

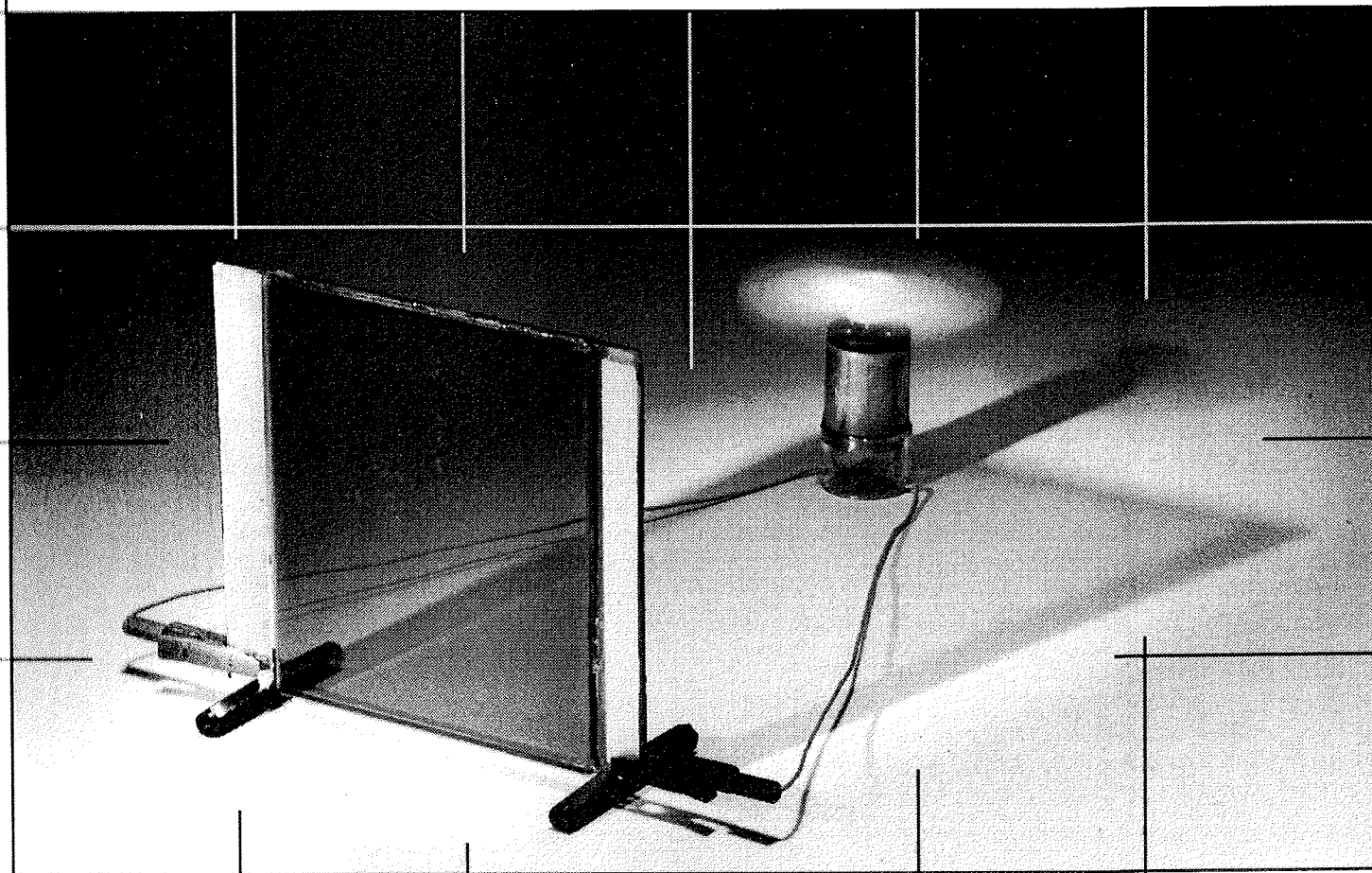


Office fédéral de l'énergie  
Ufficio federale dell'energia  
Bundesamt für Energiewirtschaft

# Recherche énergétique

# Energie-Forschung 1992

Rapports de synthèse des chefs de programme  
Überblicksberichte der Programmleiter



