Lellouche-Korrelation, die die Basis für die meisten in RETRAN-3D verfügbaren Voidmodellen bildet, wurde mittels experimenteller Messresultate aus verschiedenen Quellen, die in den Validierungsprozess von RETRAN-3D bisher nicht eingesetzt waren, überprüft. Die Studie zeigte, dass die Chexal-Lellouche-Korrelation im allgemeinen gute Voidvoraussagen liefert.

LWR - KONTAMINATIONS-KONTROLLE [8]

Im Rahmen des Projektes **LWR-Kontamination** erlaubt der erneuerte Vertrag mit der HSK die Forschung auf dem Gebiet des Aktivitätstransportes im Reaktorwasser von SWR fortzusetzen. Korrosionsstudien im Hochtemperaturloop zeigten, dass der Oxydaufbau auf rostfreien Stählen im Bereich zwischen 1 und 9 m/s stark von der Wassergeschwindigkeit abhängt. Die Arbeiten zur Voroxidation von rostfreien Stählen haben zum Ziel, die Aktivitätsaufnahme zu minimieren.

ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE [9]

Die Aktivitäten zur **Entsorgung radioaktiver Abfälle** werden in enger Zusammenarbeit mit der Nagra durchgeführt und durch sie finanziell unterstützt. Zur Dekkung von Bedürfnissen schweizerischer Endlagerprojekte entwickelt und testet man Modelle und gewinnt ausgewählte Daten zur Unterstützung deren Charakterisierung. Von höchster Priorität ist die Weiterentwicklung des Verständnisses von Mechanismen, die für Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und, zu einem kleineren Grad, für solche für hochaktive Abfälle relevant sind.

Es wurden drei Sorptionsdatenbasen mit sorgfältiger Beschreibung der entsprechenden Methodik entwickelt: (i) für Zement (Aufdatierung einer früheren Zusammenstellung), (ii) für ungestörten Mergel und (iii) für Mergel, den die aus dem Endlager ausströmende pH-Fahne verändert hat. Eigene experimentelle Untersuchungen haben wesentlich dazu beigetragen, insbesondere jene zur Auswirkung organischer Abbauprodukte. Na-Gluconat ist z.B. eine Modellschubstanz für organische Zementadditive. Man hat seinen Einfluss auf die Sorption von Cs, Sr, Ni, Am, Eu, und Th auf Kalzit, eine Mergelkomponente und wahrscheinliches Zementabbauprodukt, und auf CSH-Gel, eine der Hauptbestandteile von Zement, gemessen. Während die Präsenz von Gluconat die Sorption auf CSH-Gel wenig beeinflusst, ist das auf Kalzit der Fall und zwar elementabhängig. Experimente zur Sorption von Ni, Eu, Th auf Zement wurden auch mit einer Reihe anderer Zementzusatzstoffe durchgeführt. Für einige davon zeigen erste Resultate eine stark variiende Sorptionsreduktion. Weitere Sorptionsstudien zielen auf ein detaillierteres Verständnis von Mechanismen. Messungen für die Sorption von Ni auf unkonditioniertem Wyoming-Bentonit haben das in der Vergangenheit entwickelte mechanistische Modell (basierend auf Daten für konditionierten Morillonit) sehr gut bestätigt.

ALPHA-PROGRAMM [10]

Ziel des **ALPHA** Projektes ist die experimentelle und analytische Untersuchung der langfristigen passiven Nachwärmeabfuhr (NWA) aus dem Containment fortgeschrittener LWR der nächsten Generation.

Die Resultate der zehn Transiententests für das passive Containmentkühlssystem des SBWR in der PANDA-

Langzeitexperimente (bis zu 4000 Std.) zeigten, dass spezielle Voroxidationstechniken die Aktivitätsaufnahme sehr effizient verhindern können. Grundlegendere Studien zur Oxydschichtenstruktur erlauben eine Korrelation zwischen Oxydmorphologie und Aktivitätsdeposition. Man kann leicht in Oxydschichten, welche unter normalen SWR-Bedingungen gebildet wurden, Co-58 durch Co-59 und umgekehrt substituieren.

Löslichkeitsgrenzen für die Auflösung von abgebranntem Brennstoff und zementierten langlebigen mittelaktiven Abfällen wurden auf der Basis von chemischer Gleichgewichtsthermodynamik berechnet. Da für viele Elemente die Anwendbarkeit dieses Ansatzes zweifelhaft ist, hat man angefangen, Mitfällung empirisch zu modellieren. Eine starke Korrelation wurde zwischen den Verteilungskonstanten von Spurenelementen in Kalzit und der Löslichkeit ihrer Karbonatsalze gezeigt.

Auf der Seite der Transportmodellierung wurden die Experimente zur Nuklididiffusion durch Zementscheiben ausgewertet. Dabei konnten nicht alle experimentellen Datensätze konsistent beschrieben werden; neue experimentelle Information ist notwendig, um neue Modellkonzepte zu entwickeln. Der Code MCOTAC wird weiterentwickelt, um Porositätsänderungen, verursacht durch Mineralauflösung und -fällung, zu berücksichtigen. Auch wurden Quellterme hinzugefügt, um Komponenten zu beschreiben, die nicht aus chemischen Gleichgewichtsreaktionen entstanden sind. Seine Anwendung auf die Zementabbauxperimente ist im Gange. Der Code zum Massentransport in Spaltnetzwerken wurde intensiv getestet. Schliesslich wurde das Langzeit-Caesiummigrationsexperiment in Grimsel modelliert. Damit kommt ein mehrjähriges Projekt zur Migration verschiedener reaktiver Tracers im Kristallin zu einem sehr erfolgreichen Ende.

Die Untersuchung von Kolloiden im natürlichen Grundwasser in Wellenberg und im Opalinuston in Mt. Terri ging weiter. Erstere fokussiert auf die Untersuchung von An- und Losbindungsparametern von Kolloiden und die zweite auf das Zusammentragen erster Informationen über deren Konzentration und Charakterisierung. Kolloide könnten auch im hochporösen Verfüllmaterial des SMA-Endlagers entstehen. Erste Experimente belegen allerdings, dass die erwartete Konzentration und der Einfluss auf den Nuklidtransport niedrig sein sollten.

Anlage wurden im Rahmen eines QA-Programmes analysiert und dokumentiert; zudem hat das PSI ein Audit der amerikanischen Sicherheitsbehörde erfolgreich bestanden. Die Tests wiesen ein gutes Gesamtverhalten solcher neuartiger Systeme ("Robustheit") nach; sie konnten ihre Funktion unter allen untersuchten Bedingungen erfüllen. Ebenfalls abgeschlossen

wurden die Nachrechnungen mit dem Code TRACG und die QA-Arbeiten zur Codevalidierung.

Anfang 1996 trat ALPHA in seine zweite Phase. Diese besteht aus drei Teilprojekten, die im 4. EU-Rahmenprogramm integriert sind. Verschiedene passive Containmentkühlsysteme innovativer LWR-Konzepte werden in den als einzigartig erachteten Testanlagen PANDA und LINX experimentell untersucht:

- Im Projekt "*European BWR R&D Cluster for Innovative Passive Safety Systems*" führt das PSI stationäre und transiente Tests zur Untersuchung des Verhaltens passiver NWA-Systeme mit verschiedenen Kondensatortypen durch (PANDA).
- Im Projekt "*Technology Enhancement for Passive Safety Systems (TEPSS)*" beteiligt sich das PSI am

Studium von Mischungs- und Stratifizierungsphänomenen in grossen Wasservorlagen bzw. Druckabbaupools (LINX). Ein innovatives passives NWA-System wird in PANDA untersucht.

- Im Projekt "*Innovative Containment Cooling for Double Concrete Containment (INCON)*" baut und modelliert das PSI einen Gebäudekondensator im Rahmen des Machbarkeitsnachweises einer Alternative zum einfachen metallischen Containment für den Reaktor AP600.

Die Arbeiten zu diesen Projekten konzentrierten sich auf die erforderlichen Anlagenmodifikationen und die Definition der Testmatrizen; hinzu kamen aufwendige Berechnungen des Systemverhaltens (mit RELAP5) und spezieller Phänomene (mit GOTHIC und FLOW3D).

PROTEUS [11]

Die vierjährige Experimentierphase des Projektes **HTR-PROTEUS** (Kritikalität, Reaktionsraten und Reaktivitätseffekte bei unfallbedingtem Wassereinbruch in verschiedene Kernkonfigurationen mit LEU-HTR Brennstoff) wurde Mitte 1996 termingerecht abgeschlossen. Zuletzt wurde der Effekt von lokalem Wassereinbruch in den unteren Kernbereich sowie in höhermoderierte Kerne untersucht. Parallel wurden die Resultate des vom PSI definierten und von 8 internationalen Forschungsinstituten berechneten Benchmarks publiziert. Sie zeigten eine vernünftige Übereinstimmung bei den Vorausrechnungen der kritischen Beladung, aber grosse Diskrepanzen bei einigen Neutronbilanzkomponenten; dies lässt zum Teil Fehlerkompensation vermuten. Als Abschluss des koordinierten Forschungsprogrammes der IAEA wurden die Messergebnisse erstmals mit analytischen Resultaten der verschiedenen Partner verglichen. Man hat unerwartet hohe Diskrepanzen festgestellt, insbesondere für die kritischen Beladungen. Obwohl deren Ursache noch nicht voll bekannt ist, glaubt man, dass sie zumindest teilweise mit der approximativen Behandlung des Neutronenstreamings in deterministischen Neutronik-

Codes gekoppelt sind. Neuere Monte-Carlo-Studien zur Beleuchtung dieser Frage haben in der Tat gezeigt, dass solche Effekte grösser als zuerst erwartet sind und in der Grössenordnung der beobachteten Diskrepanzen liegen.

Die Nachfolge des HTR-PROTEUS-Projektes tritt ein industriegetragenes Forschungsprogramm an, mit dem Ziel, die Unsicherheiten von Kernbeladungsrechnungen mit modernem LWR-Brennstoff mittels Messungen an realen DWR-Brennelementen (welche anschliessend im Kernkraftwerk Leibstadt eingesetzt werden) zu reduzieren. Die erste Projektphase (die einen einjährigen Umbau und ein dreijähriges Experimentierprogramm umfasst) wird durch den UAK und EGL unterstützt; ABB Atom wird speziell vorbereitete Brennelemente und technische Unterstützung liefern. Die Verträge für den Reaktorumbau und die Experimentierphase sind in einem fortgeschrittenen Vorbereitungsstadium und sollten Anfang 1997 unterzeichnet werden. Der Brennstoff für die Messungen wurde bestellt, und die erste Kritikalität des LWR-PROTEUS ist noch für Ende 1997 geplant.

SICHERHEIT SCHNELLER REAKTOREN [12]

PSI-Untersuchungen zur Sicherheit schneller Reaktoren lieferten im Rahmen internationaler F&E-Aktivitäten Beiträge zu spezifischen reaktorphysikalischen und thermohydraulischen Fragen. In Absprache mit den bisherigen Auftraggebern BEW und UAK wurde beschlossen, das Projekt mit Ablauf der laufenden Verträge abzuschliessen und die fachliche Kompetenz durch die Beteiligung eines erfahrenen PSI-

Mitarbeiters in der französischen "*Groupe Permanent*" sicherzustellen. Das Jahr 1996 diente somit dem ordentlichen Abschluss noch laufender Arbeiten.

Die Teststrecke NAMIX für Experimente mit Natrium wurde fertiggestellt und in Betrieb genommen; es wurden einige Messungen im Rahmen einer laufenden Doktorarbeit durchgeführt.

FORTGESCHRITTENE BRENNSTOFFZYKLEN [13]

Reaktorphysikalische und materialtechnische F&E-Arbeiten im Rahmen des vom UAK unterstützten Projektes **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen** sprechen zwei breite Themen an: (a) erhöhte Plutoniumnutzung in LWRs, und (b) Plutoniumverbrennung und Transmutation höherer Actiniden in fortgeschrittenen Systemen.

Reaktorphysikalische Studien zielen im ersten Fall primär auf die Entwicklung eines uranfreien Pu-Brennstoffes für LWR. Man hat betriebliche und sicherheitsbezogene Merkmale von DWR-Kernen mit konventionellen Brennstoffladungen und solchen mit einem Pu-Er-Oxydbrennstoff in einer inerten Matrix verglichen, wobei neben Reaktor- auch Waffen-Pu be-

trachtet wurde. Die Resultate bestätigen zwar die in uranfreien Kernen erreichbaren, gegenüber 100 % MOX-Beladungen viel höheren Pu-Verbrauchsdaten, zeigen aber Bedarf für detaillierte Transientenanalysen, um die Sicherheit solcher Kerne verlässlicher beurteilen zu können. Parallel dazu wurden Arbeiten zur Daten- und Methodvalidierung lanciert. Diese umfassen die Teilnahme an zwei internationalen Benchmarks sowie eine Reihe von Reaktivitätsmessungen an der CROCUS-Anlage der EPFL, mit dem Ziel, Wirkungsquerschnittssätze für verschiedene abbrennbare Gifte zu validieren.

Auf der materialtechnischen Seite bestätigten Detailuntersuchungen an Hochabbrand-MOX das erwartete gute Verhalten von Brennstoff und Brennstoffstäben. Insbesondere hat man im beinahe unstrukturierten Brennstoff niedrige Hüllrohr-Korrosionsraten und Spaltgasfreisetzung festgestellt. Die genaue Bestimmung der Actiniden und ausgewählter Spaltprodukte sowie deren radiale Verteilung sind im Gange. Ähnliche Studien für zwei MOX-Brennstofftypen, die in einem SWR drei unterschiedliche Abbrandniveaus erfahren haben, wurden abgeschlossen und dokumentiert. Der Stand der Arbeit zu den inerten Matrizen zur Verbrennung von Pu in LWR wurde an einem PSI-Workshop mit Experten aus Europa, Japan und USA besprochen. Man hat Multikomponent-Keramiken (Zr-Y-Er-Oxyd, mit Ce als Ersatzmaterial für Pu) hergestellt und erste Messungen der Wärmeleitfähigkeit an einem präparierten Pellet vorgenommen. Die TEM-Untersuchungen im JAERI und ANL von strahlungsinduzierten mikrostrukturellen Änderungen in kleinen

Proben bestätigten die erwartete sehr gute Stabilität der zirkonbasierten Matrix.

Aktivitäten zu fortgeschrittenen Systemen, meist in Kollaboration mit dem CEA, bezogen sich auf Pu-verbrennende schnelle Reaktoren und beschleunigergetriebene (hybride) Konzepte zur Actinidentransmutation. Einerseits hat man deterministische und Monte-Carlo-Rechnungen für Referenzkonfigurationen stahlreflektierter schneller Kerne aus den CIRANO-Experimenten des CEA durchgeführt, um das Europäische Codesystem ECCO/ERANOS numerisch zu validieren. Zur Actinidentransmutation andererseits liefen die ATHENA-Experimente sowie Systemstudien zur Entwicklung geeigneter Beurteilungskriterien für Hybridsysteme. Letztere umfassten die detaillierte Untersuchung "superthermischer" und schneller Systeme mit Schmelzsalzen, wie von LANL bzw. JAERI vorgeschlagen.

Die Machbarkeit der MOX-Fabrikation bei hohem Pu-Gehalt mit einem vereinfachten Verfahren (reduzierte Anzahl der Prozessschritte) und das Bestrahlungsverhalten dieses Brennstofftyps in einem schnellen Neutronenspektrum sind Gegenstand vertraglich vereinbarter Untersuchungen des PSI für PNC. Diese Forschung ist Teil der langfristigen Japanischen Strategie zur Definition eines vereinfachten und kostengünstigeren Wiederaufarbeitungs- und -fabrikationsschemas für Brennstoff mit Actiniden (Pu, Np und eventuell Am). Die ersten Schritte am PSI zu dieser vielversprechenden Arbeit waren die Strukturierung der Experimente und des Arbeitsumfangs sowie die Reaktivierung von Geräten und Rechencodes.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN (GABE)

Für **GaBE** [14] leisten auch der Bereich "Allg. Energieforschung" des PSI (F5) sowie Gruppen der ETHZ Beiträge.

Mit der Methode der Lebenszyklusanalyse (LCA) wurden bei finanzieller Unterstützung des BEW neue, aufdatierte und erweiterte Ökoinventare für derzeit genutzte Energiesysteme erzeugt. Frühere Vergleiche stromerzeugender Systeme wurden erweitert und umfassen nun auch Windenergie. In Beantwortung einer Frage des BUWAL wurden Treibhausgas-Emissionen aus den vollständigen Energieketten von öl- und gasgefeuerten Heizungssystemen verglichen; dabei hat sich die Sensitivität gegenüber angenommenen Methanlecks als dominierend ergeben.

Basierend auf der bestehenden Datenbasis des PSI und, soweit erforderlich, auf Resultaten probabilistischer Sicherheitsanalysen wurden vergleichende Evaluationen des **Risikos schwerer Unfälle** durchgeführt. Der im Vergleich zu anderen verfügbaren Datenbasen

nachweislich höhere Deckungsgrad der PSI-Datenbasis ist für die Vollständigkeit dieser Analysen von grosser Bedeutung. Die Vergleiche beziehen sich primär auf die technischen Risiken jedes Energiesystems. Daneben wurden auch sozio-politische Aspekte, wie verzögerte Auswirkungen, das Potential für eine hohe Anzahl Betroffener, andere Kategorien von Unfallauswirkungen neben Todesfällen und die Bewertungsunsicherheiten beleuchtet. Die Arbeit wurde vom BEW unterstützt.

Schliesslich sei noch auf die im Auftrag des BEW entstandene Studie über "Fortgeschrittene nukleare Systeme im Vergleich" hingewiesen, die verschiedene Reaktor- und Brennstoffzyklenkonzepte der nächsten und übernächsten Generation, einschliesslich des "*Energy Amplifiers*" von C. Rubbia, unter Einbezug verschiedener Kriterien analysiert und schliesslich in einer Matrix zu bewerten versuchte.

Internationale Zusammenarbeit

- **CORVIS**: *Task-Force* mit 20 Institutionen aus 10 Ländern, 4. EU-Rahmenprogramm (→EU).
- **Aerosol-Rückhaltung, POSEIDON**: EPRI (USA), Framatome (F), AEA Technology (UK), GRS (D), EU.
- **Komponentensicherheit**: FZK (D), Siemens/KWU (D), IAEA, MPA Stuttgart (D), VTT (FIN), EU.
- **EDEN, Materialien des inneren Kernbereichs**: ABB (S), EPRI/NFIR (USA), COGEMA (F), CEA (F).
- **Entsorgung radioaktiver Abfälle**: FZK (D), CEA (F), PNC (JPN), EU.
- **PROTEUS-Experimente**: (a) HTR: IAEA-CRP; (b) LWR: ABB (S).
- **ALPHA**: GE (USA), Siemens /KWU (D), KEMA (NL), IEE (MEX), ENEL (I), EU.
- **Fortg. Brennstoffzyklen**: CEA (F), PNC (JPN), OECD-Halden (N), Brennstoffprogramme (FIGARO, ARIANE).
- **GaBE**: IAEA-Programm, OECD/NEA-Programm, COGEMA (F).

Perspektiven für 1997

Die dargestellten Forschungsprogramme sind mittel- und langfristig angelegt. Änderungen ergeben sich vorrangig aus der 1996 beschlossenen vermehrten Orientierung an realen Bedürfnissen der KKW-Betreiber, der NAGRA und der Sicherheitsbehörde, aber auch aus einem internen (Ideen-)Wettbewerb. Mit Ausnahme der CORVIS-Experimente und der Arbeiten zur Sicherheit schneller Reaktoren werden die oben dargelegten Aktivitäten 1997 fortgeführt. Erkennbar im Vordergrund stehen werden einerseits die Anstrengungen für die

LWR-PROTEUS-Experimente, andererseits für die Beteiligung der Schweiz an dem internationalen Forschungsprogramm Phébus PF zur Untersuchung schwerer Unfälle mit realistischen Kernschmelzexperimenten in Frankreich; das PSI wird *in-kind*-Beiträge auf den Gebieten der Materialanalyse (*Hotlabor*) und der Jodchemie bzw. Aerosolphysik leisten. Ferner wird sich der Forschungsbereich mit der Frage nachhaltiger Entwicklungen im Energiebereich als neu aufgegriffener Thematik auseinandersetzen.

Publikationen

Im Rahmen der beschriebenen Projekte wurden 1996 rund 100 Arbeiten in Fachzeitschriften und Tagungsbänden publiziert; hinzu kommen ca. 75 Arbeiten zu

Kolloquien und Seminaren. Diese sind im PSI Jahresbericht-Forschungsbereich F4 aufgeführt.