## Eppur si muove . . .



# RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE

1 9 9 2

## ENERGIE - FORSCHUNG

Rapports de synthèse des chefs de programme

Überblicksberichte der Programmleiter

---

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

	Page / Seite
Avant-propos / Vorwort	3
Fortschritte der Energieforschung 1992	4
Rationelle Energienutzung in Gebäuden	7
Rationelle Energienutzung im Verkehr	15
Umgebungs- & Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung	23
Feuerung & Verbrennung	31

<b>Kerntechnik &amp; nukleare Sicherheit</b>	<b>39</b>
<b>Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK</b>	<b>47</b>
<b>Solaire thermique et stockage de chaleur</b>	<b>53</b>
<b>Solararchitektur</b>	<b>61</b>
<b>Photovoltaïque</b>	<b>69</b>
<b>Thermochemie</b>	<b>79</b>
<b>Photochimie</b>	<b>85</b>
<b>Biomasse</b>	<b>91</b>
<b>Geothermie</b>	<b>99</b>
<b>Kontrollierte Kernfusion</b>	<b>103</b>
<b>Elektrizität</b>	<b>107</b>
<b>Piles à combustible</b>	<b>115</b>
<b>Elektrochemie</b>	<b>123</b>
<b>Wasserstoff</b>	<b>131</b>
<b>Sozioökonomie</b>	<b>139</b>
 <b>Annexe / Anhang</b>	
<b>Adresses des chefs de programme / Adressen der Programmleiter</b>	<b>147</b>



## AVANT - PROPOS

La recherche énergétique du secteur public en Suisse se conforme au *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération*. Les dépenses en 1992 ont été de l'ordre de 205 millions de francs. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a pour sa part attribué des mandats de recherche d'un montant total d'environ 45 millions de francs. Cette somme comprend 13 millions pour les installations Pilotes & Démonstration. Plus de la moitié des moyens de l'OFEN sont allés au secteur privé.

La recherche énergétique du secteur public est structurée en 19 programmes de recherche placés chacun sous la conduite d'un chef de programme. Le présent recueil contient les rapports de synthèse des chefs de programme. Il s'adresse à tout ceux qui désire avoir une vue d'ensemble des travaux menés en 1992. Chaque rapport décrit, par domaine, l'ensemble des activités en Suisse, dans la mesure où celles-ci sont connues du chef de programme concerné. L'attention est cependant centrée sur les projets financés en tout ou en partie par l'OFEN.

Les chefs de programmes sont aussi responsables du transfert à la pratique des résultats de recherche. Dans cette tâche, ils sont soutenus par les centres d'information ENET et INFOENERGIE, qui eux, sont rattachés aux centres internationaux (ETDE, CADDET). En outre, ils sont en étroit contact avec les organismes de promotion des installations Pilotes & Démonstration et avec les responsables du programme d'action ENERGIE 2000.

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

*Illustration de la couverture*

*Eppur si muove...* et pourtant elle tourne l'hélice dont le moteur est alimenté par une "cellule de Grätzel". Cette cellule photovoltaïque transparente a été inventée à l'EPF-Lausanne, puis développée dans le cadre du programme Photochimie.

## VORWORT

Die Energieforschung der öffentlichen Hand in der Schweiz richtet sich nach den Leitlinien, wie sie im *Konzept der Energieforschung des Bundes* dargelegt sind. Die Aufwendungen beliefen sich 1992 auf ca. 205 Mio. Franken. Seitens des Bundesamts für Energiewirtschaft (BEW) wurden Forschungsaufträge im Umfang von rund 45 Mio. Franken erteilt. Darin eingeschlossen sind 13 Mio. Franken für Pilot- und Demonstrationsanlagen. Über die Hälfte der BEW-Mittel flossen in die Privatwirtschaft.

Die öffentliche Energieforschung ist in 19 Programme unterteilt, welchen je ein Programmleiter vorsteht. Der vorliegende Band enthält die Überblicksberichte über die einzelnen Forschungsprogramme, verfasst von deren Leitern. Er richtet sich an alle, die sich einen Überblick über die 1992 durchgeführten Arbeiten verschaffen wollen. Die Berichte beschreiben alle auf dem entsprechenden Gebiet durchgeführten Aktivitäten in der Schweiz, soweit sie dem jeweiligen Programmleiter bekannt sind. Im Vordergrund stehen dabei aber diejenigen Projekte, welche ganz oder teilweise durch das BEW finanziert worden sind.