Liste der Projekte

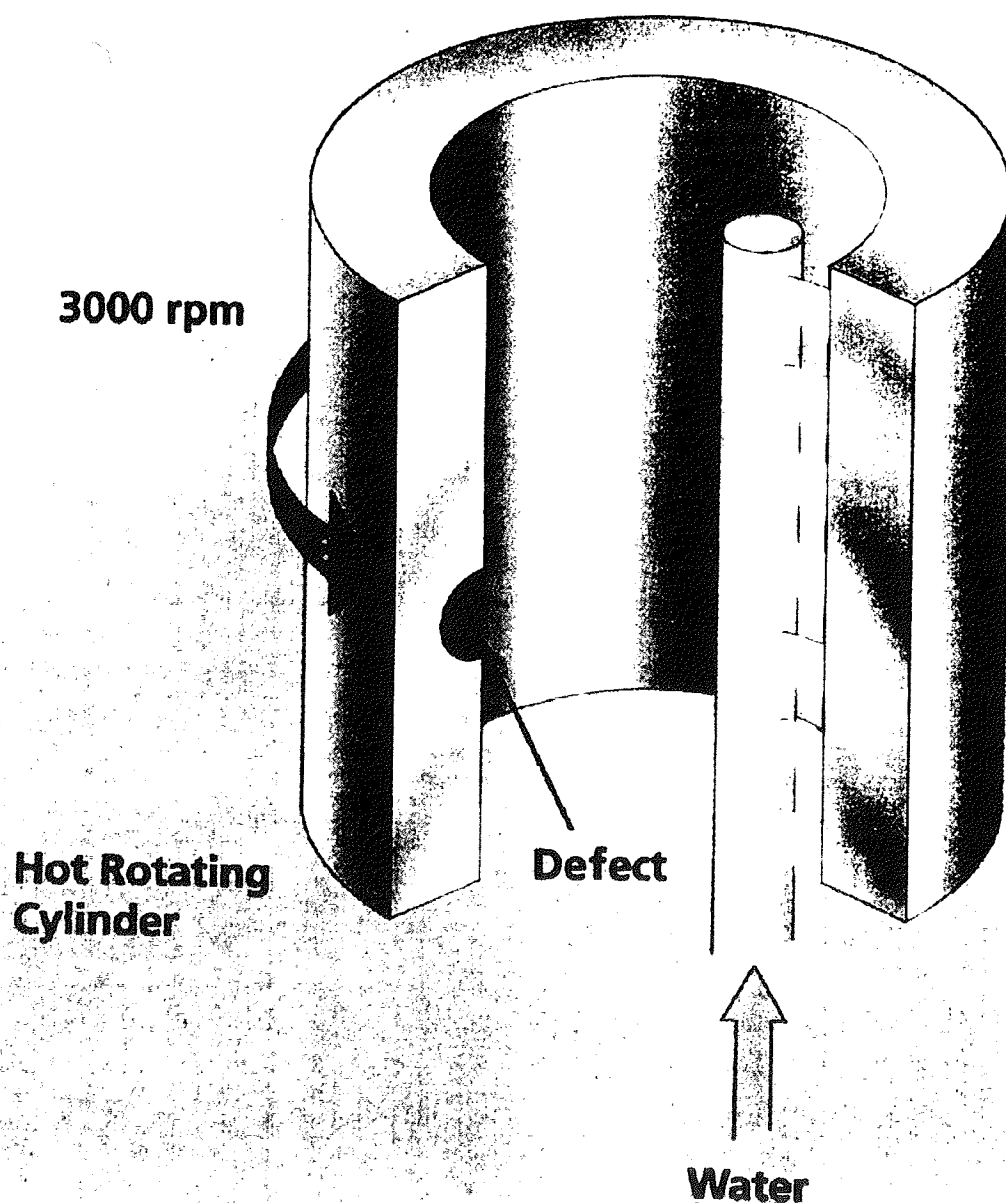
Alle nachfolgend aufgeführten Programm- und Projektleiter gehören zum PSI.

- [1] S. Güntay, **POSEIDON-II - Experiment**
- [2] P. Hosemann, **Quelltermanalysen**
- [3] H. Hirschmann, **CORVIS**
- [4] D. Kalkhof, **Komponentensicherheit, Bruchmechanik**
- [5] P. Seifert, **Spannungsriß-Korrosion - Loop**
- [6] G. Bart, **EDEN**
- [7] M. Zimmermann, **STARS**
- [8] E. Schenker, **Kontamination LWR**
- [9] J. Hadermann, **Programm Entsorgung radioaktiver Abfälle**
- [10] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard **ALPHA-II**
- [11] T. Williams, **PROTEUS - Experimente**
- [12] R. Brogli, **Sicherheit Schneller Reaktoren**
- [13] A. Stanculescu, G. Ledergerber, **Fortgeschrittene Brennstoffzyklen**
- [14] S. Hirschberg, **GaBE**

REGULATORISCHE SICHERHEITSFORSCHUNG DER HSK

Überblicksbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Sabyasachi Chakraborty



Wärmeschock-Prüfung

Das Verhalten von Rissen im Reaktor-Druckbehälter unter schockartiger Abkühlung wird im Rahmen des Forschungsprogrammes *Network for Evaluating Steel Components* untersucht.

Einleitung

Um den Auftrag der Aufsichtsbehörde HSK, die Sicherheit der schweizerischen Kernanlagen nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik auszurichten bzw. erfüllen zu können, unterstützt und fördert die HSK verschiedene Vorhaben auf wichtigen und

aktuellen Gebieten der regulatorischen Sicherheitsforschung.

Im folgenden werden die Vorhaben aus der Sicht des Programmleiters schwerpunktmässig kommentiert.

Forschungsvorhaben am PSI und an den Hochschulen

LWR-KONTAMINATIONSKONTROLLE [1]

Der Ende 1995 ausgelaufene Forschungsvertrag wurde mit modifizierten Forschungszielen Mitte 1996 erneuert. Gemäss den Zielsetzungen für das vergangene Forschungsjahr wurden gleichzeitig verschiedene Teilprojekte bearbeitet:

- Untersuchung der Korrosionsgeschwindigkeit, der Kinetik des Schichtaufbaus und der Struktur der Oxidschichten an Stahl 1.4571 (austenitischer Chromnickelstahl) unter Reaktorbedingungen im Heisswasserkreislauf. Es konnte gezeigt werden, dass die Oxidschichtdicke bei Geschwindigkeiten im laminaren Strömungsbereich dicker ist als bei turbulenter Strömung. Ebenfalls sind die Schichtdicken bei mechanisch polierten Oberflächen deutlich grösser als bei elektropolierten Oberflächen.
- Minderungen der Aktivitätsablagerung auf Stahl 1.4571 durch Voroxidation. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass die durch Voroxidation mit Wasserstoffperoxid gebildeten Oxidschichten die Aktivitätsablagerung unter Reaktorbedingungen nachhaltig behindern. Das Behandlungsverfahren mit Wasserstoffperoxid ist zum Patent angemeldet.

- Untersuchung der Aktivitätsablagerung unter kontrollierten Strömungsbedingungen im Couette-Autoklaven. Neue Versuche unter den besonderen Bedingungen des Experiments zeigen, dass der Kobalteinbau in die Oberflächenschichten während der Versuchsdauer irreversibel verläuft, jedoch inaktives Kobalt Co-59 mit aktivem Co-58 in Wechselwirkung mit der wässrigen Phase ausgetauscht werden kann.
- Mitarbeit in internationalen Forschungsprojekten: VGB Deutschland und WACOL-IAEA, insbesondere aber auch Kontakte mit JAERI Japan und VTT Finnland. Das internationale Interesse an den Forschungsarbeiten zeigt, dass die Projektziele einem aktuellen Bedürfnis entsprechen.

Die Erkenntnisse auf dem Gebiet der Ablagerung von aktivem Kobalt in Siedewasseranlagen sind für die Dosisbelastung des Personals während des Betriebs und der Wartung von grosser Bedeutung. Die neuen Erkenntnisse könnten zum Teil in den Anlagen direkt umgesetzt werden.

SPANNUNGSRISSEKORROSION VON STÄHLEN FÜR REAKTOR-KOMPONENTEN [2]

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel, das Langzeitverhalten von druckbelasteten Reaktorkomponenten bezüglich Spannungsrisskorrosion unter Reaktorbedingungen zu untersuchen. Das Projekt wurde im vergangenen Forschungsjahr reorganisiert und erweitert. Folgende Tätigkeiten standen im Vordergrund:

- Umrüst- und Verbesserungsmaßnahmen an den Heisswasserkreisläufen, der Probenherstellung und Einführung verfeinerter Messtechniken
- Durchführung einer internationalen Vergleichsstudie (*Round Robin Experimente*) neben dem Basis-messprogramm.
- Aufbau eines hinlänglichen Qualitätssicherungs-Programmes für das experimentelle Vorgehen und die Ergebnisauswertung.
- Modellierung des Spannungsrisswachstums unter Einbezug Finite-Elemente-Methoden

Die bisher durchgeführten Experimente erlauben eine konservative Einschätzung der Spannungsrisskorrosion unter Siedewasserbedingungen. Weitere Versuche und theoretische Abklärungen im Grenzbereich der Normalbetriebsbedingungen sind für eine Gesamtbewertung erforderlich, um eine Restlebensdauer von rissbehafteten Reaktorkomponenten abschätzen zu können. Die Modellierung der mechanischen Parameter in der Rissinitiierungsphase stellt dabei möglicherweise eine grundlegende Voraussetzung für das Verständnis und die Interpretierbarkeit experimentell ermittelter Rissgeschwindigkeiten dar.

Eine neues Verfahren zur Beschreibung resp. Benutzung von Reaktoreinbauten mit Edelmetallkomplexen zum wirksamen Schutz gegen Spannungsrisskorrosion befindet sich derzeit in den USA in der Versuchsphase. Erste Ergebnisse sind vielversprechend. Ein möglicher Einsatz des Verfahrens in Schweizer-KKW sollte geprüft werden.

IRRADIATION INDUCED STRESS CORROSION CRACKING [3]

In diesem Vorprojekt soll der aktuelle Kenntnis-Stand auf dem Gebiet der strahleninduzierten Spannungsrisskorrosion weltweit abgeklärt und offene Fragen im Hinblick auf die Bedürfnisse der schweizerischen Kernkraftwerke formuliert werden. Das Phänomen der strahleninduzierten Spannungsrisskorrosion im Reaktorkernbereich ist insbesondere beim KKW Mühleberg ein aktuelles Thema.

Im vergangenen Forschungsjahr wurde eine intensive Literaturstudie mit Bewertung innerhalb einer Exper-

tengruppe durchgeführt. Ein Fragenkatalog ist erarbeitet worden. Gleichzeitig sind auch Kontakte zu verschiedenen internationalen Forschungsprogrammen mit ähnlichen Zielsetzungen geknüpft worden.

Nach Abschluss des Vorprojektes soll geprüft werden, ob eine neue Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der strahleninduzierten Spannungsrisskorrosion aufgenommen werden soll.

SIMULATIONSMODELLE ZUR TRANSIENTENANALYSE IN DER SCHWEIZ (STARS II) [4]

Im Projekt STARS (Phase II) werden für alle schweizerischen Kernkraftwerke Eingabedatensätze für Simulationsmodelle bereitgestellt, um jederzeit anlagespezifische Störfallanalysen durchführen zu können.

Im Berichtsjahr sind für die Kernkraftwerke Gösgen, Leibstadt und Beznau die Modelle verbessert und verschiedene Analysen und Validierungen von Teilmodellen durchgeführt worden.

Hervorzuheben sind auch die zusätzlich ausgeführten *On-Call*-Analysen, die es der HSK erlauben, dringende sicherheitstechnische Abklärungen vorzunehmen. Folgende *On-Call*-Analysen sind abgeschlossen worden:

- Untersuchungen zum Anlageverhalten bei einem ATWS-Störfall im KKW Leibstadt

- Analysen zur Bestimmung der minimal notwendigen Not- und Nachkühlsysteme zur Beherrschung kleiner und mittlerer Kühlmittelstörfälle im KKG Gösgen. Diese Analysen sind für die zur Zeit laufende PSA-Überprüfung wichtig.

- Kritische Bewertung der Analysemethodik (Rechenprogramme) bei der Störfallanalyse des KKW-Gösgen im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfung

Die HSK braucht auf dem Gebiet der Störfallanalyse ein erfahrenes Team, das unabhängig von den KKW's aktuelle Probleme untersuchen kann.

EXPERIMENTE ZUM RDB-VERSAGENSMODUS BEIM KERNSCHMELZEN: CORVIS [5]

Das Projekt CORVIS untersucht das Durchschmelzen des Druckbehälters von Leichtwasserreaktoren während eines schweren Kernschmelzunfalles. Dazu wurden grosstechnische Experimente an Druckbehältermodellen mit einer Eisen- und Aluminiumoxid-Schmelze als Substitut für die Kernschmelze durchgeführt. Diese Experimente sollten vor allem zur Verbesserung und Validierung von Berechnungsmodellen dienen. Der Versuchsstand wurde in den ersten Monaten des vergangenen Forschungsjahres umgerüstet und danach wurden 3 Versuche vorgenommen:

- Versuch 1: Test für die Beheizung der Oxidschmelze
- Versuch 2: Wiederholung des Versuches mit einer Drainageleitung im Reaktorboden mit reiner Oxidschmelze anstatt metallischer Schmelze (analog Siedewasser-Reaktorgeometrie).

- Versuch 3: Versuch mit Instrumentierungsrohren im Reaktorboden mit reiner Oxidschmelze (analog Druckwasser-Reaktorgeometrie)

Die Versuche zeigten eindrücklich, dass der Versagensmechanismus bei metallischer und oxidischer Schmelze im Bereich des Reaktorbodens völlig unterschiedlich sein kann. Die Erkenntnisse aus den Versuchen wurden analytisch umgesetzt und dementsprechend das Finite-Elemente-Simulationsprogramm ADINA ertüchtigt.

Das Projekt wurde 1996 abgeschlossen. Die erzielten Erkenntnisse leisten für das bessere Verständnis zum Ablauf von schweren Kernschmelzunfällen einen hilfreichen Beitrag.

RADIOÖKOLOGIE [6]

Der Mitte Jahr abgelaufene Forschungsvertrag wurde um eine weitere Periode von 3 Jahren verlängert. In der vergangenen Berichtsperiode standen folgende Aktivitäten im Vordergrund.

- Die Arbeiten im Rahmen des EU-Projektes SEMINAT (Langzeit-Dynamik von Radionukliden in halbnatürlicher Umgebung) wurden mit Feldversuchen bei der Eidgen. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft gestartet. Gleichzeitig wird

in Form einer Dissertation die Wechselwirkung des Systems Bodenmineralien-Pflanze (Pilz) untersucht.

- In einer Arbeitsgruppe wurde die Anpassung der Datenbank des in der NAZ eingesetzten Berechnungsmodells CHECOSYS an andere, in der Schweiz verwendeten Daten in Angriff genommen.
- Die Messungen von Chernobyl-Bodenproben wurde vervollständigt und mit Vergleichsmessungen der russischen Projektpartner verglichen. Die Auswertung und Interpretation ist in Bearbeitung.

- Die bisher gewonnen Resultate aus Laborversuchen betreffend Blattaufnahme und Translokation von Radiocäsium im Winterweizen wurden an einer Tagung vorgestellt. Die Arbeiten konnten 1996 man-

gels eines geeigneten Praktikanten nicht fortgesetzt werden.

Für die HSK ist es wichtig, dass sie sich in der Schweiz auf eine Fachstelle auf dem wichtigen Gebiet der Radioökologie abstützen kann.

RADIOANALYTIK [7]

Im vergangenen Forschungsjahr konnten mehrere Vorhaben bearbeitet und zum Teil abgeschlossen werden. Die Tätigkeiten konzentrierten sich vorallem auf:

- Isotopen-Bestimmungen von Uran und Thorium im Fels und im Sedimentgestein
- Entwicklung einer Analysemethode zur Bestimmung von Plutonium und Americium in der Nahrung (und Kot)

- Weiterentwicklung von Separations- und Extraktionschromatographie-Verfahren für die Bestimmung von Plutonium und Americium

Die Bereitstellung von Radioanalysemethoden unter den spezifischen Anforderungen bei einem Störfall ist für die HSK wichtig. Dazu sind auch verfeinerte Messtechniken und neue Analytikmethoden erforderlich.

WINDBANK UNTERES AARETAL [8]

Das Projekt wurde vertragsgemäss Mitte des Berichtjahres abgeschlossen. In diesem Vorhaben wurden die lokalen Windverhältnisse im Raum der KKW's Leibstadt und Beznau sowie des PSI gemessen.

Alle vorliegenden Messdaten konnten eindeutig zu 13 charakteristischen Windlagen zusammengefasst werden, wofür 3-dimensionale Windfelder erstellt wurden.

Gekoppelt mit dem Ausbreitungsmodellcode ADPIC kann das Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Dosisbelastung durch atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe nach Freisetzungen aus obgenannten Kernanlagen im komplexen Gelände wesentlich verbessert werden.

ZUSAMMENARBEIT HSK-PSI IN DER DOSIMETRIE [9]

Die Personen-Dosimetrie durch äussere und innere Bestrahlung ist eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Durch die Verschärfung der Strahlenschutzverordnung im Hinblick auf Dosisgrenzwerte sind die Anforderungen an die Strahlenhygiene erhöht worden.

Im vergangenen Projektjahr sind mehrere Teilprojekte bearbeitet und teilweise auch abgeschlossen worden. Die Schwerpunkte konzentrierten sich auf folgende Tätigkeiten.

- Evaluation von Geräten zur Personenkontaminationsmessung nach Nuklearunfällen.
- Test elektronischer Dosimeter.

- Aufbau einer Kalibrieranlage für Tritium. Inbetriebnahme der fertiggestellten Anlage.
- Test und Inbetriebnahme eines neuen Neutronen-Personendosimetersystems auf Basis von CR-39 mit Auswertung auf Autoscan-60.
- Verwendung der Hochenergie-Neutronenfelder am PSI zu Kalibrierzwecken.
- Aufbau und Inbetriebnahme der in vivo-Messeinrichtung in GENORA.
- Kalibrierung von Triagemonitoren am PSI und in KKW's.

MOLEKULARBIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR ZELLULÄREN RADIOSENSITIVITÄT [10]

Werden sich vermehrende Zellen bestrahlt, so reagieren sie mit einer Verlängerung der Zeitspanne zwischen den Zellteilungsphasen. Damit wird Zeit gewonnen, um den Strahlenschaden zu reparieren. Gelingt die Reparatur nicht, so wird ein biologisch vorprogrammierter Mechanismus ausgelöst, der zum Zelltod führt. Sowohl die Reperatur des Schadens als auch der vorprogrammierte Zelltod sind Schutzmechanismen gegen entartetes Zellwachstum (Krebs). Zur Aufklärung der Reperaturmechanismen sowie des Mechanismus des vorprogrammierten Zelltodes wurde in den letzten Jahren intensiv geforscht, wobei die Frage noch weitgehend offen ist, wie sich die Zelle für den einen oder anderen Weg entscheidet. An der Aufklärung dieses Regelmechanismus wird auch am PSI gearbeitet.

Ein genereller Regelmechanismus der Zelle besteht in der Übertragung von Phosphatgruppen von aktivierten

Trägermolekülen auf kritische Enzyme. Dadurch werden spezifisch einzelne Enzyme aktiviert oder gehemmt. Am PSI sind deshalb einerseits spezifische Tests für die Phosphatübertragung entwickelt worden, andererseits wurde ein Test entwickelt, der anzeigt, dass strahlengeschädigte Zellen sich für den vorprogrammierten Zelltod entschieden haben. Auf diese Art wird versucht, Ursache und Wirkung zu korrelieren, und damit die Schlüsselenzyme der Phosphatübertragung zu identifizieren.

Dieses Grundlagen-Forschungsprojekt soll das Verständnis des Verhaltens biologischer Systeme unter Einwirkung radioaktiver Strahlung verbessern. Die Erkenntnisse haben ein grosses Applikationspotential auch ausserhalb der Strahlenhygiene und des Strahlenschutzes.

Die HSK sieht bei diesen Arbeiten ein grosses Potential, der Frage der biologischen Wirkung kleiner Dosen

nachzugehen und einen molekularbiologischer Beitrag zur Beantwortung geben zu können.

REVENT [11]

Bei einer kontrollierten Druckentlastung des Sicherheitsbehälters während eines schweren Kernschmelzunfalls stellt sich die Frage, inwieweit radioaktive Stoffe aus dem Sumpf in die Unfallatmosphäre freigesetzt werden und welcher Anteil davon in das Filtersystem gelangt und dort zurückgehalten wird. An einer Pilotanlage sind dazu realistische Versuche mit löslichen und unlöslichen Modellsubstanzen durchgeführt worden. Zugleich wurden Modelle entwickelt, die ein *scaling up* (Übertragung) auf KKW-Dimensionen ermöglichen.

Die geplanten Versuche sind abgeschlossen und die Ergebnisse werden in Form einer Dissertation ausgewertet und beschrieben. Sie werden dazu benützt, das Unfall-Management während schweren Kernschmelzunfällen bezüglich Ventingstrategien zu optimieren.

Der Versuchsstand im Pilotmassstab eignet sich für weitere Forschungsarbeiten im Bereich der Naturkonvektion der Unfallatmosphäre und des dynamischen Verhaltens des Sumpfes.

VERHALTEN VON RADIONUKLIDEN AUS KERNKRAFTWERKEN IN AARE UND RHEIN [12]

In einer ersten Phase konnte gezeigt werden, dass etwa 60% des vom KKW Mühleberg und 10% des vom KKW Beznau abgegebenen Co-60 in Aare und Rhein bis zur Schweizer Grenze zur Sedimentation gelangen.

Um diesen Transfer besser zu verstehen wurden in einer weiteren Forschungsphase folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Wasser- und Sedimentdynamik im Bielersee während eines Jahres
- Ermittlung von Transfer- und Depositionsfaktoren mit zusätzlichem Färbversuch und Modellrechnungen im Bielersee

- Stichproben-Kampagne unterhalb aller KKW's

Konkrete Ergebnisse werden erst 1998 vorliegen. Sie werden für die Optimierungen der Flusswasser-Überwachungsprogramme direkt umgesetzt. Zugleich dienen die Ergebnisse auch als Basis für radioökologische Betrachtungen. Neben der Vervollständigung und Vertiefung der bereits gewonnenen Erkenntnisse ist eine gemeinsame Feldaktion mit EdF unterhalb eines französischen Kernkraftwerkes geplant. Dies ermöglicht insbesondere den Vergleich der in den beiden Ländern angewandten Techniken und Erfahrungen.

DOSIS-WIRKUNGS-BEZIEHUNG BEI STRAHLENSCHÄDEN [13]

In diesem 1996 abgeschlossenen Forschungsprojekt standen vor allem die Frage nach der Wirkung von kleinen Strahlendosen im Vordergrund. Die heute vorherrschende lineare Extrapolation des Strahlenrisikos in den Bereich kleiner Dosen (Krebsrisiko) sollte mittels Literaturrecherchen und Tagungs-Auswertungen besser abgeklärt werden.

Dieses Thema wird nach wie vor sehr kontrovers behandelt. Einige namhafte Autoren stellen die lineare Extrapolation ernsthaft in Frage. Es wird die Meinung vertreten, dass das lineare Modell wissenschaftlich nicht gestützt werden kann und darauf basierende Risikoabschätzungen zu unglaublichen Werten führen. Betrachtet man die möglichen Auswirkungen von Katastrophen, z.B. diejenigen vom Reaktorunfall in

Tschernobyl, so können verschiedene Risikomodelle sehr grosse ökonomische und sozialpolitische Auswirkungen haben. Die HSK hat daher im Rahmen der Notfallschutzplanung ein grosses Interesse an der Klärung dieser Fragen.

Weitere Themen, denen im Rahmen des Vertrages nachgegangen wurde, waren die adaptive Antwort gegenüber Strahlung von Zellen und Organismen sowie die durch den Zerfall von Radon entstehende Strahlendosis und ihre Beeinflussung durch magnetische Felder.

Die Auseinandersetzung mit diesen Fragen fanden zum Teil im Rahmen der Expertengruppe Dosis-Wirkung der Eidg. Kommission für Strahlenschutz (EKS) statt.

UNTERSUCHUNG DER KREBSSTERBLICHKEIT IN DER UMGEBUNG DER SCHWEIZER KERNANLAGEN [14]

Es gibt ausländische Kernanlagen, in deren Nahumgebung vermehrt Leukämieerkrankungen bei jugendlichen Personen festgestellt worden sind. Es handelt sich dabei aber nicht um einen generellen Befund, sondern um sogenannte "Cluster", und die Frage nach ihrer Ursache ist noch nicht beantwortet.

Das Kantonal-Zürcherische Krebsregister untersucht im Auftrag der HSK die Krebssterblichkeit jugendlicher Personen im Nahbereich der Schweizer Kernanla-

gen. Diese Arbeit hat keine erhöhten Fallzahlen in den umgebenden Gemeinden aufgezeigt. Eine detaillierte Studie im unteren Aaretal mit seinen drei Kernanlagen ergab weniger Krebs- und Leukämietodesfälle bei jugendlichen Personen, als gemäss Schweizer Statistik zu erwarten wären. Analoge Studien sollen auch an den übrigen Standorten erfolgen

Zudem beteiligt sich die HSK auch an Untersuchungen, welche Auskunft über die Aussagekraft der gewählten

statistischen Analyse erlauben. Wichtig ist dabei, dass eine gute Methode entwickelt wird, die zur Erkennung von Häufungen von Sterbefällen auch bei kleinen Todesfallzahlen verwendet werden kann.

Die heute verfügbare Analysemethode soll durch eine weitgehende Systematisierung des "variablen Suchraums" nach Todesfällen ergänzt werden und so ein Werkzeug werden für ein landesweites *Screening* nach "Clustern".

FORSCHUNGSARBEITEN AUF DEM GEBIET DES SCHNELLEN BRUTREAKTORS [15]

Das Forschungsprojekt hatte die Zielsetzung, das Verständnis für die verschiedenen Sicherheitsprobleme des französischen Kernkraftwerkes Superphenix zu vertiefen. Die in der Schweiz ausgeführten Arbeiten wurden mit anderen europäischen Partnern abgestimmt und stützen sich auf die Einsicht in die französischen Sicherheitsbegutachtungen. Im vergangenen Forschungsjahr wurden folgende 2 Teilbereiche bearbeitet:

- Reaktorphysikalische Studien zu fortgeschrittenen Brennstoffzyklen und Validierungsrechnungen für das Code-System ECCO-ERANOS

- Experimentelle Untersuchungen von thermisch stratifizierten Mischschichten mit Wasser und flüssigem Natrium. Der geplante Natriumkreislauf konnte in Betrieb genommen und sein Verhalten getestet werden.

Im Rahmen der thermohydraulischen Arbeiten wurde auch eine Dissertation über numerische Simulationen von Mischschichten abgeschlossen.

Das Forschungsprojekt wurde Ende 1996 abgeschlossen. Die Sicherheitsaspekte beim Superphenix werden zukünftig in anderer Form weiterverfolgt.

Einzelprojekte bei in- und ausländischen Ingenieur-Unternehmungen

SEISMIC CAPACITY OF SHEAR WALLS IN NUCLEAR POWER PLANTS [16]

Die Schweiz beteiligt sich am OECD Forschungsprojekt zur Validierung der Berechnungen von Erdbeben- und Schubwänden in Kernkraftwerken. Die in Japan durchgeführten Schütteltischversuche an Modellwänden bieten dazu die Grunddaten.

Die im Berichtsjahr erfolgten Vergleichsrechnungen mit verschiedenen Verfahren zeigten, dass mit den

Bemessungsnormen und der bisherigen Praxis ein eher konservativer Tragwiderstand resultiert.

Mit verfeinerten Annahmen und einer dynamischen Berechnungsmethode ist eine zuverlässige und praxisnahe Berechnung möglich. Für Bemessungszwecke wären jedoch angemessene Sicherheitsfaktoren festzulegen.

SIMULATION UND ANALYSE EINES DRUCKBELASTETEN THERMOSCHOCKS: NESCI-PROJEKT [17]

Thermoschock-Transienten unter Druck beanspruchen den Reaktordruckbehälter in ausserordentlichem Masse. Dies betrifft vor allem auch Behälter, die über längere Zeit einer radioaktiven Bestrahlung ausgesetzt worden sind.

Das neu gegründete "*Network for Evaluation of Steel Components*" (NESC) hat ein internationales Projekt gestartet mit dem Ziel, druckbelastete Thermoschocks experimentell zu simulieren und rechnerisch zu analysieren. Die Schweiz liefert einen Beitrag zum Projekt

im Bereich der bruchmechanischen Berechnungs- und Analysemethoden mit dem Ziel, die Erkenntnisse in Empfehlungen für die Praxis umzusetzen.

Im vergangenen Forschungsjahr wurde die Methode für die bruchmechanische Berechnung erarbeitet und in einem Bericht festgelegt. Schwierigkeiten bei der Versuchsanordnung verzögerten die Experimente, sodass die weiteren Berechnungen erst Ende 1996 wieder aufgenommen werden konnten.

PISC III OECD-FORSCHUNGSPROGRAMM [18]

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war vor allem die Ermittlung des derzeitigen Standes der Prüftechnik bei der Ultraschallprüfung von Mischverbindungen und Schweissnähten in austenitischen Werkstoffen in Form eines internationalen Ringversuches.

Sulzer Innotec beteiligte sich an den Ringversuchen, die an Referenzwerkstücken ausgeführt wurden und konnte zeigen, dass die von ihr eingesetzte Messtechnik

dem heutigen Stand der Technik entspricht, insbesondere eignet sich ihr Verfahren für austenitischen Guss.

Die gewonnenen Erfahrungen werden im Bereich Wiederholungsprüfungen in Schweizer KKW's umgehend in die Praxis umgesetzt.

Das Projekt wurde Ende 1996 abgeschlossen, die Schlussberichte sind z.T. noch in Bearbeitung.

Beteiligung an internationalen Forschungsprojekten

OECD HALDEN REACTOR PROJECT [19]

Die Schweiz ist Mitglied des OECD Halden Projektes, wobei innerhalb der Schweiz eine Interessengruppe mit der HSK, dem PSI und den KKW-Betreibern gebildet wurde.

Das Halden Projekt ist in die 2 Fachbereiche: Brennstoff und Werkstoffe F+M sowie Mensch-Maschine-Wechselwirkung (MMI) gegliedert.

In der vergangenen Forschungsperiode 1994-1996 sind im Bereich F+M 24 Projekte und im Bereich MMI 21 Projekte bearbeitet und grösstenteils auch beendet worden. Die neuen Erkenntnisse werden von allen Mitgliedern der Schweizer Interessengruppe ausgewertet und umgesetzt.

Im Fachbereich F+M interessiert vor allem, mögliche Schadensmechanismen von nuklearen Brennstäben bei

hohem Abbrand aufzuklären um so die Einsatzdauer der Brennelemente zu verlängern.

Im Fachbereich MMI können die Ergebnisse als Grundlage für die Nachrüstung der Leittechnik (Prozessleit-Software, Kommandoraum-Installationen, Operator-Hilfsmittel) in bestehenden KKW's eingesetzt werden.

Es ist vorgesehen, dass sich die Schweiz auch in der neuen Forschungsperiode 1997-1999 am Halden Projekt beteiligt. Während der Konzeptphase für die neuen Projekte konnte die Schweizer Interessengruppe ihren Standpunkt einbringen und die Forschungsschwerpunkte mitgestalten.

MELT-STRUCTURE-WATER INTERACTIONS DURING SEVERE ACCIDENTS IN LWR'S [20]

Die Forschungstätigkeiten am *Royal Institute of Technology, Stockholm* werden in 3 Vorhaben aufgeteilt:

- Modellierung der thermischen Belastung des Reaktorbehälters während einer Kernschmelze
- Ausfluss einer Schmelze aus einer Öffnung und Ablation
- Wechselwirkung zwischen heisser Schmelze und Wasser

Die 3 Vorhaben werden sowohl mit numerischen Simulationen als auch mit Modellversuchen mit thermody-

namisch analogen Modellsubstanzen zu Stahl-Oxid-Schmelzen durchgeführt. In allen Bereichen wurden Ergebnisse publiziert und werden zur besseren Modellierung des Verlaufes von schweren Kernschmelzunfällen in andere Projekte und Berechnungsverfahren integriert.

Dieses internationale Forschungsprojekt ist teilweise eine Ergänzung des abgeschlossenen Projektes CORVIS und soll das Verständnis über den Versagensmodus beim Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters und die daraus entstehenden Folgen vertiefen.

INTERNATIONAL COOPERATIVE SEVERE ACCIDENT RESEARCH PROGRAM (CSARP) [21]

Die Schweiz leistet einen finanziellen Beitrag an das *International Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP)* der amerikanischen nuklearen Sicherheitsbehörde US-NRC. Ein wichtiger Teil dieses Forschungsprogrammes ist die Weiterentwicklung des Computercodes MELCOR, der den Ablauf von anlage-spezifischen schweren Unfällen simulieren kann. Dieser Code wird von der HSK zur Überprüfung der Risikostudien der schweizerischen Kernkraftwerke erfolgreich eingesetzt.

Das Pilotexperiment REVENT an der ETH Zürich wurde im CSARP als Schweizer Forschungsbeitrag

akzeptiert, wodurch der finanzielle Beitrag der Schweiz an das Forschungsprogramm reduziert werden konnte.

In allen massgebenden Bereichen der schweren Unfallforschung sind im vergangenen Forschungsjahr Arbeiten durchgeführt worden. Der aktuelle Stand dieser Tätigkeiten wurde an einem Meeting von dem verschiedene Forschungsgruppen vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse sind dem CSARP-Mitgliedern zur Verfügung gestellt worden und werden weiter ausgewertet.

Liste der Projekte

- [1] PSI-Villigen: *LWR-Kontaminationskontrolle* (JB)
- [2] PSI-Villigen: *Spannungsrissskorrosion von Stählen für Reaktor-komponenten* (JB)
- [3] PSI-Villigen: *Irradiation induced stress corrosion cracking* (JB)
- [4] PSI-Villigen: *Simulationsmodelle zur Transientenanalyse in der Schweiz (STARS II)* (JB)
- [5] PSI-Villigen: *Experimente zum RDB-Versagensmodus beim Kernschmelzen: CORVIS* (JB)
- [6] PSI-Villigen: *Radioökologie* (JB)
- [7] PSI-Villigen: *Radioanalytik* (JB)
- [8] PSI-Villigen: *Windbank unteres Aaretal* (JB)

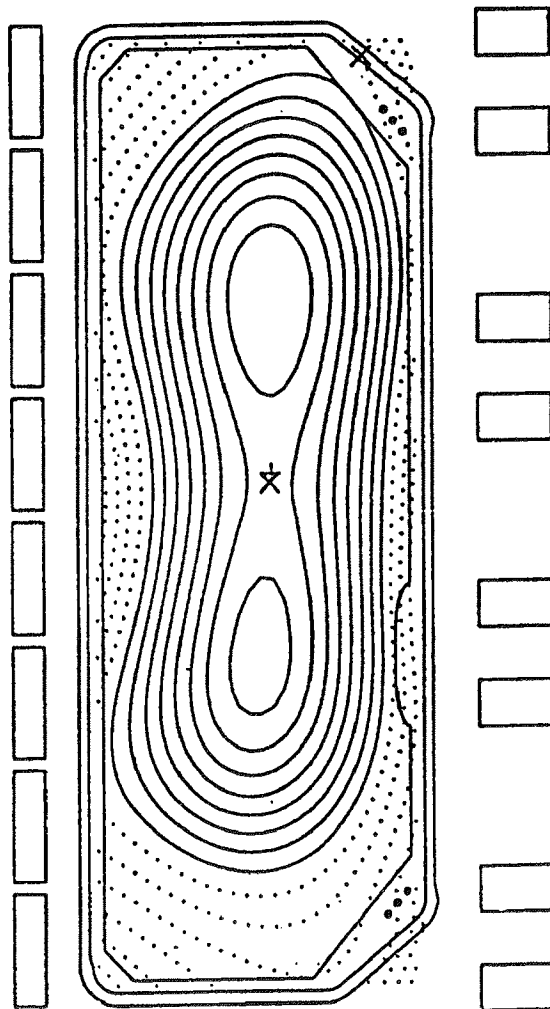
- [9] PSI-Villigen: *Zusammenarbeit HSK-PSI in der Dosimetrie* (JB)
- [10] PSI-Villigen: *Molekularbiologische Untersuchungen zur zellulären Radiosensitivität* (JB)
- [11] Inst. für Verfahrenstechnik, ETH-Zürich: *REVENT*
- [12] EAWAG-Dübendorf: *Verhalten von Radionukliden aus Kernkraftwerken in Aare und Rhein*
- [13] Inst. für Medizinische Radiobiologie, UNI-Zürich: *Dosis-Wirkungs-Beziehung bei Strahlenschäden*
- [14] Inst. für Sozial- und Präventionsmedizin, UNI-Zürich: *Untersuchung der Krebssterblichkeit in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen*
- [15] PSI-Villigen: *Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des schnellen Brutreaktors*
- [16] BASLER & HOFMANN, Zürich: *Seismic Capacity of Shear Walls in Nuclear Power Plants*
- [17] BASLER & HOFMANN, Zürich: *Simulation und Analyse eines druckbelasteten Thermoschocks: NESCI-Projekt*
- [18] SULZER-INNOTEC, Winterthur: *PISC III OECD-Forschungsprogramm*
- [19] INST. FÜR ENERGIE TECHNIK, Halden: *OECD Halden Reactor Project*
- [20] ROYAL INSTITUT OF TECHNOLOGY, Stockholm: *Melt-Structure-Water Interactions During Severe Accidents in LWR's*
- [21] US-NRC, Washington: *International Cooperative Severe Accident Research Program (CSARP)* (JB)

(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Rapport de synthèse
sur les activités 1996 du programme de recherche

Stéphane Berthet



Configuration à deux plasmas

Doublet formé par l'amalgame de plasmas avec deux axes magnétiques obtenues en 1996 sur le Tokamak TCV de l'EPFL.

Centre de gravité du programme Fusion

L'ensemble des activités suisses dans le domaine de la fusion (physique et technologie) sont coordonnées par le CRPP (Centre de Recherche en Physique des Plasmas) de l'EPFL et intégrées au programme européen via l'**Association Suisse-EURATOM**. Au sein du réseau d'Associations européennes, élément fondamental du programme Fusion, les travaux suisses concernent:

- l'exploitation du Tokamak à configuration variable, TCV. Cette installation expérimentale, la plus grande de l'EPFL, est unique au monde par ses possibilités de varier la forme des plasmas et par la puissance de son système de chauffage par micro-ondes;
- des travaux théoriques et de simulation numérique (équilibre et stabilité du confinement de certaines machines, méthodes de chauffage), cela grâce au centre de calcul parallèle de l'EPFL et du centre de calcul scientifique de Manno;
- la technologie de la fusion, dans le domaine des matériaux et des aimants supraconducteurs, activités

à l'Institut Paul Scherrer, mais sous la responsabilité du CRPP;

- les couches superficielles des parois internes des réacteurs à fusion, activité de l'Université de Bâle.

Une caractéristique majeure de la recherche dans le domaine de la fusion est le rôle joué par la **coopération internationale** au niveau notamment des ressources humaines et financières requises et de la variété des aspects à prendre en compte (environnement, économique, social, etc.).

En Europe, le programme Fusion (EURATOM) couvre toutes les activités de la fusion magnétique dans les Etats-membres (Suisse incluse). Il se présente comme une seule entité vis-à-vis des autres programmes Fusion dans le monde. Bien que les travaux dans le domaine de la fusion soient étroitement liés à la recherche fondamentale, ils sont, conformément à un usage international, assimilés néanmoins à la recherche énergétique.

Vue d'ensemble du programme FUSION au niveau international

La Corée du Sud va construire un tokamak supraconducteur avancé. Elle souhaite devenir un leader dans le domaine de la science et des technologies de la fusion et ainsi acquérir l'expertise industrielle et scientifique pour se joindre au projet ITER. En Inde, un tokamak supraconducteur de taille moyenne, est en phase de design et sera construit à Ahmedabad.

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), qui focalise dans ce domaine de la fusion les efforts de l'Europe, du Japon, des Etats-Unis et de la Russie, constitue une étape dans les activités à long terme engagées pour parvenir à la production commerciale d'énergie par fusion nucléaire. Sa construction devrait débuter fin 1998. Plusieurs nations étaient initialement dans la course pour l'obtention de la machine. Mais outre le prestige, le pays d'accueil devra aussi endosser une grande part du coût de construction estimé à 6.3 Mia. ECU sur dix ans. Dans cette phase les coûts du *High Tech Core* (HTC), les activités scientifiques et technologiques clés, sont estimés entre 40% et 70% du coût total. Ces coûts partagés équitablement entre les 4 partenaires impliqueraient pour le pays hôte une charge financière allant de 47.5% à 70%. La Russie, avec la réduction chronique de ses moyens financiers, et les USA, avec les diminutions drastiques de leur programme, ont déjà réduit leur participation à la phase de design et montré qu'ils ne comptaient pas jouer un rôle majeur dans la phase de construction et d'opération du réacteur test. En juillet 1996, l'annonce franco-allemande de retirer leur candidature comme pays hôte d'ITER a créé une surprise dans les milieux scientifiques de la Fusion et les administrateurs du projet. Les ministres allemand et français de la recherche ont toutefois souligné qu'ils maintenaient le rôle de leur pays dans la phase de *design* et poursuivaient leur programme national. En octobre 1996, le ministre itali-

en de l'éducation, des universités et de la recherche a confirmé l'intérêt de son pays d'être considéré comme un candidat potentiel pour le site de construction d'ITER. Considérant la très importante contribution de l'Europe au programme Fusion, il estime qu'il n'est pas souhaitable d'abandonner cet héritage européen et par conséquent de perdre la position de leader qu'occupe actuellement l'Europe dans ce domaine. Néanmoins, dans le processus du choix d'un site pour ITER, le Japon reste le candidat le plus sérieux. Avec trois sites potentiels, un appui industriel et gouvernemental fort le Japon est dans une position confortable. De source officielle, il serait même prêt à prendre en charge au moins 70% de la facture. Fin 1997, la situation devrait être claire et le site sera sans doute connu.