Die Programmleiter sind ebenfalls zuständig für die Umsetzung der Forschungsergebnisse. Sie werden dabei unterstützt durch die Informationszentren ENET und INFOENERGIE, welche auch mit international tätigen Organisationen verknüpft sind (ETDE, CADDET). Zudem stehen sie in engem Kontakt mit den Förderungsstellen für Pilot- und Demonstrationsanlagen und den Verantwortlichen des Aktionsprogramms ENERGIE 2000.

Die Übersichts-Berichte der Programmleiter können - unter Angabe der Quelle - ganz oder teilweise reproduziert werden. Die einzelnen Jahresberichte (JB) oder Schlussberichte (SB) der in den Übersichten erwähnten Energieforschungsprojekten sind bei ENET oder beim betreffenden Programmleiter erhältlich (siehe Adressverzeichnis im Anhang).

*Zur Illustration auf dem Umschlag:*

*Eppur si muove...* und es dreht sich doch, das Windrädchen, angetrieben mit Strom aus der "Grätzel-Zelle". Diese durchsichtige Solarzelle ist an der ETH-Lausanne erfunden und im Programm Photochemie weiterentwickelt worden.

# FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 1992

Gerhard Schriber, Leiter der Sektion Energieforschung, BEW

Anfangs Jahr hat der Bundesrat das "Konzept der Energieforschung des Bundes 1992-1995" [1] genehmigt. Die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE hat in der Folge die von den Programmleitern entsprechend angepassten Forschungsprogramme geprüft, womit die Zielvorgaben für die nächsten Jahre vorgegeben sind. Verstärkt werden die Forschungsaktivitäten insbesondere in den Bereichen rationelle Energienutzung in Gebäuden und im Verkehr, Wärme- und Stromerzeugung durch Sonnenenergie, chemische Speicherung der Sonnenenergie sowie Technikfolge-Abschätzungen. Zudem soll der Marktnähe und der Umsetzung der Forschung mehr Beachtung zukommen.

Die schweizerische Energieforschung der öffentlichen Hand ist im Verlaufe des Jahres von einer international zusammengesetzten Expertengruppe evaluiert worden. Die Ergebnisse [2] sind einerseits hohes Lob für die Qualität und zum Teil Originalität der Arbeiten, andererseits berechnete Kritik, insbesondere dahingehend, dass ein noch zu grosser Forschungsanteil zu weit weg von der industriellen Praxis durchgeführt wird. CORE, Programmleiter und BEW werden zusammen - basierend auf den Empfehlungen der Begutachtung - im Frühjahr 1993 einen Massnahmenkatalog erarbeiten, den es dann umgehend in Angriff zu nehmen gilt.

Die für 1992 postulierten Ziele der einzelnen Forschungsprogramme sind fast durchwegs erreicht worden. Es ist aber schwierig, die Bedeutung der Ergebnisse zu gewichten, denn die Forschung hat längerfristigen Charakter und nicht alle Projekte sind gleich weit fortgeschritten. Im folgenden sei als Auswahl auf einige Ergebnisse in den einzelnen Programmen hingewiesen:

- Im Bereich **rationelle Energienutzung in Gebäuden** konnten neue hochwärmedämmende Fensterrahmen sowie Wand- und Dachkonstruktionen vorgestellt werden. Diese erlauben - verglichen mit der heutigen Praxis - eine mehr als doppelt so gute Wärmerückhaltung (k-Werte für Fensterrahmen 1 W/m<sup>2</sup> K, für Wände und Dächer 0,2 W/m<sup>2</sup> K). Erste Anwendungen in Bauten erfolgen bereits.
- Bei der Energieforschung im **Verkehrsbereich** zeigt die Auswertung von Crash-Tests, dass sicherheitstechnisch nichts gegen eine Entwicklung von Leicht-Elektromobilen spricht. SWISSMETRO - ein Untergrund-Hochgeschwindigkeits-Verkehrssystem - ist technisch machbar und könnte wirtschaftlich rentabel sein. Dies geht aus den 1992 abgeschlossenen Studien hervor. Ob das Projekt weitergeführt wird (Bau einer Versuchsstrecke) hängt insbesondere von der Bereitstellung finanzieller Mittel durch die Privatwirtschaft ab.
- Zur optimalen Dimensionierung und Wartung von **Wärmepumpen** sind ein Simulations- und ein Expertensystem entwickelt worden. Es werden darin auch die neuen, umweltfreundlichen Kältemittel berücksichtigt. Des weiteren wurde ein Planungsinstrument zur Optimierung von **Wärmesystemen** für Industrieprozesse erstellt. Die erwähnten Planungshilfen konnten bereits in die Praxis eingeführt werden.
- In der **Verbrennungsforschung** sind, dank modernster Einrichtungen, eine Reihe grundlegender Erkenntnisse der Verbrennungsvorgänge und damit auch der Schadstoffbildung gewonnen worden. Sie dienen einerseits als Basis für die Erarbeitung von Vorschriften. Andererseits konnten, dank guter Zusammenarbeit mit der Industrie, mehrere Ergebnisse in praktische Anwendungen überführt werden (z.B. für die Entstickung von Diesel- und Gasmotoren).
- Auf dem Gebiet der **nuklearen Sicherheit** konnten eine Anlage zur Untersuchung von Rückhalte-mechanismen für radioaktive Stoffe sowie ein Versuchsstand zur experimentellen Erfassung des Durchschmelzens von Reaktordruckbehältern fertiggestellt werden. Zudem wurden mit Daten aus Schweizer Kernkraftwerken weitere Überprüfungen an Simulationsmodellen vorgenommen. Es handelt sich u.a. um Modelle für Kernschmelzunfälle, für Kontaminationskontrollen und für Komponenten-Inspektionen. Solche Arbeiten ermöglichen es Behörde und Kraftwerksbetreibern die Kompetenz in Fragen nuklearer Sicherheit und Entsorgung auf dem neuesten Stand zu halten.

- Das Heliodon an der ETH Lausanne - ein Gerät zur Untersuchung von Beleuchtungsverhältnissen - erweist sich für Untersuchungen zur **Solararchitektur** als nützliches Instrument. Es konnte 1992 erstmals für Abklärungen an echten Bauvorhaben eingesetzt werden.
- Für die Projektierung **thermischer Sonnenenergie-Anlagen** konnte auf Jahresende ein vielseitiges und trotzdem benutzerfreundliches Planungs-PC-Programm fertig entwickelt werden (POLYSUN). Die permanente Aufdatierung ist sichergestellt.  
Als Durchbruch darf gewertet werden, dass ein Konzept für effiziente und zugleich preisgünstige Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung bereitgestellt werden konnte. Die fertig installierten Anlagen (5 m<sup>2</sup> Kollektorfläche) kosten weniger als 10'000 Franken. Erste Realisationen sind in Vorbereitung.
- Dank den Forschungsarbeiten im Bereich **Photovoltaik**, namentlich im Gebiet bauliche Integration von Solarzellenanlagen, wetteifern Architekten und Bauingenieure um ästhetisch gute Lösungen. Sie finden dabei internationale Anerkennung.  
Die mit öffentlichen Mitteln unterstützte Entwicklung von Wechselrichtern für solare Stromerzeugungs-Anlagen hat zu mehreren zuverlässigen Produkten geführt. Verschiedene konnten 1992 im In- und Ausland verkauft werden.
- Von der **Solarchemie** erwartet man wichtige Beiträge für energiesparende und umweltschonende Stoffumwandlungen. Dank der zwei 1992 beim PSI in Betrieb genommenen Sonnenöfen verfügt die Schweiz nun über entsprechende Experimentieranlagen.  
Der Wirkungsgrad der Farbstoff-Solarzelle (Grätzel-Zelle) konnte bis Ende Jahr auf über 14 % erhöht werden. Trotzdem ist - für alle Beteiligten enttäuschend - ABB aus dem Projekt ausgestiegen. Es haben jedoch sofort neue Firmengruppierungen Interesse am Projekt angemeldet.
- Eine Reihe von Ergebnissen aus dem Forschungsprogramm **Biomasse-Nutzung** sind 1992 zur Anwendungsreife gebracht worden: Pläne für kleine schlüsselfertige Biogasanlagen; Holzvergaser im 300-500 kW-Bereich; Installationen zur Fest- und Flüssigmist-Vergärung; Anwendung von RME (Rapsmethylester) für Dieselfahrzeuge; Entstickung der Altholz-Verbrennung mittels selektiver katalytischer Reduktion (90 % NO<sub>x</sub>-Reduktion).
- Dem **Fusionsprogramm** steht seit Herbst 1992 an der ETH-Lausanne ein neuer Tokamak zur Verfügung. Er ist in der Schweiz entwickelt worden und konnte mit Vorzugsunterstützung durch EURATOM aufgebaut werden.
- Im Bereich **Elektrizität** wurden die Energieverluste vom Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten bestimmt und Verbesserungsmöglichkeiten - ohne Qualitätsverminderung - erarbeitet.
- Im Programm **Brennstoffzellen** macht das originelle SULZER-Konzept einer Erdgas-Brennstoffzelle erfreuliche Fortschritte: Ein Stack von 5 Elementen hat über 200 Stunden Strom geliefert.
- Die Anstrengungen im Bereich **Elektrochemie** haben zur Patentierung (zusammen mit der Firma ALUSUISSE) einer Aluminium/Luft-Batterie mit hoher Energiedichte geführt.
- Der mit Hilfe von Bundesmitteln bei der Tessiner Firma METKON entwickelte Elektrolyseur zur Erzeugung von **Wasserstoff** ist im vergangenen Jahr erfolgreich verbessert worden (Druckerhöhung auf 30 bar). Der internationale Markt hat bereits Interesse dafür angemeldet.
- Zur **sozioökonomischen Energieforschung** gehört auch die Datensammlung für Erfolgskontrollen. Eine 1992 abgeschlossene Untersuchung zeigt z.B., dass der spezifische Raumheizungsbedarf bei 1985er Bauten 36 % kleiner ausfällt als bei Gebäuden aus dem Jahr 1975 (für die anschliessenden Fortschritte, siehe die Angaben beim ersten Punkt).