En Europe, à la mi-1996, la Commission Européenne a lancé une évaluation de son programme Fusion (gestion, étapes franchies, progrès et perspectives futures). Dans le rapport livré au Commissaire fin 1996, le *Fusion Evaluation Board* (FEB) reconnaît la fusion comme l'une des sources d'énergie potentielle pouvant satisfaire aux besoins toujours croissant de la population mondiale. Il souligne les progrès réalisés aussi bien dans la physique que dans la technologie (bobine supraconductrice, télémanipulation, matériaux, etc.) de la fusion depuis la précédente évaluation du programme en 1990, et cela tout spécialement en Europe. Il a aussi noté l'importance du réseau d'Association, source dynamique de savoir scientifique et technologique qui garantit la continuité et la cohérence du programme Fusion européen. Bien qu'impressionné par les progrès réalisés sur des installations expérimentales comme JET par exemple, le FEB reconnaît que les progrès futurs dépendent d'une nouvelle installation plus importante avec des performances comparables à celles escomptées dans un réacteur de fusion opérationnel.

Par conséquent, le FEB considère qu'ITER doit être construit et si possible en Europe, afin de maintenir la position de *leader* mondial qu'elle occupe actuellement. Si cela ne devait pas être possible pour des raisons financières, le FEB recommande de maintenir une forte participation à ce projet. En matière de sécurité, le FEB a aussi approuvé les conclusions du rapport "*Safety and Environment Assessment of Fusion Power (SEAFP)*" de la Commission Européenne qui confirme le caractère attractif de l'aspect environnement et sécurité de la fusion. Le FEB recommande également d'apporter un effort tout particulier à l'aspect socio-économique de la fusion.

Ce sont donc des conclusions très encourageantes et positives qui donnent un appui total au programme Fusion et à sa planification à long terme. D'autre part, ces conclusions seront prises en considération par la Commission dans la préparation du 5ème Programme Cadre.

À JET (*Joint European Torus*), l'événement principal de 1996, fut la décision par le Conseil des Ministres européens d'étendre l'exploitation de JET jusqu'en 1999. JET doit fournir des données essentielles dans le développement et la démonstration d'un déflecteur fiable pour ITER et conduire des expériences utilisant des plasmas Deutérium-Tritium (50%:50%) dans des configurations similaires à celles d'ITER. Cela donnera une base solide pour les opérations D-T d'ITER. L'objectif essentiel de JET est d'obtenir et d'étudier un plasma dans des conditions et des dimensions proches de celles nécessaires pour le fonctionnement d'une centrale électrique. Ces études conduisent à définir les paramètres adéquats, la taille et les conditions de travail d'une telle centrale électrique. Le *Next Step* européen, qui devrait être en principe ITER, devra démontrer la faisabilité scientifique et surtout technologique de la production d'énergie utilisable. Actuellement, JET a atteint des températures (T), des densités (n) et des temps de confinement (τ_E) requis dans un

réacteur de fusion. Cependant il n'a pas la capacité, pour des questions de taille, d'atteindre ces performances de manière simultanée comme cela serait souhaité. Mais le résultat global, mesuré par le triple produit de ces paramètres ($n\tau_E T$) est à un facteur 6 de la valeur requise pour l'allumage¹ de réactions de fusion. Notons qu'au début des opérations de JET (1983) nous nous trouvions à un facteur 100 de cette limite.

La plupart des expériences à JET ont utilisé seulement du deutérium comme combustible. Une première période d'opération D-T (DTE1) est en préparation et devrait démarrer en janvier 1997 pour environ 3 à 4 mois. Une production de 2×10^{20} neutrons est attendue. Cette expérience, avec 50% de deutérium et 50% de tritium, devrait libérer une puissance de quelques dizaines de MW, soit pratiquement l'énergie nécessaire pour chauffer le plasma. L'activation de l'intérieur du tore de JET par les neutrons (problème sur lequel se penche le groupe Matériaux du CRPP), empêchera toute intervention humaine dans cette enceinte pendant 1 an. Cependant, il sera possible de modifier le système de déflecteur (\rightarrow Mark II GB) grâce aux techniques de télémanipulation développées à JET. Cela sera ainsi l'occasion de démontrer pour la première fois l'une des technologies-clés nécessaires pour ITER et tout autre réacteur de fusion.

Les hautes performances réalisées sont momentanées et limitées par le flux d'impuretés résultant des interactions entre le plasma et la surface des matériaux environnant qui font l'objet des recherches du groupe de l'Université de Bâle. Les impuretés du plasma ont toujours constitué un obstacle majeur pour des opérations stables. Pour le contrôle des impuretés, la géométrie du déflecteur est un élément important. Le dernier *shut-down* de la machine a permis d'installer une seconde configuration de déflecteur (Mark IIA) permettant un meilleur contrôle des impuretés et de s'approcher de conditions de fonctionnement prévues pour ITER.

Développement en Suisse

Cette année, le CRPP a inauguré officiellement son TCV et célébré ces 35 ans de recherche en physique des plasmas, science de base sur laquelle s'appuient toutes les recherches sur la fusion. Depuis son origine, le CRPP a su trouver des thèmes de recherches originaux visant à étudier les phénomènes fondamentaux qui gouvernent le comportement des plasmas dans les installations de fusion. Le TCV en est une concrétisation.

Parmi les faits marquants du TCV, en 1996, on peut citer notamment:

- les améliorations apportées à six des diagnostics utilisés régulièrement avec le TCV: *FIR interferometer*, *X ray tomography cameras*, *Thomson scattering*, *Infrared Bremsstrahlung*, *Bolometry* et *Tangential video camera*;

¹ L'allumage signifie que la puissance provenant des particules α (noyau d'hélium engendrés par la fusion du deutérium et du tritium) est suffisante pour maintenir le plasma à la température voulue. L'auto-entretien de la réaction de fusion est alors réalisé (*ignition* ou allumage). Pour qu'un plasma au coeur d'un réacteur de fusion soit auto-entretenu, il faut atteindre les valeurs minimales suivantes: Température (T): 100 à 200 millions de °C, temps de confinement de l'énergie (τ_E): 1 à 2 secondes et densité centrale du plasma (n): 2 à 3×10^{20} particules/m³ (\sim 1 millième de g/m³) soit un produit de fusion ($n\tau_E T$) de 6×10^{22} m³s million°C.

- la création de plasma ayant des sections poloidales fortement façonnées:
 - création de doublet, voir l'en-tête, (plasma de type tokamak avec deux axes magnétiques);
 - la réalisation du système de contrôle rapide du plasma, comprenant des bobines magnétiques à l'intérieur de la chambre vide et une alimentation "rapide". Ce système est destiné à fournir une rétroaction sur les déplacements instables du plasma. Au fur et à mesure que le plasma devient allongé, son taux d'instabilité augmente et ne peut plus être contrôlé par les bobines externes et leurs alimentations;
- étude de la forme du plasma sur le temps de confinement d'énergie;
- étude des modes H (temps de confinement long);
- chauffage cyclotron-électronique de TCV:
 - la construction de l'infrastructure permettant de lancer 1.5 MW à 82.7 GHz dans le plasma est terminée. Un gyrotron est testé aux performances nominales (0.5 MW - 2s), les deux autres sont en cours de test;
 - première expérience de chauffage à 0.5 MW de puissance. La température électronique augmente à 2 KeV ($> DTe \sim 1 \text{ KeV}$);
 - le gyrotron 118 GHz a atteint les performances requises pour le projet de chauffage du TCV (0.5 MW - 2s).

Dans le domaine de la technologie, les groupes (CRPP-Technologie de la fusion localisée au PSI) Supraconducteur et Matériaux ont toujours une place importante dans le programme européen avec leurs installations respectives SULTAN (*Supraleitung Test Anlage* - installation unique focalisée sur le test de conducteurs pour ITER) et PIREX (*Proton IRradiation Experiment*). Quant au groupe de l'Université de Bâle, il poursuit ces travaux sur le conditionnement des parois de réacteur de fusion.

Notre programme national étant pleinement intégré dans le programme européen, il va s'en dire que les conclusions du FEB sur le programme Fusion européen

va tout naturellement conditionner notre activité dans ce domaine. Ainsi, la commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) a prévu d'entreprendre une analyse des travaux suisses afin d'en examiner la pertinence dans le cadre de l'approvisionnement futur en électricité. Cela constituera une base pour les décisions futures concernant la participation de la Suisse aux prochains projets internationaux. Pour l'instant, il faut savoir que la coopération entre la Suisse et EURATOM est réalisée en vertu d'un accord, illimité dans le temps, fixant d'une manière générale les conditions attachées à cette coopération. Quant aux modalités de la participation suisse au programme Fusion de l'Union Européenne (1994-1998), elles sont réglées sous la forme d'un contrat d'Association. Cet accord, valable jusqu'au 31 décembre 1998, est pour l'instant le seul qui permette à notre pays de participer à un programme technologique communautaire sur pied d'égalité avec les partenaires européens. La contribution à ce programme est basée sur le produit intérieur brut des Etats-membres.

Grâce à ses différents axes de recherche, le programme de fusion suisse est devenu à long terme un maillon du programme européen FUSION, concentré sur les aspects particuliers auxquels il apporte une contribution importante et dans certains cas prépondérante. Ce programme permet, plus que des programmes à court terme, la formation d'ingénieurs et de chercheurs qui abordent des problèmes extrêmement variés, utilisant et développant des techniques et des instruments de pointe. Il contribue donc à l'aménagement de conditions-cadre de premier plan en garantissant la présence d'un personnel scientifique hautement qualifié et en favorisant toutes les possibilités d'ouverture en direction de la recherche internationale et surtout européenne, qui sont des éléments cruciaux pour assurer la compétitivité de notre pays et son maintien comme lieu de production et d'emplois.

La science est un élément de premier plan dans la politique d'intégration. Et en ce sens, l'attrait du programme de l'Association Suisse-EURATOM, est déterminé dans une large mesure par notre appartenance au programme européen FUSION. Il nous ouvre l'accès aux grandes installations expérimentales européennes tel que JET, dont le directeur du CRPP est le président du Conseil et il favorise des collaborations bi- ou multilatérales avec différents partenaires internationaux.

Buts et résultats

La participation subsidiaire de l'OFEN aux activités de fusion, s'est concentrée, en 1996, sur les recherches sur les matériaux (nouvelle activité - CRPP) et le condi-

tionnement des parois de réacteur de fusion (poursuite des activités - Université de Bâle).

Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren [1]

Ce projet s'est terminé début 1996. Dans les réacteurs à fusion, la paroi de la chambre de confinement entrant en contact avec le plasma fait l'objet d'un conditionnement spécial dans le but de prévenir le dégagement d'impuretés qui pourraient contaminer le plasma et

entraîner une déperdition du rayonnement. Cette opération influence grandement les propriétés du plasma car les matériaux présentant la double caractéristique d'un faible nombre atomique et d'un grand pouvoir d'absorption d'impuretés, notamment d'oxygène, per-

mettent de diminuer dratisquement la contamination du plasma. Une technique bien établie et largement utilisée dans les tokamaks est la boruration des parois, c'est-à-dire la déposition de couches minces de bore pur ou de bore-carbone. Ces dernières années, l'emploi de revêtements de bore-carbone a permis d'obtenir un plasma d'une qualité nettement supérieure. Dans le cadre de ce projet une étude d'échantillons qui avaient été exposés à des décharges de plasma dans le tokamak TVC du CRPP a été conduite sur les problèmes d'érosion, de déposition et de redéposition de la couche borurée afin de mieux connaître ces processus intervenant pendant et après la boruration. Pour poursuivre cette amélioration des propriétés du plasma le groupe bâlois a poussé ces recherches en remplaçant le bore par un élément plus léger et réactif comme le lithium. Dans ce projet différentes méthodes de déposition de couches de lithium-carbone (a-C:H/Li) ont été testées et examinées dans une ligne de modèles expérimentaux par rapport à leurs propriétés en tant que matériel pour le conditionnement des parois de réacteurs à fusion. Les interactions d'ions énergétiques d'oxygène avec des couches minces de lithium-carbone (a-C:H/Li), de même que les mécanismes de capture d'oxygène et d'érosion des cou-

ches n'avaient jusqu'alors fait l'objet d'aucune recherche. Dans ce projet ces interactions ont été étudiées par spectroscopie photoélectronique à rayons X et spectrométrie de masse. Les analyses ont montré que dans le cas de couche contenant du Li la période de temps transitoire pendant laquelle la couche retient l'oxygène est, de manière significative, plus longue et le taux d'érosion de la surface après saturation en oxygène plus bas comparé à une couche de carbone pur. La faculté de capture de l'oxygène est donc principalement déterminé par le contenu en Li de la couche de surface.

En conclusion, les réactions chimiques qui vont dominer l'interaction entre les couches a-C:H/Li et les ions d'oxygène, dépendront d'une part du contenu en Li et de la structure chimique de la couche, et d'autre part des conditions thermiques de l'interaction.

Finalement, avec ce projet, le groupe de l'Université de Bâle a aussi acquis une maîtrise de divers procédés de fabrication de tels revêtements à petite échelle (par déposition de plasma ou de rayonnement ionique).

Collaboration avec: CRPP, Institut für Plasmaphysik des FZ Jülich (D), Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (D) et Universität Freiburg (D).

Surface Studies related to Fusion Reactor Material [2]

Avec ce projet, l'Université de Bâle poursuit ses activités sur conditionnement des parois de réacteur de fusion. Plusieurs échantillons (Si (100)) ont été exposés à des décharges de plasma dans le tokamak TVC lors de la boruration des parois. Les couches fines déposées ont été ensuite analysés par spectroscopie photoélectronique à rayons X. La concentration en bore excède généralement 90% et les 10% restant contiennent de l'oxygène et du carbone tandis que aucune impureté métallique peut être détectée. Une analyse récente a montré que de mauvaises conditions de déposition, par exemple vide imparfait, conduisent à augmenter la concentration des impuretés dans la couche mince de surface. Ce changement de composition de la couche mince de surface peut à son tour réduire la

capacité de ce revêtement à retenir des impuretés pendant les opérations avec plasma. D'autres expériences sont planifiées pour examiner plus en détail ce problème important. Un autre aspect de ce projet est l'étude de la réactivité de couches minces libres d'hydrogène (a-C/Li) par rapport à celles riches en hydrogène (a-C:H/Li) qui ont fait l'objet du projet précédent. Cela permettra d'identifier le type de réaction déterminé par la présence du Li sans l'influence de produits issus de réactions avec l'hydrogène et ainsi de mieux comprendre l'interaction des matériaux contenant du Li avec l'oxygène.

Collaboration avec: CRPP, Institut für Plasmaphysik des FZ Jülich (D).

An investigation of the microstructural stability and mechanical properties of low activation martensitic steels and Ti-alloys [3]

Une des caractéristiques souhaitable des réacteur de fusion magnétique est la faible radioactivité résiduelle de composants tels que les matériaux qui constituent la chambre de confinement du plasma. Ces matériaux sont activés par les neutrons issus des réactions de fusion. Pour atteindre cette objectif des matériaux à moyenne et faible réactivité ont été développés.

Ce projet, qui a démarré en novembre 1996, a pour but d'étudier deux familles de ce type de matériaux: les aciers martensiques à faible activation (9CrWVT - acier connu sous le nom d'OPTIMAX) et les alliages de titane.

Dans le cas des aciers martensiques à faible activation (LAS), le contenu de W dans l'acier OPTIMAX et le traitement à la chaleur seront optimisés en fonctions des propriétés mécanique et microstructurelle. En particulier, il sera cherché les conditions pour obtenir la

meilleure relation entre une basse température de transition ductile-cassant et la résistance de ce type d'acier.

Des calculs de radioactivité résiduelle montrent que le Ti a, après le V et Cr, le taux de désintégration le plus rapide. Due à une combinaison intéressante des propriétés mécanique et thermophysique, les alliages de Ti ont une faible contrainte thermique, une grande résistance à la fatigue et une bonne dureté vis-à-vis de la fracture. Cependant, le Ti et les alliages de Ti ont une affinité avec l'hydrogène qui, dans le domaine de la fusion conduit à deux problèmes: 1. une perte de ductilité et 2. la rétention de l'hydrogène induit une modification de la proportion de tritium dans le réacteur. Donc différents type de "barrières à hydrogène" sont étudiées (TiC, TiN+TiC et Al₂O₃).

Pour ces deux familles de matériaux, il s'agit d'obtenir des alliages stables utilisables pour les structures de réacteurs de fusion et ayant des propriétés mécaniques et de microstructure bien établies.

Collaboration avec: VACUMET, ancienne division de SULZER Innotec.

Projet pour 1997

Poursuite des activités en cours à l'Université de Bâle (projet 2) et à Lausanne (projet 3) groupe des Matériaux (CRPP-Technologie de la fusion, localisée au PSI).

Liste des projets

- [1] P.Oelhafen, P. Reinke, J.-U. Thiele, I.f.P./Uni-Basel: *Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren.* (RF)
- [2] P.Oelhafen, P. Reinke, J. Geng, I.f.P./Uni-Basel: *Surface Studies related to Fusion Reactor Material.* (RA)
- [3] M. Victoria, CRPP/Fusion Technology c/o PSI-Villigen: *An investigation of the microstructural stability and mechanical properties of low activation martensitic steels and Ti-alloys.* (RA)

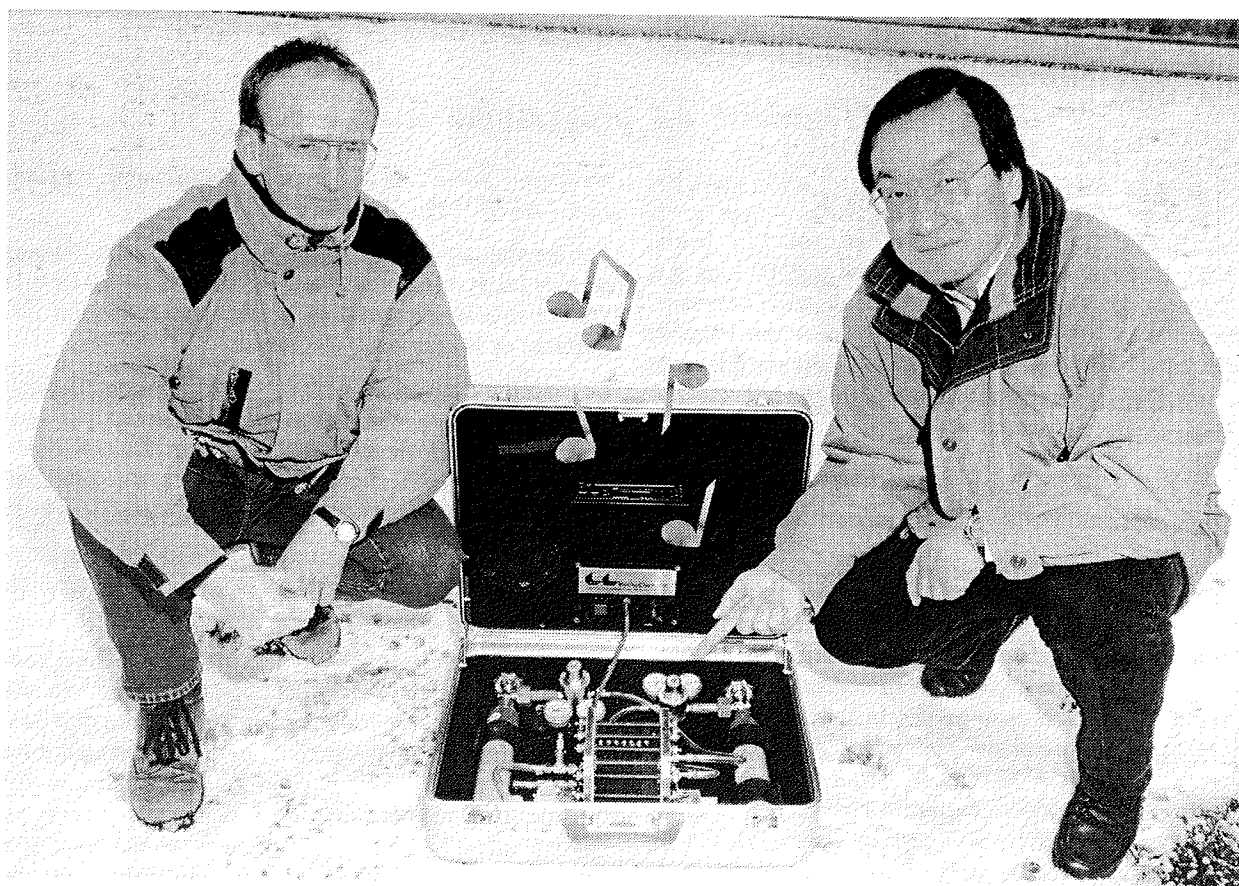
(RF) Rapport final disponible

(RA) Rapport annuel 1996 disponible

PILES À COMBUSTIBLE & ACCUMULATEURS

Rapport de synthèse
sur les activités 1996 du programme de recherche

Léo Dubal



Pile à combustible H_2 / O_2

Module de démonstration autoradio de 45 Watt d'ElectroChem en opération. C'est le premier système portable équipé de membranes polymères de l'Institut Paul-Scherrer.