Auch 1992 sind von öffentlicher Hand geförderte Energieforschungsarbeiten ausgezeichnet worden:

- Mit dem *SULZER-INFRA-Innovationspreis*: Energierrelevante Anwendungen integraler Ingenieursysteme: CLICK Informatik und PSI
- Mit dem *Innovationspreis beider Basel*: Hochwärmedämmende Fensterrahmen: HÄRING Pratteln und EMPA
- Zudem haben eine ganze Reihe vom Bund unterstützter Projekte Auszeichnungen der *Arbeitsgemeinschaft Solar 91* erhalten.

Von den über 30 in Berichtsjahr durchgeführten öffentlichen Veranstaltungen zur Verbreitung und Vertiefung von Energieforschungsergebnissen waren folgende von grösserem Interesse (über 200 Teilnehmer):

- Status-Seminar: "Wärmeschutzforschung in Hochbau".
- Seminar: "Wärmepumpen- und Wärme-Kraft-Kopplung; Integration komplexer Haustechnik in Gebäuden".
- Holzenergie-Symposium: "Neue Konzepte zur Schadstoffarmen Holzenergienutzung".

Des weitem wurden durch uns zwei wichtige internationale Konferenzen organisiert:

- *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, 11.-15. Mai, Interlaken (über 200 Teilnehmer).
- *European Photovoltaik Solar Energy Conference*, 12.-16. Oktober, Montreux (über 1000 Teilnehmer).

1993 gilt es - trotz finanzieller Engpässe - mindestens in den prioritäten Gebieten die Kontinuität der Forschung zu gewährleisten. Zudem muss unserem Werben um mehr Industriebeteiligung noch verstärkte Bedeutung zukommen. Nebst der eingangs erwähnten Umsetzung der Evaluationsergebnisse, steht auch eine Standortbestimmung unserer internationalen Zusammenarbeit (inklusive Ostländer und Entwicklungsländer) auf der Agenda.

---

[1] Konzept der Energieforschung des Bundes 1992-1995, Dezember 1991, BEW, 3003 Bern

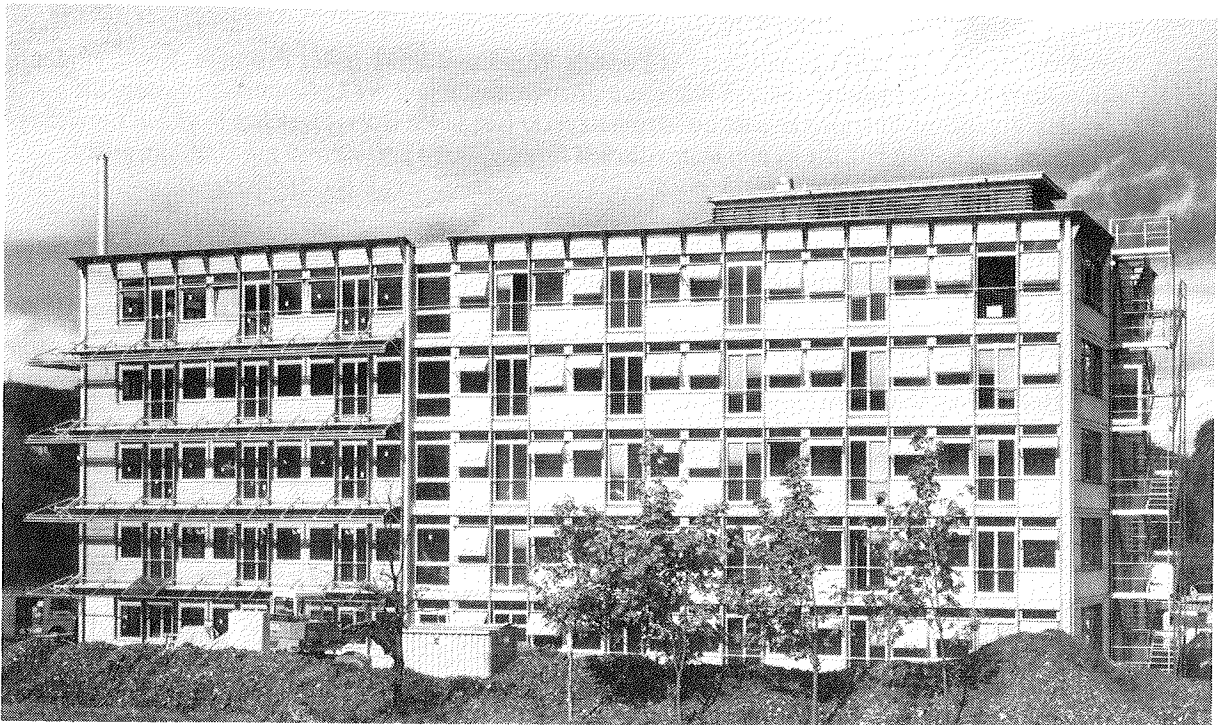
[2] Begutachtung der schweizerischen Energieforschung der öffentlichen Hand, Januar 1993, BEW, 3003 Bern

# RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

**Überblicksbericht**  
zum Forschungsprogramm 1992

**Programmleiter: Markus Zimmermann**

---



**Das TENUM-Gebäude in Liestal**

Das Bürogebäude demonstriert gleichzeitig rationelle Energienutzung und ökologische Bauweise

## 1. Programmübersicht

Das Forschungsprogramm **Rationelle Energienutzung in Gebäuden** befasst sich mit der ganzheitlichen Optimierung der Energienutzung in Gebäuden. Dabei berücksichtigt es die Erstellung, den Betrieb und den Abbruch von Gebäuden, wobei der Betrieb bezüglich Energiesparpotential die höchste Priorität aufweist.

Das Ziel des Programmes ist, Grundlagen und Lösungen für die Energieverbrauchs-, aber auch Schadstoffreduktion bei Neu- und Altbauten zu erarbeiten und der Praxis zugänglich zu machen. Dabei steht häufig das Gebäude als zu optimierendes System im Vordergrund, aber auch einzelne Komponenten, z.B. der Gebäudehülle oder der Wärmeerzeugung und -abgabe werden untersucht.

Im Bereich der Anlagekomponenten stützt sich das Programm auch auf Ergebnisse anderer Forschungsprogramme ab oder arbeitet mit diesen zusammen.