Introduction

Un générateur électrochimique convertit directement en électricité, l'énergie libérée lors d'une réaction chimique. Dans le type "piles à combustible", l'anode est approvisionnée en combustible (gaz naturel reformé) au gré de la puissance appelée, alors que pour le type "accumulateur", elle est rechargée, en inversant la réaction, c'est-à-dire, le sens du courant.

Le programme de recherche "Piles à combustible et accumulateurs" vise à coordonner l'ensemble des activités en matière de générateurs électrochimiques autour d'une stratégie cohérente, intégrée dans la collaboration internationale. La 1ère journée suisse sur les applications des piles à combustible - où l'installation portable présentée sur la page d'en-tête a été inaugurée - permet de conclure qu'une tension minimum de 12 VDC est un impératif économique incontournable pour un module attractif de générateur électrochimique.

Le soutien subsidiaire de l'OFEN aux activités de recherche en matière de générateurs électrochimiques se limite, compte tenu du cadre financier décidé par le Parlement, aux types de générateurs les plus prometteurs pour la politique énergétique suisse. Les travaux de recherche incluent le développement de modèles fonctionnels de générateurs 12 VDC, dont la puissance peut s'élever jusqu'à 1 kW-él. Les modules de puissance plus élevée sont traités comme des installations P+D (Pilote et Démonstration). Les soutiens financiers par les fondations pour la recherche énergétique PSEL (Fonds pour projets et études de l'économie électrique), FOGA (Fonds de recherche de l'industrie gazière suisse), et FRUP (Fonds de recherche de l'Union Pétrolière) ainsi que par les programmes européens sont vivement souhaités.

Centres de gravité du programme de recherche

Les piles au gaz naturel, à électrolyte d'acide phosphorique, dites "PAFC", ont leurs rejets thermiques à une température de plus de 100°C et une très bonne longévité. Leur marché est celui des installations stationnaires de couplage chaleur-force de taille moyenne, entre 200 et 1000 kW-él, pour des consommateurs de type hôtel ou hôpital. Ces piles à combustible sont commercialisées sous la forme d'un module de 200 kW-él, avec un système de contrôle capable de gérer jusqu'à cinq modules. Une réduction de prix - au moins d'un facteur deux - est attendue afin que cette technologie sophistiquée devienne compétitive.

Les piles à hydrogène, à électrolyte polymère, dites "PEFC", ont des rejets thermiques de basse qualité (moins de 80°C) et sont donc inappropriées au couplage chaleur-force. Malgré leur courte durée de vie, leur puissance massique élevée devrait cependant les rendre acceptables dans le marché des installations portables ou mobiles. La première application envisagée pour la Suisse, qui soit réaliste et démonstrative, est la navette lacustre à propulsion électrique. Le problème du reformage d'un combustible liquide n'est pas encore résolu, pas plus que celui du prix, d'où l'importance de la collaboration internationale.

Les piles au gaz naturel, à électrolyte céramique, dites "SOFC", ont des rejets thermiques bien supérieur à 100°C. L'application idéale est le module stationnaire chaleur-force HEXIS (*Heat Exchanger Integrated System*) de SULZER-Innotec, de la taille d'une chaudière pour le chauffage individuel des logements, permettant de produire localement l'électricité à la demande. Les défis technologiques sont l'apprêtage du gaz naturel à petite échelle et la mise au point d'un procédé de fabrication économique pour un électrolyte céramique opérant à une température inférieure à 820°C. Les procédés candidats sont: la projection sous vide au chalumeau à plasma, "VPS", le *Physical Vapour De-*

position, "PVD", et l'*Aerosol Electrostatic Deposition*, "AED" [17].

Les accumulateurs au plomb sont les plus économiques de tous les accumulateurs actuels. Le marché visé est la voiture hybride électro-diesel, après une réduction importante de la masse des électrodes.

Les accumulateurs "Ni-MH" (hydrures métalliques) sont favorisés par des arguments écologiques par rapport aux accumulateurs nickel-cadmium. La collaboration internationale cherche à conforter cet avantage face à l'impitoyable critère économique.

Pour les accumulateurs "zinc-air", il s'agit de développer un module de base de 30 Ah et 12V pour la traction électrique.

Pour les accumulateurs "ions-lithium", les intérêts économiques sont tels que la collaboration internationale s'avère difficile. L'option pour la Suisse, telle qu'elle a été identifiée fin 1996, est celle du développement d'un module de base de 12V pour la traction électrique. Ce module pourrait devenir un sérieux concurrent du "plomb allégé" et du "zinc-air". Les atouts suisses à valoriser sont: la sécurité, les électrodes bifonctionnelles et les matériaux d'électrodes nanocristallins.

Pour les supercondensateurs "haute fréquence", le marché visé est la locomotive. Le premier défi technologique est le choix et la caractérisation des matériaux appropriés. L'intérêt de recherches sur un type "basse fréquence", adapté au système d'alimentation pour la voiture électrique, est un thème controversé.

Pour les chargeurs intelligents, l'objectif principal est le module universel à intégrer à la voiture électrique. Considérant les énormes gaspillages d'énergie qui ont lieu lors de la charge des accumulateurs de tous types et de toutes tailles, le marché pour des modules plus universels et plus performants est considérable.

Buts visés pour 1996

PILES À COMBUSTIBLE

PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells):

Étudier la composition du biogaz d'une installation de méthanisation des déchets et l'apprêtage du biogaz pour son utilisation dans une installation de 200 kWe, de type ONSI PC25C. En effet, dans la conjoncture actuelle, le tarif promotionnel de 0,16 Fr/kWh pour la production d'électricité à partir d'une source d'énergie renouvelable incite à l'utilisation du biogaz, à la place du gaz naturel.

PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cells):

1. Développer le système de gestion de l'eau dans le cadre d'un projet européen du programme JOULE.
2. Optimiser le procédé de fabrication des membranes, construire et caractériser un *stack* de 200 W.
3. Rendre les membranes PSI "eurocompatibles", avec comme première étape leur intégration dans un module de démonstration "étranger".

ACCUMULATEURS

Pour chaque projet: tentative d'intégration dans un des programmes européens.

Accumulateurs "ions-Li" & "Zn/air": recherche de partenaires industriels et lancement de projets.

Accumulateurs "Ni-MH": étude de la non-stoichiométrie dans les alliages type AB₂, en vue d'atteindre des

SOFC (Solid Oxide Fuel Cells):

1. Optimiser la porosité du diffuseur-fuel à base de nickel et sa membrane-couvercle, les conditions d'activation électrocatalytique initiale et le procédé VPS, pour atteindre la performance de 250 mW/cm², à 850°C, avec une dégradation inférieure à 15 μ volt/heure.
2. Développer un diffuseur-air en fibres de céramique extrudées et une barrière de diffusion anti-chrome, et quantifier l'effet de privation de fuel et d'oxygène.
3. Rationaliser la production d'éléments VPS de 12cm \varnothing , tester un *stack* HEXIS équipé d'éléments VPS et d'un reformeur de gaz naturel, établir le bilan énergétique détaillé, et préparer un projet P+D de 50kW.
4. Optimiser le procédé PVD pour atteindre la performance de 200 mW/cm² à 850°C avec un électrolyte zircon ultra-mince.

charges massiques, supérieures à 400 mAh/g, avec moins de 10% de perte sur 100 cycles, et modèle thermodynamique pour l'électrode Ni-MH.

Chargeurs intelligents: développement d'un chargeur universel en vue d'un projet P+D d'intégration sur voiture électrique.

Travaux effectués et résultats obtenus

PILES À COMBUSTIBLE

PAFC:

L'étude par PROBAG, à Baden, de la composition du biogaz d'une installation de méthanisation des déchets a commencé à fin 1996. Les résultats sont attendus pour avril 1997.

PEFC:

Le PSI [7] a optimisé son procédé de fabrication des membranes par greffage radiatif à l'aide d'une électroirradiation chez STUDER, Däniken. Des éléments de 200 cm², avec plaque bipolaire en acier, ont été testés. Dès 1997, des modules P+D d'une centaine de watts pourront être mis à disposition d'un premier cercle d'utilisateurs. Dans le cadre d'un projet JOULE avec SIEMENS, à Erlangen (D), le PSI, à Villigen a développé avec succès un premier système pour la gestion de l'eau dans les piles polymères hydrogène - air.

Dans son effort pour rendre ses membranes "eurocompatibles", le PSI, dans une première étape, est parvenu à intégrer ses membranes dans le module présenté en couverture.

SOFC:

Les études aux EPF-Lausanne [4] et Zürich [5] ont porté sur la réduction des pertes de polarisation à l'interface cathode-électrolyte, et sur la fabrication de mousse céramique pour le diffuseur-air. À l'EMPA [6], la technique de fabrication d'un feutre de perovskite a progressé, des poudres de compositions et granulosités diverses ont été produites et des dépôts VPS ont été effectués.

Le développement du **procédé VPS**, a été encadré par une *Task-force* associant à MEDICOAT, à Mägenwil [3], l'EMPA à Dübendorf et Thun [6], et SULZER-Innotec, Oberwinterthur [2]. Des éléments avec un trou central, ont pu être fabriqués, offrant ainsi une meilleure compatibilité avec le système HEXIS de SULZER-Innotec. Après le test d'un *stack* de 5 éléments de 12cm \varnothing , testé dans le système HEXIS [2], la construction d'un *stack* de 40 éléments a démontré la simplicité, pour le montage, que représente les éléments VPS. La tension à circuit ouvert des éléments le long du *stack* variaient, à 870°C entre 0,82 V et 0,92 V.

Suite à une trop grande rigidité thermomécanique du système d'alimentation en air, l'essai a dû être interrompu.

Des mesures chez MEDICOAT [3] et à l'EPFL [4] avec une variation par un facteur de 30 du débit d'hydrogène ont mis en évidence que les performances des éléments VPS peuvent être sensiblement améliorées en augmentant la densité de l'électrolyte et la porosité de l'anode. Par ailleurs, un essai d'alimentation d'un élément VPS en gaz naturel partiellement reformé à 680°C, montre que l'opération d'un tel élément à 900°C ne provoque pas de dépôt de carbone. *Last but not least*, les éléments VPS fabriqués sur l'installation de l'EMPA-Thun [6] ont donné des performances

électrochimiques comparables à celles des éléments produits chez MEDICOAT, démontrant ainsi la reproductibilité de cette technologie.

À l'aide du **procédé PVD**, chez SULZER-Innotec [2], des électrolytes en zircone, ultra-minces, de 4 µm d'épaisseur et de 35 mmØ ont été déposés sur un support à base de nickel, constitué d'un *diffuseur*-combustible et d'un *couvercle*-anode préalablement fritté. Après oxydation du dépôt PVD "noir", la couche transparente présentait, optiquement, une adhésion parfaite. Monté en élément PVD, après 100 heures d'opération, la puissance de plus 600 mW/cm² à 814°C dépassait largement l'objectif fixé.

ACCUMULATEURS

Les travaux, chez GLUR, à Münsingen [13], sur un chargeur universel intelligent pour accumulateurs dédiés à la traction électrique ont commencé en fin d'année seulement. Des résultats préliminaires seront présentés au premier workshop suisse sur les chargeurs intelligents, qui se tiendra le 10 avril 1997.

Les travaux sur les d'accumulateurs **Ni-MH** à l'Uni-Fribourg et chez LECLANCHÉ, à Yverdon sont maintenant intégrés à un projet du programme européen *BRITE-EURAM*. Dans la dernière phase avec financement subsidiaire de l'OFEN, l'Uni-Fribourg [12] a atteint, avec des alliages de type AB₂ (ZrV_xNi_{2-x}), des capacités supérieures à 400 mAh/g, mais avec plus de 10% de perte après 100 cycles.

Les travaux sur les accumulateur **Zn-air** au PSI [8] sont maintenant intégrés à un projet PSEL-OFEN. Les électrodes de 100cm², fabriquées avec une pâte hydrophile de zinc, mélangée à de longues fibres de cellulose, présentent une capacité surfacique de 150 mAh/cm², ce qui est 50% de plus que celle que présentaient les électrodes de 25 cm². Le filtrage de l'air à l'aide d'une membrane en polypropylène a permis de réduire le contenu en CO₂ à moins de 50 ppm.

Le projet sur les accumulateurs **ions-lithium** au PSI [9] a permis de mesurer une valeur de 9x10⁻⁸ cm²/s pour le coefficient de diffusion des ions Li⁺ dans une électrode poreuse de graphite TIMCAL, et une charge massique réversible de 340 Ah/kg ainsi qu'une perte de charge au cours du premier cycle, inférieure à 20%. Suite à une réunion des experts suisses concernés, un projet de recherche en collaboration entre le PSI, les EPF, deux Universités et quatre industries a pu être esquissé. Les mots-clés en sont: traction électrique - sécurité - matériaux nanocristallins - structure bipolaire.

Le projet de **modélisation numérique** de l'Université de Fribourg et du PSI [10], basée sur la chimie quantique, a permis de calculer la "carte" de la barrière de potentiel électrostatique dans l'oxyde de manganèse lithié. La hauteur de cette barrière influence directement la constante de diffusion des ions Li⁺ dans l'électrode.

Le projet exploratoire de l'Uni-Fribourg [11] sur l'utilisation des polymères dans les accumulateurs ions-lithium a permis de conclure sur l'intérêt d'utiliser les dithiocarbamates lithiés comme matériau d'électrode.

Transfert à la pratique

PILES À COMBUSTIBLE

L'installation PAFC "GAZEL" des SI-Genève [1] termine l'année en affichant le total impressionnant de 30'140 heures d'opération avec un taux de disponibilité de 90%. Le total de l'électricité produite est de 4,8 millions de kWh.

Le 4 décembre s'est tenu à l'IGS-Grenchen la première journée suisse sur le potentiel d'application des piles à combustible basse-température [15]. En contraste prononcé avec les symposiums classiques vantant les mérites des générateurs, c'est l'aspect de l'utilisation qui était au centre des débats, telle la présentation de l'étude de marché de l'équipement DC, de l'Institut Fraunhofer, à Fribourg-en-Brisgau[16].

Cette manifestation, couronnée par l'inauguration du module P+D d'une PEFC de 40 W autoradio, portable (voir en-tête), marque d'une pierre blanche l'entrée des piles à combustible dans le domaine des Écoles Techniques Supérieures: le PSI a lancé une fructueuse collaboration avec l'ETS de Granges qui est en train de s'étendre à d'autres ETS.

Les contacts avec DeNORA, à Milano (I) ont été renouvelés et un premier échange de vue avec DuPONT, à Wilmington (DE, USA) a eu lieu dans la perspective d'amener le développement des membranes PSI en un produit commercial.

ACCUMULATEURS

La fiche signalétique préparée l'an dernier par l'Institut für Elektronik de l'ETH-Zürich, a été adaptée par l'OFEN en français. Un livret grand public, illustré,

format "CD", intitulé "Mobile elektrische Energie" a été élaboré sur la même base.

Coordination & collaboration

Le chef du programme représente la Suisse dans les organismes de gestion des programmes de collaboration internationale. Pour évaluer les priorités immédiates et les progrès accomplis dans son programme, il est secondé par des d'experts suisses et étrangers.

Pour la promotion des piles à combustible, un groupe s'est constitué, fin 1996, sous la direction d'un représentant de l'industrie du gaz.

La fructueuse collaboration dans la recherche sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Énergie se poursuit dans les domaines SOFC et PEFC, dans le cadre de deux nouveaux projets auxquels le Conseil fédéral a décidé de participer le 18 décembre 1996.

Dans le cadre *European Fuel Cell Users Club*, qui réunit les opérateurs des 10 PAFC en opération en Europe, le titre de la meilleure installation pilote a été décerné à GAZEL des SI-Genève. Un score supplémentaire au palmarès du programme P+D de l'OFEN.

Dans le cadre *JOULE*, le PSI collabore, entre autres avec SIEMENS, à un projet PEFC, alors que SULZER collabore, parmi d'autres partenaires, avec l'IMPERIAL COLLEGE de Londres, à un projet sur les SOFC à température intermédiaire.

La collaboration d'un partenaire industriel important ayant été assurée, la proposition du PSI de projet *JOULE* "zinc-air" va être soumise à nouveau fin janvier 1997.

Dans le cadre *BRITE-EURAM*, la maison DEVEX, à Châtel-St-Denis, participe à un projet sur la réduction du poids des accumulateurs au plomb, alors que l'Uni-Fribourg et LECLANCHÉ participent à un projet sur les hydrures métalliques.

Dans le domaine des accumulateurs zinc-air, une collaboration avec le PSEL a permis de lancer un projet de recherche commun PSI et industrie.

Évaluation 1996

L'intérêt des ETS pour les piles polymères PEFC a finalement pu être éveillé grâce à la journée du 4 décembre. Le groupe pour la promotion des piles à combustible qui s'est constitué en décembre, témoigne, lui, d'une ouverture vers le marché.

Pour les piles céramiques SOFC, les succès importants remportés dans la maîtrise de la technologie VPS pour la fabrication d'éléments "HEXIS-compatibles", laissent augurer, pour 1997, la réalisation d'un modèle

fonctionnel, 100% suisse, donnant pleinement satisfaction.

Pour les accumulateurs zinc-air, le lancement d'un projet intégrant l'industrie constitue une métamorphose très prometteuse.

Pour les accumulateurs au lithium, la formation d'un groupe d'intérêt regroupant Écoles et industries va permettre à la Suisse de s'engager enfin, de manière cohérente, dans ce domaine porteur.

Perspectives 1997

Piles à acide phosphorique: évaluer l'intérêt de l'opération avec du biogaz.

Piles polymères: Construire des stacks de 100 W / 12VDC pour satisfaire le besoin de démonstration au sein des écoles d'ingénieurs, renforcer la collaboration avec les partenaires européens et concevoir un module pour un projet P+D de navettes lacustres électriques pour l'EXPO 2001. Suite au workshop AIE de septembre 1995 sur le thème "*Fuel Processing for PEFC*", organiser un workshop de mise à jour.

Piles céramiques: comparer les avantages et inconvénients respectifs des procédés VPS, PVD et AED pour le dépôt d'un électrolyte zircone mince et dense; optimiser le support anodique en vue d'un facteur

d'utilisation du combustible élevé; tester des stacks VPS de 50 éléments.

Accumulateurs ions-Li: Lancer un projet de collaboration nationale autour d'un concept de module pour la traction électrique "haute-sécurité / électrode bipolaire / matériaux nanocristallins".

Accumulateurs Zn-air: Poursuivre le développement d'un modèle fonctionnel pour la traction électrique et s'engager dans le projet européen *JOULE*.

Chargeur intelligent: Poursuivre les développements, et renforcer les collaborations autour des opportunités offertes par le workshop du 10 avril 1997, et lancer le projet P+D proposé par l'ETS-Bienne.

Liste des projets

- [1] Nguyen D.L., SERVICES INDUSTRIELS-Genève: *Projet GAZEL - SIG*. (FS)
- [2] R. Diethelm, SULZER HEXIS-Winterthur: *HEXIS: Demo 1kW-VPS und PVD-PEN • Vorstudie für HEXIS 50 kWe WKK Systemmodul*. (RA)
- [3] H. Gruner, MEDICOAT-Mägenwil: *1000 W - "VPS" for 1000 h*. (RA)
- [4] A. McEvoy, ICPII / EPF-Lausanne: *Optimisation de l'activation initiale des PEN VPS*. (RA)
- [5] L. Gauckler, NMW / ETH-Zürich: *Integrierte Stack-Repeat Elemente für HEXIS*. (RA)
- [6] K. Berroth, EMPA-Dübendorf & Thun: *Besondere Untersuchungen für die Herstellungsprozesse von SOFC PEN-Elementen*. (RA)
- [7] G. Scherer, PSI-Villigen: *Material- und Strukturaspekte von Membran-Brennstoffzellen • Démonstration d'une pile polymère commerciale équipée avec des composants PSI pour les applications basse tension (12 volts)*. (RA)
- [8] S. Müller, PSI-Villigen: *Alkalische wiederaufladbare Zink/Luft-Batterie*. (RA)
- [9] P. Novák, PSI-Villigen: *Komponenten für Ionentransfer-Batterie*. (RA)
- [10] C. Daul, UNI-Fribourg & E. Deiss, PSI-Villigen: *Modélisation de cellules électrochimiques au Lithium d'intercalation*. (RA)
- [11] C.W. Schläpfer, UNI-Fribourg: *Anwendungen von Polymeren in elektrochemischen Zellen*. (RF)
- [12] L. Schlapbach, UNI-Fribourg: *Metallhydride als Elektroden in reversiblen Batterien*. (RF)
- [13] Th. Felber, GLUR-Münsigen: *Vorstudie "PROTAC-Traktion" (Intelligentes Ladegerät für LEM)*. (RA)

(FS) Fiche signalétique 1996 disponible

(RA) Rapport annuel 1996 disponible

(RF) Rapport final disponible

Références

- [14] *Notice sur les piles et les accumulateurs*, IfE / ETH-Zürich, adaptation française: OFEN.
- [15] *1. Schweizerische Tagung über das Anwendungspotential von Niedertemperatur-Brennstoffzellen*, 4. Dez. 1996, IGS-Grenchen, Zusammenfassung der Referate, I. Popelis (e-mail: ivan.popelis@igs.ch).
- [16] Jérôme Kuhmann (e-mail: jerry@ise.fhg.de), *"Europaweite Marktübersicht und Test von Gleichspannungsverbrauchern; Handbuch für Anlagenplaner und Nutzer von Gleichspannungssystemen"*.
- [17] Kwang-Leong Choy (e-mail: k.choy@ic.ac.uk), IMPERIAL COLLEGE-London, *Proceedings IEA-SOFC Workshop, Les Diablerets*, EPFL, 1997.

VERKEHR

Übersichtsbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Martin Pulfer



Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen

Kontinuierliche Forschungsarbeiten, verbunden mit nachfolgenden Pilot- und Demonstrationsprojekten, verbessern die Energieeffizienz, senken die Emissionen und schaffen auch neue Arbeitsplätze: Das neue Fabrikationsgebäude (16'000 m²) der Industria Micromotori Elettrici - Svizzera (MES) in Stabio, Tessin.

Programmübersicht und Programmziele

Das Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung im Verkehr" befasst sich mit den beiden Schwerpunkten motorisierter Individualverkehr und Gütertransport. Die generellen Ziele für dieses Programm lauten:

- Verbesserung der Energieeffizienz,
- Reduktion der Umweltbelastung,
- umsetzbare Problemlösungen.

Im motorisierten Individualverkehr weisen folgende Parameter ein grosses Energiesparpotential auf, das mit dem Forschungsprogramm und den nachfolgenden P&D-Programmen erschlossen werden soll:

- Die Fahrzeugmasse beeinflusst sowohl bei den Beschleunigungsvorgängen als auch während der gesamten Fahrt durch die Rollreibung den Energieverbrauch negativ. Mit **modernen Verbundwerkstoffen** und **Konstruktionstechnologien** lässt sich die **Fahrzeugmasse** gegenüber den heute verbreiteten Technologien noch beträchtlich **reduzieren** und dadurch wesentlich Energie sparen. Selbstverständlich stellt dabei die Sicherheit einen sehr wichtigen Aspekt dar, der im Rahmen von Demonstrationspro-

jekten dem Publikum auch dargestellt werden muss.

- Der **Wirkungsgrad des gesamten Antriebsstranges** beträgt bei heute erhältlichen, thermisch angetriebenen Fahrzeugen im Mittel nur ca. 15 - 20 %. Mit dem Forschungsprogramm soll deshalb der Zugang zu optimierten **Antriebsaggregaten und -ketten** (Otto-, Diesel- und Elektromotoren oder hybriden Systemen) erschlossen werden, die insbesondere im Teillastbereich wesentlich effizienter arbeiten. In Zwischenspeichern kann zusätzlich überschüssige kinetische Energie gespeichert und für das System nutzbar gemacht werden.

Beim Gütertransport steht nach wie vor die **Optimierung der Transportketten** mit Hilfe des kombinierten Güterverkehrs im Vordergrund.

Arbeiten zu neuartigen Technologien und Systemen sowie Technologiefolge-Abschätzungen bilden wichtige Ergänzungen zu den zwei Programmschwerpunkten.

Das von der CORE genehmigte Forschungskonzept 1996 bis 1999 für den Bereich Verkehr [22] sowie die Sammlung der Jahresberichte der Projektnehmer [22] sind vorhanden.

1996 durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

MOTORISIERTER INDIVIDUALVERKEHR

a) Antriebe, Antriebskette

Verbrennungsmotoren weisen sowohl bezüglich Schadstoffemissionen als auch bezüglich Treibstoffverbrauch ein beträchtliches Verbesserungspotential auf. Besonders Ottomotoren haben im Teillastbereich, wegen der Drosselverluste, einen gegenüber ihrem Bestpunkt spürbar kleineren Wirkungsgrad. Neben der Vermeidung dieser Verluste lassen sich weitere Verbrauchseinsparungen dadurch erzielen, dass der Antriebsstrang um zusätzliche Elemente erweitert wird (Leerlaufabschaltung, Rekuperation der Fahrzeugenergie, etc.).

Im **PALOS**-Projekt [5] der ETH Zürich wird versucht, durch mathematische Modelle alle in diesem Zusammenhang wichtigen Einflüsse zu erfassen und durch rechnergestützte Optimierungen ein möglichst effizientes und schadstoffarmes Antriebssystem zu entwerfen. In einer zweiten Phase soll der gewählte Ansatz realisiert und auf Prüfständen und in Fahrzeugen getestet werden. Eine bereits laufende enge Kooperation mit diversen schweizerischen Firmen und Institutionen stellt die möglichst direkte Umsetzung der Resultate sicher.

Erste Ergebnisse sind theoretische Resultate bezüglich des Aufwand/Nutzen-Verhältnisses der Bremsenergieerückgewinnung und bezüglich diverser Teillastmassnahmen. Zudem wurde ein dynamisches Modell des WENKO SAVE-Motors [7] erstellt und validiert, welches unter anderem zur Minimierung des Schadstoffausstosses dienen wird. Im Rahmen dieses Projekts

wurden auch konkrete Beiträge für den Antrieb des SmILE-Fahrzeugs [8] geleistet (Ladedruckregelung, Elektronik etc.).

Das Projekt **SAVE** (*Small Advanced Vehicle Engine*) [7] der Firma WENKO in Burgdorf befasst sich mit der Optimierung eines aufgeladenen, kleinvolumigen 2 Zylinder 4-Takt Boxermotors. In einem ersten Teilprojekt wurde in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich [5] eine elektronische Steuerung für den COMPREX-Druckwellenlader entwickelt. Durch diese Arbeiten konnte eine wesentliche Steigerung des Drehmomentes im Bereich tiefer Drehzahlen erzielt werden. Dadurch werden die energieeffizienten Zonen im Motorenkennfeld erheblich erweitert und eine sparsame Nutzung des Motors wird erst ermöglicht.

Das zweite Teilprojekt optimierte das Abgasreinigungssystem durch die verschiedene Anordnung, Struktur und Beschichtung des Katalysators. Diese Arbeiten reduzieren die Emissionen insbesondere beim Kaltstart sowie im tiefen Teillastbereich.

Dieser so optimierte Ottomotor wird in den Projekten [13] und [8] angewendet beziehungsweise in [5] weiter optimiert.

Das Projekt **Twin Trak** [13] der Firma ESORO in Glattbrugg entwickelt einen Parallelhybrid-Antrieb. Hierbei wird eine nicht aufgeladene Variante (Sauger) von [7] als thermischer Motor verwendet. Bei der kon-

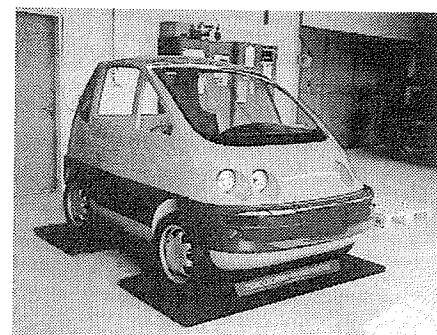
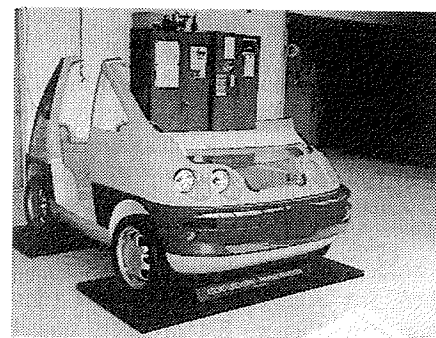
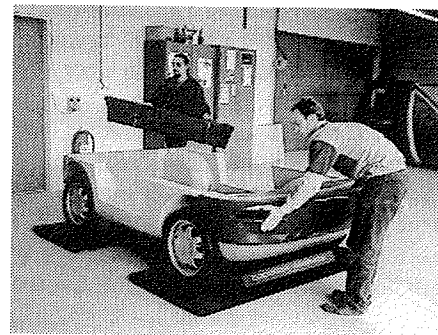
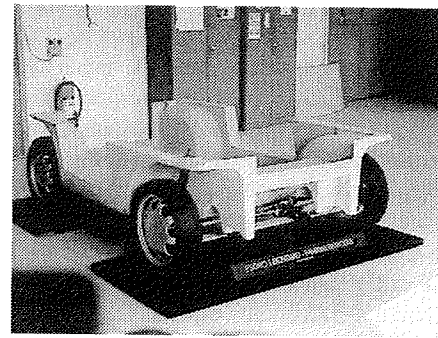
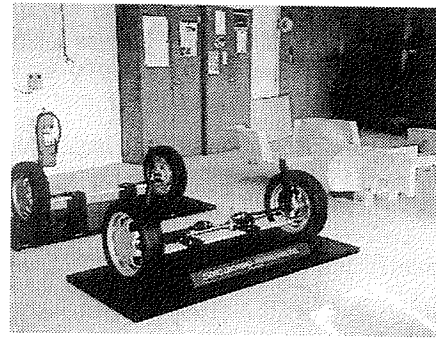
strukturellen Anordnung dieses Antriebes wird auf eine volle Kompatibilität zum Teilprojekt "Antriebsachse" von [1] geachtet. Der erwartete Verbrauch von 2,8 l/100km, bei einer konstanten Geschwindigkeit von 90 km/h, eingebaut in das Testfahrzeug ESORO H301, wurde rechnerisch nachgewiesen. Bei rein elektrischem Betrieb im Stadtverkehr wird ein Energiebedarf von 14 kWh pro 100 km erwartet. Das Projekt wird im Sommer 1997 abgeschlossen und der Öffentlichkeit vorgestellt.

Das Projekt **Ökomobil Hybrid III** [6] der ETH-Zürich konnte 1996 erfolgreich abgeschlossen werden. Es umfasste die Entwicklung eines neuartigen Antriebssystems, bestehend aus Ottomotor, Schwungrad und Elektromotor. Dieser Antriebsstrang wurde auf einem dynamischen Prüfstand getestet und dabei mit einem VW GOLF III verglichen. Im ECE R15-04 Stadtzyklus verbrauchte der 1560 kg schwere Hybrid III mit 4,7 l Benzin auf 100 km 47 % weniger Treibstoff als das 330 kg leichtere Vergleichsfahrzeug. Die Emissionen wurden im gleichen Ausmass vermindert. Nach Abschluss des Projektes bauen die Volkswagen Werke dieses Aggregat, zur Systemerprobung, Demonstration und Werbung, in einen VW SHARAN ein.

Das Projekt des HTL-Luzern **Ecomotor für Leichtmobile (Leichthybrid II)** [4] stellt die Entwicklung eines Serienhybridantriebes auf der Basis eines Erdgas- und eines Elektromotors, verbunden mit einem Langzeitenergiespeicher (Bleibatterien) und einem Kurzzeitenergiespeicher (Hochleistungskondensatoren, Supercaps) dar. Auf dem Prüfstand wurde der Verbrennungsmotor auf den Wirkungsgrad (von 22 % auf 30 %) und auf minimale Emissionen optimiert. Ein zweiter Motor wurde direkt an einen Permanentmagnet-erregten Synchrongenerator gekoppelt. Für die Rekupe-ration der kinetischen Energie in die 96 in Serie geschalteten Supercaps wurde eine entsprechende Leistungselektronik entwickelt. Für das übergeordnete Leitsystem des gesamten Hybrids wurde ein CAN-Bus mit dezentralintelligenten Knoten entwickelt. Im Frühjahr 1997 wird dieser neuartige Antrieb in das Testfahrzeug *Blue Angel* eingebaut. Für dieses Leichtbaufahrzeug wird im FTP 75-Zyklus (Stadtverkehr) ein Verbrauch von weniger als 3 l/100 km und ein deutliches Unterschreiten der ULEV-Norm erwartet.

b) Massenreduktion

Das 1995 gestartete Projekt **Modultec - Modultechnologie für Leichtmobile** [1] der beiden Partnerfirmen HORLACHER und ESORO konnte in Zusammenarbeit mit der HTL Brugg erfolgreich fortgesetzt werden. Die selbsttragende, modular aufgebaute Kunststoffkarosserie ergibt, bezogen auf ein vergleichbares Kleinfahrzeug mit Metallkarosserie, eine Massenreduktion von ca. 200 kg. Gleichzeitig wird durch dieses Verfahren die Montage der gesamten Karosserie wesentlich vereinfacht und beschleunigt. Die innere Struktur der Module selbst und die Orientierung der Verbundfasern wird mittels Finite Element Rechnung optimiert. Dadurch kann natürlich wiederum Masse eingespart werden, oder bestimmte Zonen können zur Verbesserung



Modultec: Massereduktion und einfachste, rasche Montage

der Sicherheit gezielt starr oder leicht verformbar ausgelegt werden. Ein erster Prototyp eines solchen modular aufgebauten Fahrzeuges wurde 1996 am Autosalon in Genf der Öffentlichkeit präsentiert.

An der HTL-Luzern wurde im Berichtsjahr das Projekt **Innovatives Leichtbauverfahren** [3] in Angriff genommen. Hierbei wird mit dünnwandigen, ausge-

schäumten Aluminiumrohren und einer speziellen Verbindungstechnik ein Fahrzeuggerüst aufgebaut. Die Gerüst ist sehr leicht und zeichnet sich durch eine extreme Energieabsorption bei der Verformung (*Crash*) aus. Das Verfahren ist patentrechtlich geschützt. Weitere Anwendungen, in denen Leichtbauweise relevant ist, befinden sich in Abklärung.

c) Gesamtsysteme

Im Auftrag von GREENPEACE Deutschland entwickelten die Firmen WENKO Burgdorf, ESORO Glattbrugg und BRM, Brugg den Prototypen **SmILE** (*Small, Intelligent, Light, Efficient*) [8]. Die Vorgabe lautete: Halbierung des Treibstoffbedarfs eines RENAULT TWINGO, ohne die anderen wesentlichen Aspekte (Emissionen inkl. Lärm, Fahrverhalten, Sicherheit und Transportkapazität) negativ zu beeinflussen. Die drei Firmen realisierten diese Aufgabe, indem sie das Ausgangsmodell in folgender Weise grundlegend überarbeiteten: Der Antrieb wurde durch einen kleinvolumigen (358 cm^3), mit einem Comprex-Druckwellenlader aufgeladenen 4-Taktmotor ersetzt. Dieser hocheffiziente Motor bildete auch die Ausgangsbasis von [7]. Durch die konsequente Anwendung von Leichtbaumaterialien und -technologien wurde die Fahrzeugmasse um 180 kg auf neu 640 kg reduziert. Durch eine völlige Überarbeitung der Fahrzeugform wurde der Luftwiderstandsbeiwert von 0,34 auf 0,25 gesenkt. Durch dieses Massnahmenpaket konnte der Verbrauch gegenüber dem Original-Twingo im NEFZ-Zyklus von 6,7 auf 3,2 l/100km gesenkt werden. Dieser Verbrauch bestätigte auch exakt die rechnerische Verbrauchsprognose der ETH Zürich, die das Projekt auch mit andern Berech-

nungen unterstützte. Dieses Projekt wurde mit dem Innovationspreis **Idee Suisse 1996** ausgezeichnet.

Die HTL-Biel schloss ihr Projekt **Minderungspotential der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs** [9] ab. Das Projekt basierte auf zwei Kleinfahrzeugen, sogenannten *Voiturettes*. Davon war eines mit Ottomotor und eines mit Dieselmotor ausgerüstet. Mit zumeist markt gängigen Komponenten wurde versucht, bei diesen Fahrzeugen das Minderungspotential auszuloten. Beim Fahrzeug mit Benzinmotor (in Klammern die Werte des Diesel getriebenen Fahrzeuges) konnten folgende Verbesserungen nachgewiesen werden: Die Schadstoffemissionen konnten im Schnitt auf 62 % (84 %) der Grenzwerte reduziert werden. Der Kraftstoffverbrauch wurden im FTP 75-Zyklus von ursprünglich 5,88 auf 4,86 l/100 km (4,36 erhöht auf 4,91 l/100 km) gesenkt. Die Lärmemissionen konnten von 81 auf 74 dB (73 auf 68 dB) vermindert werden. Diese Verbesserungen wurden durch den Einbau folgender Änderungen an den Versuchsträgern realisiert: Einbau eines geregelten 3-Weg-Katalysators (Ottomotor), Einsatz eines Oxidationskatalysators und eines Partikelfilters (Dieselmotor), Einsatz eines Schaltgetriebes an Stelle des Variomaten und Teilkapselung des Motorraumes.

GÜTERVERKEHR

Das Projekt des Planungsbüros JUD untersucht die technischen, betrieblichen und ökologischen Aspekte beim **Einsatz bimodaler Gütertransportsysteme** [10]. Im Rahmen eines fünfjährigen Versuches betreiben dabei die SBB zusammen mit der MIGROS einen KOMBIRAIL-Transport. Ab dem Verteilzentrum Neuendorf werden Güter bimodal nach Genf, St. Margrethen, ins Wallis und ins Tessin transportiert. Die bisher gewonnenen Erfahrungen und Resultate zeigen aus der Sicht der MIGROS, dass sich der Ein-

satz des KOMBIRAIL im Alltag bewährt. Aus der Sicht der SBB kann der KOMBIRAIL problemlos bewältigt werden. Nachteilig wirkt sich für die SBB aus, dass der KOMBIRAIL nicht in den Einzelwagenladungsverkehr integriert werden kann. Von der ökologischen Seite aus betrachtet, können durch den Betrieb dieser 10 KOMBIRAIL-Einheiten jährlich ca. 100'000 l Diesel eingespart und die Emissionen können um 165 t CO₂ und 7 t NO_x reduziert werden.

NEUARTIGE TECHNOLOGIEN, SYSTEME UND GRUNDLAGEN

Die Hauptstudie **Schnellbahn SWISSMETRO** der EPFL [11] wurde in Zusammenarbeit mit der ETHZ fortgesetzt. Innerhalb dieses interdisziplinären Grossprojektes erforschen zwei Teilprojekte Energiefragen. Das Teilprojekt Elektromechnik befasst sich mit den Aspekten des Antriebes (der Energieverteilung, der berührungslosen Energieübertragung, dem Auftrieb und der Führung). Ein erstes Modell mit einem Antrieb von ca. 4 kW Leistung wird zur Zeit realisiert. Die Resultate dieser Arbeiten werden auch beim andern Fahrzeugkonzepten, z.B. dem SERPENTINE-Fahrzeug, angewendet. Das aerodynamische Teilprojekt studiert

den Einfluss des Vakuums, der Tunnel- und der Fahrzeugdimension auf den Fahrwiderstand und betrachtet auch die Probleme der Vakuumherzeugung, dem Wiederaufbau des Druckes sowie des Umweltschutzes. Die Arbeiten an der Hauptstudie SWISSMETRO werden z.Z. noch fortgesetzt.

Die Studie **Umweltindikatoren im Verkehr** [12] der INFRAS, vergleicht, basierend auf dem Ökoinventar Transporte [12], den Energieverbrauch und die Umweltbelastung der verschiedenen Verkehrsmittel und -träger des motorisierten Individualverkehrs und des

Güterverkehrs. Bezogen auf den Personenkilometer schneiden, in Bezug auf die Energie, leichte und / oder Verkehrsträger mit einem guten Besetzungsgrad am besten ab. Gleichwohl überrascht, dass ein Personenkilometer bei einem Langstreckenflug im Durchschnitt

weniger Energie benötigt als einer in einem Personewagen. Beim Güterverkehr schneiden von den in der Schweiz anwendbaren Systemen erwartungsgemäss der Wagenladungsverkehr, der Kombiverkehr und die "rollende Autobahn" am besten ab.

Nationale Zusammenarbeit

Mit den angrenzenden Programmen E2000 - Ressort Treibstoffe, "DIANE 6 - Energiesparender und umweltschonender Güterverkehr" und dem nationalen Forschungsprogramm NFP41 "Verkehr und Umwelt" hat sich eine konstruktive und enge Zusammenarbeit eta-

bliert. Auch die Zusammenarbeit von verschiedenen Projektteams und Instituten hat sich weiter verstärkt. Durch diese Kooperationen ergeben sich wertvolle Synergien und weitere Möglichkeiten und Chancen, sowohl in der Forschung als auch bei der Umsetzung.

Internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten des Bereiches Verkehr sind international breit abgestützt:

- Aktive Mitarbeit in den Annexen *Informations, Impacts* und *Lightweight Materials* des *Implementing Agreement Electric Vehicle* der IEA.
- Aktive Mitarbeit in verschiedenen Arbeitsgruppen und in der Projektleitung des *Programme for Collaboration between CEC and National Programmes on Electric Vehicles in Europe*, einem *JOULE II*-Forschungsprogramm der EU.
- Aktive Mitarbeit bei der Erarbeitung des IEA-Programmes *Advanced Road Vehicle Technology*.

- Die Schweiz beeinflusst massgeblich die zurzeit laufenden Normierungsarbeiten im Bereich der Ladeinfrastrukturen.

Mit dem Programm *Car of Tomorrow* und weiteren EU-Programmen hat 1996 ein enger Erfahrungsaustausch stattgefunden. An diversen Tagungen im In- und Ausland wurde über die Aktivitäten in der Schweiz berichtet. Viele ausländische Experten pflegen einen regen Kontakt mit den Forschungsstätten. Mehrere Projektnehmer konnten auch mit ausländischen Partnern zusammen gemeinsame Vorhaben starten.

Transfer in die Praxis

Die Umsetzung der Forschungsergebnisse wird durch die beiden nachfolgenden P&D-Programme stark unterstützt. Die in diesen Programmen laufenden Flottenversuche sowie parallele Messprojekte, stellen der Forschung ein praxisnahes Testfeld zur Verfügung. Die dabei erworbenen Resultate fliessen direkt wieder in die Forschung zurück respektive werden zur Verbesserung der Produktequalität angewendet. So gelang es einzelnen Projektnehmern bereits, ihr *Know-how* oder ihre Resultate der Forschungsarbeiten im In- und Ausland zu vermarkten. Die Firma BRUSA, Gams, z.B. verkauft wesentliche Komponenten für Elektromobile an die führenden Autohersteller. Die Firma HORLA-

CHER, Möhlin, entwarf im Auftrag eines thailändischen Investors den Prototypen eines energieeffizienten Elektromobil-Coupés, einem Fahrzeug der gehobenen Mittelklasse. Dieses Coupé war am Autosalon in Genf eine der wesentlichen Novitäten und soll nun in einer Serie von 100 Stück gefertigt werden. Ein Lizenznehmer der gleichen Firma betrieb an der Leipziger Automesse mit einer vielbeachteten und rege genutzten Flotte von 6 Leicht-Elektromobilen *SAXI* einen Pendel-Taxidienst [2]. Auch dieses, für fünf Passagiere ausgelegte, Elektrotaxi ist das direkte Resultat der Forschung und eines weiteren P&D-Projektes.

P&D - Programm "Leichtmobile"

Urs Muntwyler, Programmleiter P&D

Das seit 1992 laufende P&D-Programm "Leichtmobile" hat entsprechend dem Aktionsplan 1993-1997 zwei Schwerpunkte:

- Flottenversuche mit Schwergewicht auf dem "Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio"
- Entwicklung hocheffizienter Komponenten und Technologien für Leicht-Elektromobile sowie energieeffiziente Nischenfahrzeuge

Mit über 2'500 eingelösten Elektrofahrzeugen ist die Schweiz eine der weltweit führenden Nationen. Die fünfjährige Stagnation der Verkaufszahlen im Bereich Elektrofahrzeuge konnte 1996 überwunden werden. Zur Steigerung der Zulassungen haben neben dem Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio sowie den 8 Partnergemeinden neue attraktivere Modelle der Fahrzeuganbieter geführt. Den Markt belebt haben vor allem die zwei in der Schweiz entwickelten Nischenprodukte, das dreirädrige High-Tech-Elektro-

fahrzeug *TWIKE* und das Hochgeschwindigkeits-Elektrofahrrad *FLYER* [18, 20, 21]. Für die Entwicklung des Flyer wurde die Firma BKTech, Burgdorf, mit dem Preis für Jungunternehmer der DE VIGIER-Stiftung ausgezeichnet. Beide Fahrzeuge wurden bzw.

werden noch im Rahmen von P&D-Projekten unterstützt. Dabei interessieren nicht nur die technischen Aspekte, sondern auch die Benutzer, die Art der Benutzung und das Energiesparpotential.

GROSSVERSUCH MIT LEICHT-ELEKTROMOBILEN IN MENDRISIO

Der vom BEW initiierte "Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen (LEM) in Mendrisio" ist zur Zeit der weltweit grösste Flottenversuch mit Elektrofahrzeugen. Dabei soll der sinnvolle Einsatz von LEM im Alltag und ihre Integration in zukünftige Mobilitätskonzepte demonstriert und evaluiert werden. Mit dem Versuch sollen auch Fördermassnahmen für den Einsatz dieser energieeffizienten und umweltfreundlichen Fahrzeuge entwickelt und getestet werden. Seit dem Start im Juni 1995 wurden über 100 Gesuche gestellt und bis Ende 1996 wurden 67 Leicht-Elektromobile eingelöst. Innerhalb dieses Projektes wurden ca. 50 verschiedene Fördermassnahmen eingeführt, damit eine Kundschaft das Produkt LEM aufnimmt beziehungsweise zuerst überhaupt kennenlernt. Die Wirksamkeit dieser Massnahmen und deren Zusammenspiel werden durch ein separates Forschungsprojekt evaluiert [14-17]. Wichtigste Massnahme ist natürlich die Subvention der zur Zeit noch sehr teuren Fahrzeuge. Andere sehr wichtige Massnahmen zielen darauf ab, die Berührungängste zum LEM abzubauen. Einen wesentlichen Aspekt stellt auch die Kundenbetreuung dar. So wird verständlich, weshalb in den einzelnen Versuchsgebieten verschiedene Fahrzeugtypen die Verkaufslisten anführen.

Damit ein LEM-Fahrzeugtyp subventionsberechtigt ist, muss er bei der Energieverbrauchsmessung auf dem Prüfstand der HTL-Biel bestimmte Verbrauchswerte erfüllen [19]. Diese Prüfstandmessungen werden mit den Praxiswerten in Mendrisio verglichen. Dabei zeig-

ten sich noch überraschend viele Verbesserungsmöglichkeiten in technischer Hinsicht, aber auch für den Betrieb dieser Fahrzeuge.

In acht Gemeinden der Schweiz werden parallel zum Versuch in Mendrisio kleinere Projekte durchgeführt. Dadurch soll die Umsetzbarkeit der Resultate von Mendrisio auf die Deutsch- und Westschweiz überprüft und die Resultate breiter abgestützt werden. Jedes Projekt hat dabei, neben den beschränkten LEM-Subventionen, einen eigenen Versuchsschwerpunkt:

- Ittigen (BE): Mobilitätsberatung und Vermietung von Leicht-Elektromobilen in der Agglomeration Bern
- Wohlen (BE): Agglomerations- und Pendlerverkehr in einer Streusiedlung mit einer schlechten Erschliessung durch öffentliche Verkehrsmittel
- Riehen (BS): Leicht-Elektromobile als Ersatz für ein herkömmliches Fahrzeug
- Muttenz (BL): Agglomerations- und Regionalverkehr mit Leicht-Elektromobilen
- Wil (SG): Elektrobusse im Einsatz in der Regionalbuslinie und Ansprechstelle für LEM-Benutzer
- Monthey (VS): Einführung des neuen Mobilitätssystems Véhicule Individuel Public (VIP) ab Mitte 1997 im Rahmen eines P&D-Projektes
- Sion (VS): Integration von Leicht-Elektromobilen in der Stadt Sion

ENTWICKLUNG HOCHEFFIZIENTER KOMPONENTEN UND TECHNOLOGIEN FÜR LEICHT-ELEKTROMOBILE SOWIE ENERGIEEFFIZIENTE NISCHENFAHRZEUGE

Die weltweiten Aktivitäten im Bereich Elektrofahrzeuge haben zu einer Zunahme von Projekten im Komponenten-Bereich und im Bereich der energieeffizienten Nischenfahrzeuge geführt. Die Schweizer Projektnehmer haben im internationalen Vergleich eine gute Position.

In enger Abstimmung mit dem Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung im Verkehr" wurden für 1997 weitere Projekte bewilligt. Ein neues Thema sind schnelle *power assisted* (PAS)-Elektrofahrzeuge wie *Velocity*, *Flyer*, *ULM* und *TWIKE*. In diesem Bereich sind Schweizer Konstrukteure und Hersteller führend. Weiter erfolgt nun im Bereich Komponenten die Transformation von Prototypherstellern zu Zulieferern der Automobilindustrie. Dabei kommt den Aspekten Qualität, Fertigungskosten, Lieferfähigkeit und Termintreue noch vermehrt Beachtung zu.

Ein spezieller Schwerpunkt der Schweizerischen P&D-Aktivitäten ist der "Sicherheit von Leichtmobilen" gewidmet. Die international renommierte Arbeitsgruppe für Unfallmechanik, bestehend aus Forschern der Universität und ETH Zürich, der Ingenieurschulen Biel und Winterthur und der Privatwirtschaft, hat dieses Jahr mehrere P&D-Projekte mit Erfolg abgeschlossen. Die öffentlich grösste Resonanz hatte der Offset-Crash einer Leichtbau-Struktur der Firma Horlacher mit einem Renault Laguna. Mehrere hundert Automobilfachleute aus der ganzen Welt verfolgten diese spektakuläre Demonstration im neuen Dynamic Test Center (DTC) der Ingenieurschule Biel. Die Erkenntnisse der Arbeitsgemeinschaft, wie leichte Fahrzeuge auch sicher gebaut werden können, werden von der Industrie mit grossem Interesse verfolgt und in Serienprodukten umgesetzt.

INFORMATION

Mit dem "Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio" ist das weltweite Interesse der Fachleute und der Schweizer Öffentlichkeit an Leicht-Elektromobilen und deren Einsatz stark gestiegen. Dafür dienen auch die *LEM-News*, welche 1996 in je drei Ausgaben auf deutsch und englisch erschienen sind. Viele Fachleute aus dem Ausland informieren

sich direkt in der Schweiz über die neuesten Aktivitäten und Projekte. Aufgrund der begrenzten Mittel musste die Informationsarbeit konzentriert und rationalisiert werden. An Tagungen und Veranstaltungen im In- und Ausland wurden die Resultate der Projekte sowie des Grossversuches mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio publiziert.

BEWERTUNG UND AUSBLICK P&D

Der "Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio" und die Aktivitäten in den Partnergemeinden laufen plangemäss. Am 1. Juli 1997 startet die 2. Phase des "Grossversuches mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio". Schwerpunkt der 2. Phase werden die Qualität der Fahrzeuge, ein stärkeres Engagement der Anbieter und die vergleichenden Energieverbrauchsmessungen sein. Für 1997 wird das erste serienmässige

Hybrid-Fahrzeug erwartet. Dies wird interessante Vergleiche mit Elektro- und konventionellen Fahrzeugen ermöglichen. Im Technologiebereich stehen verbesserte Antriebs- und Energiemanagements und optimierte Ladeverfahren im Vordergrund. Mittelfristig wird die Umsetzung der in der Forschung gewonnenen Resultate von Kunststoff-Leichtbautechnologien dazukommen.

Fazit und Ausblick

Die beträchtlichen Erfolge, die mehrere Projektteams des Bereiches Verkehr 1996 errungen haben, sind Resultat engagierter, wissenschaftlicher Arbeit und auch eine Folge der guten Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Projektnehmern und auch zwischen den verschiedenen Programmen.

Diese Faktoren stellen auch für künftige Erfolge eine wichtige Voraussetzung dar - Garant sind sie jedoch nicht. Die Umsetzbarkeit der Problemlösungen erlangt in der aktuellen wirtschaftlichen Situation eine noch erhöhte Bedeutung. Das grosse Know-how, die vorhandenen Strukturen und der Teamgeist stellen auch für die Zukunft ein erfolgsträchtiges Kapital dar.

Liste der Projekte

- [1] M. HORLACHER, Möhlin: *Modultec - Modultechnologie für Leichtmobile* (JB) / ENET 9654961
- [2] T. Efler, HORLACHER, Möhlin: *KOLIBRI/SAXI Leicht-Elektrofahrzeuge* (SB) / ENET 9600393
- [3] W. Janach, HTL-Luzern: *Innovatives Leichtbauverfahren für Fahrzeugstrukturen* (JB) / ENET 9658769
- [4] M. Chastonay, HTL-Luzern: *Ecomotor für Leichtmobile* (Leicht Hybrid II) (JB) / ENET 9300271
- [5] L. Guzzella, ETH-Zürich, PALOS: *ein teillastoptimales Antriebssystem für Leichtfahrzeuge* (JB) / ENET 9655285
- [6] P. Dietrich, ETH-Zürich: *Ökomobil Hybrid III* (SB) / ENET 8900360
- [7] B. Kohler, WENKO, Burgdorf: *SAVE, Small Advanced Vehicle Engine* (JB) / EBET 9655282
- [8] U. Wenger, WENKO, Burgdorf: *SmILE, Small, Intelligent, Light, Efficient Pressemappe Greenpeace, Pressemappe WENKO*
- [9] J. Czerwinski, HTL-Biel: *Minderungspotential der Schadstoffemissionen und des Treibstoffverbrauchs* (SB) / ENET 9400291
- [10] S. Schneider, JUD, Zürich: *Einsatz bimodaler Gütertransportsysteme* (JB) / ENET 9401131
- [11] M. Jufer, EPF-Lausanne: *Swissmetro* (JB) / ENET 8900655
- [12] M. Maibach, INFRAS, Zürich: *Umweltindikatoren im Verkehr* (SB) / ENET 9657627 • *Ökoinventar Verkehr* (SB)
- [13] D. Jaggi, ESORO, Glattbrugg: *Twin Trak* (JB) / ENET 9655284
- [14] U. Schwegler, Fischingen: *Grossversuch mit Leicht-Elektromobilen in Mendrisio* (JB) ENET 9653783
- [15] M. Simon, POLYQUEST, Bern: *Bekanntheits- und Kaufwiderstandsanalyse* (SB) • *Bekanntheit und Beurteilung der LEM, des Grossversuchs, der Fördermassnahmen sowie Ergebnisse zu den Partnergemeinden* (SB)
- [16] U. Haefeli, IKÖ, UNI-Bern: *Begleituntersuchung LEM Ittigen* (JB) ENET 9655205
- [17] E. Meier, ABAY & MEIER, Zürich / M. Simon, POLYQUEST, Bern: *Erfolgskontrolle der Fördermassnahmen* (SB) • *Zwischenbericht erste Versuchsphase* (JB)

- [18] M. Kutter, C-T BIKE, Basel: *Demonstration und Auswertung von 20 Velocity-Elektrovelos* (SB) / ENET 9600152
- [19] K. Meier, HTL-Biel: *Energieverbrauch von Elektrofahrzeugen* (JB) / ENET 9655905
- [20] A. Iten, SCHMIDHAUSER, Neukirch: *Fahrzeugelektronik für Elektromobile* (SB) / ENET 9600123
- [21] F. Walz, UNI- & ETH-Zürich: *Sicherheitsverbesserung für bestehende Fahrzeugmodelle* (SB) / ENET 9600129
- [22] M. Pulfer, BEW, Bern: *Forschungskonzept 1996 bis 1999 • Jahresberichte der Projektnehmer 1996*
- [23] K. Vetter, JOSEF MEYER, Rheinfelden: *ACTS-Tragwagen Typ Scans* (JB) / ENET 9658067
- [24] F. Stucker, Bachenbülach: *Versuch mit Biofahrzeugen* / ENET 9657429
- [25] F. Walz, UNI- & ETH-Zürich: *Entwicklung eines leichten Sicherheits-Sitzes für Leichtmobile • Präsentationsmodell für Crash-Test mit Leichtmobilen*
- [26] Ch. Häuselmann, BK TECH: *Elektrobike "NEW Flyer" • Elektrobike Flyer*
- [27] A. Fuchs, HTL-Bern: *Mechanische Muskelkraft-Elektro-Hybridisierung*
- [28] SCHMIDHAUSER/GLUR/TWIKE: *Erhöhung der Lebensdauer der TWIKE III-Akkus*
- [29] A. Mathoy, BRUSA, Gams: *Verfolgung Normen für Elektrofahrzeuge*
- [30] R. Cavegn, TCS-Zürich: *Informationsprojekt "Lean Mobilität"*
- [31] W. Blum, MOBILE: *Regionale E-Mobil-Kontaktveranstaltungen • Basisinformation über Elektromobile*
- [32] INFEL: *Elektromobile erfolgreich verkaufen*

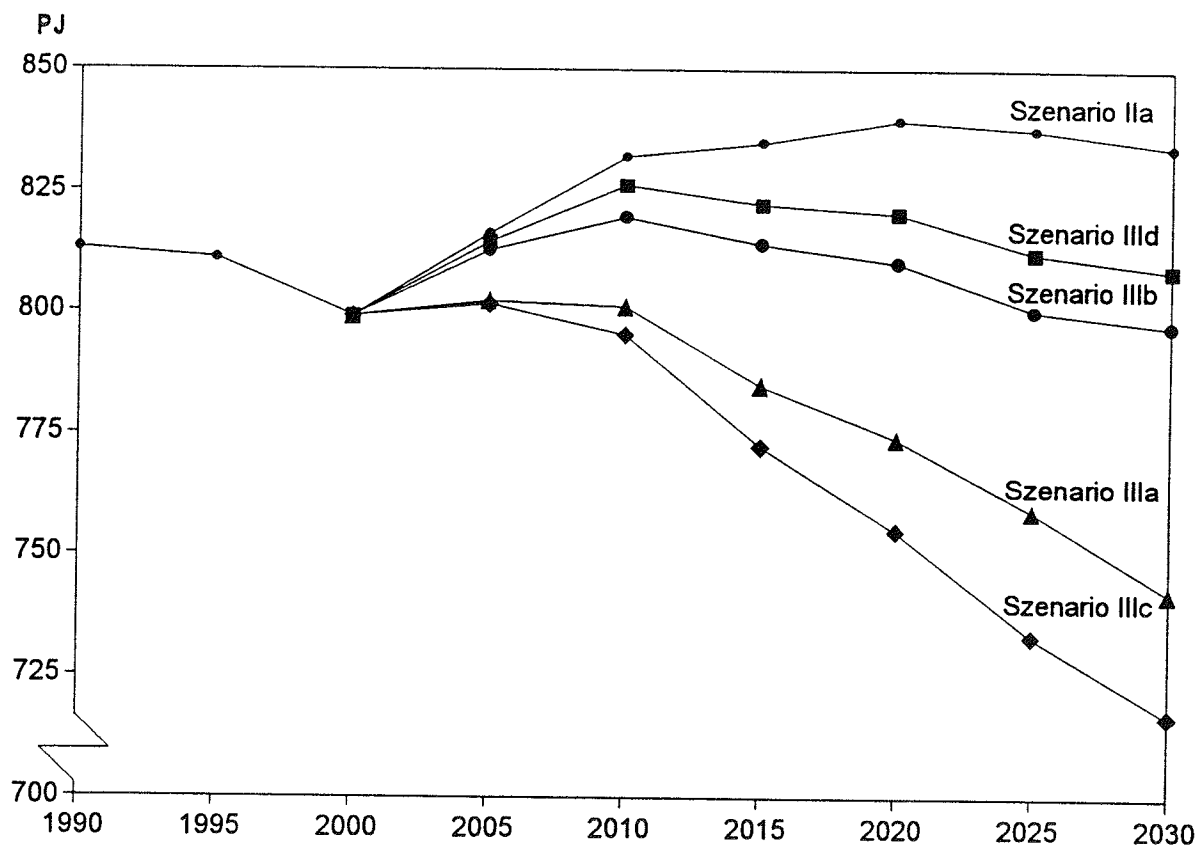
(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Übersichtsbericht
zum Forschungsprogramm 1996

Ruedi Meier



Verbrauch der Endenergie nach verschiedenen Szenarien

- Szenario II: a) Trendentwicklung inklusive Energiegesetz
Szenario III: a) Energie-Umwelt-Initiative, b) Solar-Initiative, c) Energie-Umwelt-Initiative / Solar-Initiative kombiniert, d) Halbe Solar-Initiative

Schwerpunkte

Ein Schwerpunkt des Programms "Energiewirtschaftliche Grundlagen - EWG" im Jahr 1996 lag in der Vertiefung und Weiterführung der Energieperspektiven. So konnten die energetischen, umweltmässigen und ökonomischen Auswirkungen der Energie-Umwelt-Initiative und der Solarinitiative analysiert werden. Zudem sind auch die ökonomischen Rückkopplungen dieser Initiativen untersucht worden. Im Bereich Daten sind zwei Projekte ("Indikatoren zur Beurteilung der kantonalen Energiepolitik" und "Energieverbrauch in Bürogebäuden") an die Hand genommen worden. Mehrere Projekte befassen sich mit den Auswirkungen von energiepolitischen Massnahmen: Ein EU-Projekt analysiert die Erfahrungen von energiepolitischen Programmen im internationalen Kontext. Eine weitere Studie zeigt die quantitativen Beschäftigungseffekte von Energie 2000 auf. Alle diese Arbeiten gehören mit zu den Grundlagen für energiepolitische Entscheide.

Die Projekte "Steuererleichterungen", "Mieter-/Vermieterverhältnis" und "Energie-Sparaktionen" stehen

vor dem Abschluss. Fragen des Technologietransfers im Energiebereich konnten im Rahmen einer begleitenden Evaluation untersucht werden.

Mit dem Projekt "Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage" wurde erstmals auf einer breiten Datengrundlage der Preismechanismus in diesem Sektor dargestellt. Im Projekt "*Tarification dynamique des utilisateurs industriels*" ist in einem ersten Schritt eine Auslegeordnung der Tariffragen im Industriebereich vorgenommen und ein Vorschlag für eine Neuorientierung der Tarifierung im industriellen Sektor unterbreitet worden. Beide Arbeiten wurden in einer gut besuchten Veranstaltung diskutiert.

Das Projekt "Vergleichende Untersuchung von Grossunfällen im Energiebereich" wurde vorläufig abgeschlossen.

Für die Jahre 1997/1998 ist eine ausführliche Projektliste erstellt worden.

Anvisierte Ziele 1996

Die im Bericht "EWG - Zukünftige Schwerpunkte" vom März 1995 anvisierten Ziele sind nach wie vor gültig. Die Entscheidungsgrundlagen für die Energiepolitik sind zu verbessern. Gleichzeitig ist das Verhalten von Verbänden, Organisationen und einzelnen Individuen zu untersuchen. Zuhanden der verschiedenen Akteure sollen konkrete Handlungsempfehlungen formuliert werden.

Mit der Vertiefung der Energieperspektiven, insbesondere der Analyse der Energie-Umwelt-Initiative sowie der Solar-Initiative konnten wesentliche Ziele des Jahres 1996 erreicht werden. Über die wirtschaftlichen Auswirkungen sind gut fundierte Berichte erstellt worden. Ebenfalls sind die vertieften Erkenntnisse über die Wirkung einzelner Massnahmen erfreulich. Offen sind hingegen noch verschiedene Fragen zur künftigen Organisation der Energiemärkte.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

DATEN

Mit der Studie **Indikatoren zur Beurteilung der kantonalen Energiepolitik** [1] sollen die Grundlagen für die kantonale Energiepolitik verbessert werden. So werden Indikatoren für die verschiedenen Aktionsbereiche (u.a. Gebäudehülle, Industrie, Verkehr) formuliert. Die Transparenz für die einzelnen Bereiche wird erhöht und ein Vergleich zwischen den einzelnen Kantonen erleichtert. In einem weiteren Schritt sind die Wirkungszusammenhänge von energiepolitischen Massnahmen auf kantonaler Ebene vertieft anzugehen (Einstieg in Erfolgskontrollen).

Die Gesamtstudie **Energieverbrauch in Bürogebäuden** [2, 3] will die Energieverbrauchsstruktur von 100 typischen Dienstleistungsgebäuden erforschen. Dabei

sollen die massgebenden Faktoren der Verbrauchsveränderungen in den letzten Jahren untersucht werden. Neben den technischen Aspekten wird gleichzeitig den wirtschaftlichen und sozialen Gründen nachgegangen. Mögliche Einflussfaktoren sollen erfasst und beurteilt werden. Ebenfalls besteht die Absicht, u.a. die Datengrundlage für den Energieverbrauch im tertiären Sektor zu verbessern. Mit der Studie sollen Grundlagen für zukünftige Massnahmen für ein effizienteres Stromsparen geschaffen werden. Die sozioökonomischen Fragen werden von der ETH-Zürich, Forschungsgruppe Energieanalysen, durchgeführt und vom PSEL unterstützt.

PERSPEKTIVEN

Die Koordination und Zusammenfassung der Modellierungs- und Perspektivarbeiten [4] sind eine notwendige

Voraussetzung für die praktische Nutzung dieser umfangreichen Arbeiten.

Die Erarbeitung von **Energieperspektiven (ökonomische Rückkoppelungen [15]; Perspektiven des Energieverbrauchs in den Haushalten [5], in der Industrie [12], in Dienstleistungsbetrieben [11] und im Verkehr [8])** haben entscheidende Fortschritte gemacht. So konnten die energetischen und umweltmässigen Auswirkungen der Energie-Umwelt-Initiative und der Solar-Initiative im Detail untersucht werden. Die Energie-Umwelt-Initiative senkt den fossilen Energieverbrauch gegenüber dem Referenzszenario – "beschlossene Massnahmen" und "beabsichtigte Massnahmen" (Energiegesetz) – bis 2010 um knapp 5 %. Im Jahre 2030 sind es – aufgrund wesentlich höherer Abgaben – über 14 %. Die Elektrizität wird im Jahr 2010 um 2 %, im Jahr 2030 um knapp 8 % vermindert. Die CO₂-Emissionen gehen bis im Jahr 2030 um knapp 20 % zurück.

In der Studie **Solar-Initiative: Analyse der Auswirkungen [14]** wird von einer Abgabe von maximal 0,5 Rp. pro Kilowattstunde auf allen nicht erneuerbaren Energieträgern ausgegangen. Es werden damit maximal 900 Mio. Franken Einnahmen erzielt, die mindestens zur Hälfte zur Nutzung der Sonnenenergie verwendet werden sollen. Der Rest wird zur Förderung der rationellen Energieverwendung eingesetzt. Der Einsatz der Fördermittel vermindert die fossilen Energieträger bis 2010 um 3 %, bis 2030 um mehr als 9 % gegenüber der Referenzentwicklung. Die Minderungsraten bei der Elektrizität betragen minus 0,9 % bis minus 1,7 %. Die CO₂-Emissionen nehmen bis 2030 um 3 Mio. Tonnen ab.

Die kombinierte Wirkung der Energie-Umwelt-Initiative und der Solar-Initiative ergeben eine Verbrauchsminderung der fossilen Energieträger gegenüber der Referenzentwicklung bis ins Jahr 2010 um beinahe 7 %, bis ins Jahr 2030 um 21 %. Die Elektrizität geht um gut 2 % bzw. 9 % zurück. Die CO₂-Emissionen nehmen gegenüber 1990 um 25 % (d.h. noch 33,5 Mio. Tonnen) ab. Bei einer Annahme der Energie-Umwelt-Initiative und der Solar-Initiative würden die Beiträge der regenerativen Energieträger (ohne Wasserkraft, inkl. Biomasse in Kehrlichtverbrennung) auf 9 % ansteigen.

Das Projekt **Analyse und Bewertung des Elektrizitätsangebots [6]** zeigt in zwei Varianten auf, wie die nach dem Jahr 2010 mit der Stilllegung von Kernkraftwerken und dem Auslaufen von Bezugsrechten auftretenden Deckungslücken angegangen werden können: Die Variante 1 deckt die Lücke mit Kernenergie und neuen Bezugsrechten, die Variante 2 durch die Ausschöpfung der Wärme-Kraft-Koppelungspotentiale und fossil-thermische Kraftwerke.

Die wirtschaftlichen Auswirkungen der Szenarien IIa (Energiegesetz) und IIb (CO₂-Abgabe) [7] ziehen einen positiven Wachstumsimpuls nach sich, der vor allem aufgrund der Umlenkung der Nachfrage aus dem Ausland ins Inland resultiert. Die Nachfrage nach vorwiegend importierter Energie sinkt, während die Nachfrage nach hauptsächlich im Inland produzierten Investitionsgütern steigt. Der Zuwachs der Brutto-Wertschöpfung liegt zwischen 350 Mio. und einer Mia.

Franken. Die Beschäftigung weist ein Plus von knapp 4'000 bis maximal 8'000 Arbeitsplätzen aus. Der Preisindex erhöht sich um maximal 0,5 %.

Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Energie-Umwelt-Initiative [17] sind einerseits von der Universität Bern und andererseits von Ecoplan mit je zwei unterschiedlichen Modellen analysiert worden:

Die Effekte auf die Produktions- und Dienstleistungssektoren sowie auf den Kapitalstock sind insgesamt gering. Produktionszuwächse treten insbesondere in den Bereichen Elektrotechnik, Maschinenbau, Banken und Versicherungen auf (maximal 2 %). Rückgänge sind bei den energieintensiven Branchen in der Energiewirtschaft, den Branchen Textil, Papier, Chemie, Steine und Erden und im Transportwesen zu erwarten. Das Arbeitsvolumen steigt um ca. 16'000 Arbeitsplätze bis ins Jahr 2025. Es werden externe Kosten zwischen 0,9 Mrd. bis ca. 2,5 Mrd. Franken vermieden. Dank der gleichmässigen Pro-Kopf-Rückerstattung an die Haushalte findet eine leichte Umverteilung zugunsten der ärmeren Haushalte statt. Die Autoren folgern, dass erhebliche Energieeffekte eintreten (z.B. Reduktion der fossilen Energieträger um 30 % im Jahr 2030), die gesamtwirtschaftlichen Effekte aber sehr klein seien. Die Studien zeigen auch, dass die Initiative einen beträchtlichen Strukturwandel mit Verlierer- und Gewinnerkreisen auslösen. Hinzuweisen ist auch auf die Unsicherheiten der Modellrechnungen.

Analysiert wurde das **Export- und Produktionsverhalten der Schweizer Industrie bei einer Umsetzung der Energie-Umwelt-Initiative (Perspektiven des Energieverbrauchs; ökonomische Rückkoppelungen [13])**. Es zeigte sich dabei, dass kurzfristig noch Sparmassnahmen ohne Kostenfolgen möglich wären. Mittel- und längerfristig könnte ein technologisches Sparpotential mit Kostenfolgen ausgeschöpft werden, das allerdings bei energieintensiven Unternehmungen nur wenige Prozentpunkte beträgt. Preisüberwälzungen bei zusätzlichen Kosten wären nicht realistisch. Eigentliche Standortverlagerungen ins Ausland sind aber nicht abzusehen. Allenfalls könnten Entscheide bei Töchtern internationaler Firmen zu Ungunsten der Schweiz gefällt werden. Mit der Energie-Umwelt-Initiative würde die Tendenz der Verwendung alternativer Produkte mit weniger Energie gefördert. Die Autoren schliessen, dass sich bei der vorgesehenen Art der Abgabe die Auswirkungen im engen Rahmen halten würden. Gesamthaft gesehen wäre die Existenz der Industrie nicht gefährdet, der Strukturwandel würde aber beschleunigt. Der Vollzug der vorgesehenen Ausnahmeregelung zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit (max. 1 % Nettobelastung) wird als machbar bezeichnet.

Die wirtschaftlichen Auswirkungen der Solar-Initiative - Analyse der Auswirkungen [14] ziehen eine positive Veränderung nach sich, wobei die Zunahme der inländischen Produktion, des Exportes und der Beschäftigung unter einem Prozent liegen. Bei den energieintensiven Branchen wird ein leichter Nachfragerückgang festgestellt. Positive Auswirkungen sind für die Hersteller- und Zulieferbranchen der Solarenergie und der Systeme für rationelle Energieverwendung zu

- [12] W. Baumgartner, BASICS, Zürich: *Perspektiven des Energieverbrauchs für die Industrie*. (SB)
- [13] CH. Muggli, BASICS, Zürich: *Perspektiven des Energieverbrauchs; Ökonomische Rückkopplungen*. (SB)
- [14] W. Spillmann, E. BASLER, Zollikon & A. Müller, ECOPLAN, Bern: *Solar-Initiative: Analyse der Auswirkungen*. (SB)
- [15] A. Müller, ECOPLAN, Bern: *Energieperspektiven: ökonomische Rückkoppelungen*. (SB)
- [16] F. Walter, ECOPLAN, Bern: *Method for integrated evaluation of benefits, costs and effects of Programms for promoting energy conservation (MEC)*. (JB)
- [17] G. Stephan, & P. Previdoli, UNI-Bern: *Die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Energie- Umwelt- Initiative: Ergebnisse eines dynamischen berechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodells*. (SB)
- [18] W. Ott, ECONCEPT, Zürich: *Energie 2000: Innovations- und Beschäftigungsimpulse*. (SB)
- [19] W. Ott, ECONCEPT, Zürich & IPSO, Dübendorf: *Evaluation der Steuererleichterungen für Massnahmen zur rationellen Energieverwendung und zur Nutzung erneuerbarer Energie*. (JB)
- [20] E.O. GRAF, Basel: *Energiesparaktionen (ESA)*. (JB)
- [21] P. Marti, METRON, Brugg: *Niedrigenergiehäuser Mieter/Vermieterverhältnis*. (JB)
- [22] G. Pillet, ECOSYS, Genève: *Tarification dynamique des utilisateurs industriels, première phase*. (SB)
- [23] P. Rieder, ETH-Zürich: *Studie zur Relevanz wirtschaftlicher und technischer Zusammenhänge zwischen Energie und Agrarproduktion*. (JB)
- [24] S. Hirschberg, PSI-Villigen: *Vergleichende Untersuchung von Grossunfällen im Energiebereich*. (SB)

(JB) Jahresbericht 1996 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

Organisation de la Recherche et P&D

Les noms des rapporteurs sont indiqués en gras.

Forschungs- und P&D-Organisation

Die Namen der Berichtersteller sind fett geschrieben.

Bereiche Domaines	Bereichsleiter Responsables de domaine	Programmleiter Chefs de programme	
		Forschung / Recherche	P&D
Gebäudesysteme & -hülle Systèmes techniques et enveloppe du bâtiment	Hans-Peter Nützi	Markus Zimmermann	Markus Zimmermann
Haustechnik, HLK Installations CVC	Martin Stettler		
Solararchitektur & Tageslichtnutzung Architecture solaire et éclairage naturel	Walter Luginbühl	Robert Hastings	Robert Hastings
Elektrizität, Geräte Électricité	Rolf Schmitz	Roland Brüniger	Roland Brüniger
Umgebungswärme, WKK Chaleur ambiante, couplage chaleur-force	Fabrice Rognon	Martin Zogg	Fabrice Rognon
Solarwärme Solaire actif	Urs Wolfer	Jean-Christophe Hadorn	Pierre Renaud
Photovoltaik Photovoltaïque		Stefan Nowak	Thomas Nordmann
Holz Énergie du bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli	Christoph-Walter Rutschmann
Übrige Biomasse Autres biomasses	Martin Hinderling	Martin Hinderling	Martin Hinderling
Geothermie Géothermie	Martin Brunner	Harald L. Gorhan	Harald L. Gorhan
Kleinwasserkraftwerke Petits aménagements hydrauliques		Martin Brunner	Hanspeter Leutwiler
Abwärme Récupération de chaleur		Martin Zogg	Martin Brunner
Wind Vent		Martin Brunner	Robert Horbaty
Solarchemie & Wasserstoff Chimie solaire & hydrogène	Alphons Hintermann	Armin Reller	Armin Reller
Feuerung & Verbrennung Combustion		Alphons Hintermann	Alphons Hintermann
Wärmespeicherung Stockage de chaleur		Jean-Christophe Hadorn	Jean-Christophe Hadorn
Kerntechnik & nukleare Sicherheit Technologie et sécurité nucléaires	Christophe de Reyff	Wolfgang Kröger	—
Regulatorische Sicherheitsforschung Recherche réglementaire		Sabyasachi Chakraborty	—
Kernfusion Fusion nucléaire		Stéphane Berthet	—
Akkumulatoren & Brennstoffzellen Piles à combustible & accumulateurs	Léo Dubal	Léo Dubal	Léo Dubal
Verkehr Transports	Martin Pulfer	Martin Pulfer	Martin Pulfer
Leichtmobile Véhicules légers		Martin Pulfer	Urs Muntwyler
Energiewirtschaftliche Grundlagen Économie énergétique	Stefan Hammer	Ruedi Meier	Ruedi Meier

ADRESSES IMPORTANTES / WICHTIGE ADRESSEN

Chefs de Domaine et programme / Bereichs- & Programmleiter:

Daniel Binggeli, Tel: 031 / 322 68 23
Martin Brunner, Tel: 031 / 322 56 10
Christophe de Reyff, Tel: 031 / 322 56 66
Léo Dubal, Tel: 031 / 322 56 44
Stefan Hammer, Tel: 031 / 322 56 24
Martin Hinderling, Tel: 031 / 322 56 42
Alphons Hintermann, Tel: 031 / 322 56 54

Walter Luginbühl, Tel: 031 / 322 56 41
Martin Pulfer, Tel: 031 / 322 49 06
Hans-Peter Nützi, Tel: 031 / 322 56 49
Fabrice Rognon, Tel: 031 / 322 47 56
Rolf Schmitz, Tel: 031 / 322 54 61
Martin Stettler, Tel: 031 / 322 55 53
Urs Wolfer, Tel: 031 / 322 56 39

Die folgende Adresse ist für alle Obgenannten gültig: **BEW, 3003 Bern** – Fax: 031 / 382 44 03

E-mail: vorname.name@bew.admin.ch

L'adresse suivante est valable pour les personnes ci-dessus: **OFEN, 3003 Berne** – Fax: 031 / 382 44 03

E-mail: prénom.nom@bew.admin.ch

Chefs de programme / Programmleiter

Stéphane Berthet
OFES, 3003 Berne
Tel: 031 / 322 99 67 – Fax: 031 / 322 78 54
E-mail: stephane.berthet@bbw.admin.ch

Roland Brüniger
Isenbergstr. 30, 8913 Ottenbach
Tel: 01 / 760 00 66 – Fax: 01 / 760 00 68
E-mail: roland.brueeniger@r-brueniger-ag.ch

Sabyasachi Chakraborty
HSK, 5232 Villigen
Tel: 056 / 310 39 36 – Fax: 056 / 310 39 95
E-mail: chakraborty@hsk.psi.ch

Harald L. Gorhan
EWI, Bellerivest. 36, 8034 Zürich
Tel: 01 / 385 27 33 – Fax: 01 / 385 26 54
E-mail: harald.gorhan@ewi.ch

Jean-Christophe Hadorn
Ch. des Fleurettes 5, 1007 Lausanne
Tel: 021 / 616 28 31 – Fax: 021 / 616 28 31
E-mail: jchadorn@swissonline.ch

Robert Hastings
ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich
Tel: 01 / 633 29 88 – Fax: 01 / 633 10 75
E-mail: hastings@orl.arch.ethz.ch

Robert Horbaty
ENCO, Oristalstr. 85, 4410 Liestal
Tel: 061 / 922 08 04 – Fax: 061 / 922 08 31
E-mail: 101322.3361@compuserve.com

Wolfgang Kröger
PSI, 5232 Villigen
Tel: 056 / 310 27 42 – Fax: 056 / 310 44 11
E-mail: kröger@psi.ch

Hanspeter Leutwiler
ITECO, Postfach, 8910 Affoltern am Albis
Tel: 01 / 762 18 33 – Fax: 01 / 762 18 15
E-mail: iteco@iteco.ch

Ruedi Meier
Bolligenstr. 14, 3006 Bern
Tel: 031 / 633 36 22 – Fax: 031 / 333 24 69

Urs Muntwyler
Postfach 512, 3052 Zollikofen
Tel: 031 / 911 50 63 – Fax: 031 / 911 51 27

Thomas Nordmann
TNC-Consulting, 8708 Männedorf
Tel: 01 / 921 13 14 – Fax: 01 / 921 13 77
E-mail: nordmann@tnc.ch

Stefan Nowak
Waldweg 8, 1717 St. Ursen
Tel: 026 / 494 00 30 – Fax: 026 / 494 00 34
E-mail: stefan.nowak.net@bluewin.ch

Pierre Renaud
PLANAIR, Crêt 108 A, 2314 La Sagne
Tel: 032 / 931 88 28 – Fax: 032 / 931 18 68
E-mail: info@planair.ch

Armin Reller
BTW, Schlachthofstr. 1, 8406 Winterthur
Tel: 052 / 20 09 90 – Fax: 052 / 20 09 91
E-mail: btwag@dial.eunet.ch

Christoph-Walter Rutschmann
VHE, Falkenstr. 26, 8008 Zürich
Tel: 01 / 252 30 70 – Fax: 01 / 251 41 26
E-mail: lignum@access.ch

Markus Zimmermann
EMPA-KWH, 8600 Dübendorf
Tel: 01 / 823 41 78 – Fax: 01 / 821 62 44
E-mail: mark.zimmermann@empa.ch

Martin Zogg
Kirchstutz 3, 3414 Oberburg
Tel: 034 / 422 07 85 – Fax: 034 / 422 69 10
E-mail: martin.zogg@bluewin.ch

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

Centres de distribution pour les rapports annuels et finaux de recherche énergétique
Bezugsorte für Jahres- und Schlussberichte aus der Energieforschung
ENET, Postfach 130, 3000 Bern 16
Tel: 031 / 352 77 56 Fax: 031 / 350 00 05

Éditeur / Redaktor: Corinne Voirol et Léo Dubal, OFEN, 3003 Berne
Distribution / Bezugsquelle: ENET, NovaEnergie

14.03.1997 / 1200.