## 2. Anvisierte Zielpunkte 1992

1992 war der Beginn der zweiten 4-jahres Periode des Forschungsprogrammes. Die Arbeitsschwerpunkte waren:

- Vorbereitung der Forschungsarbeiten der Periode 92-95 und Start erster Projekte. Einen eindeutigen Schwerpunkt bildeten Projekte, die sich mit Raumluftrömungen und der Luftqualität befassen. Sie sind eine Folge des Vorhabens **Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden (ERL)**, welches in vielen Bereichen erst Grundlagen erschaffen hat, die es nun **in praktischen Anwendungen** umzusetzen gilt (Lüftung grosser Hallen, Raumlufthqualität, Raumkühlung, etc. )
- Fortsetzung der Abschlussarbeiten für Projekte der Periode 88-91 und Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis. Aus der ersten Programmperiode (88-91) konnten folgende Projekte abgeschlossen werden:
  - **Schadstoffemissionsverhalten von Baustoffen** (Phase 1) [9]
  - **Hochwärmedämmende Fensterrahmen** [6]
  - **Wärmeabfluss ins Erdreich** [7], [28]
  - **Optimaler Betrieb von Heizungsanlagen** [12] sowie
  - *Etude de la thermocinétique des échanges d'air dans le bâtiment* [19]
  - *Ventilation Efficiency Measurements in SULZER Test Chamber* [35]
  - *Evaluation of COMERL with LESO Dataset* [36]
  - *Demand Controlled Ventilating Systems* [18]

Diverse weitere Projekte stehen kurz vor dem Abschluss. Generell dauert der Abschluss von Projekten mit starkem Umsetzungsteil länger als vorgesehen. Die Vernehmlassung von Publikationen, die Durchführung von Veranstaltungen und Kursen, die Veröffentlichung von Fachartikeln sind zeitraubend.

- Start eines Pilot- und Demonstrationsprogrammes (P&D) im Gebäudebereich, welches der Bund aufgrund des Energieartikels zusammen mit den Kantonen unterstützt. Erste Neubauprojekte, Wohn- und Bürobauten (bgl. auch Titelseite), konnten bereits unterstützt und Erfahrungen mit der Bewertung und Abwicklung gemacht werden. 1993 sollten die Startschwierigkeiten (Zuständigkeiten, Administratives) überwunden und ein aktives, zielgerichtetes P&D-Programm möglich sein.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Das Forschungsprogramm umfasste Ende 1992 noch 20 Projekte, welche vom BEW mitfinanziert werden. Davon können 1993 voraussichtlich 6 Projekte abgeschlossen werden. Hinzu kommt noch eine ganze Reihe von Projekten, welche im Rahmen des Forschungsprogrammes indirekt begleitet werden, da die Finanzierung im wesentlichen über andere Stellen erfolgt (NEFF, Schulrat, Kantone, andere Bundesstellen).

#### PLANUNGSHILFSMITTEL

Die Ergebnisse der Arbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

Im Rahmen des Projektes **Effiziente Energienutzung in Schulen** [1] wurden Planungsgrundlagen für energiege-rechte Schulbauten erarbeitet. Sämtliche Publikationen - ein Planerhandbuch [29], ein Leitfaden für Schulbehörden [30], eine Sammlung von Fallbeispielen [31] sowie eine Reihe von Forschungsberichten zu speziell untersuchten Fragestellungen - konnten fertiggestellt werden. Die Übersetzung ins Französische resp. ins Deutsche folgt noch 1993. Diese Unterlagen schaffen die Voraussetzung, um den Energieverbrauch von Schulen gegenüber bestehenden, nicht sanierten Schulen auf weniger als einen Drittel zu reduzieren (von Energiekennzahl  $E = 725 \text{ MJ/m}^2 \text{ a}$  auf  $200 \text{ MJ/m}^2 \text{ a}$ ). Bereits wurden verschiedene Kurse für Planer und Schulbehörden durchgeführt (Kt. Thurgau), weitere werden im Rahmen von ENERGIE 2000 in der ganzen Schweiz folgen.

Das Projekt **Energierrelevante Anwendungen integraler Ingenieursysteme** [2], konnte 1992 die technische Entwicklung erfolgreich abschliessen und wurde dafür mit dem SULZER-Innovationspreis geehrt. Das Projekt schafft die Voraussetzung, dass sämtliche EDV-bezogenen Planungsaufgaben für eine Gebäude auf der Basis eines einzigen, integralen Computersystems abgewickelt werden können. Das System hat den Vorteil, dass insbesondere in der Energietechnik gesamtheitlich optimierte Lösungen effizienter erarbeitet werden können und dass immer auf kohärenten Datensätzen basiert wird. Als integrierte Anwendungen der Energietechnik sind die Berechnung des Wärmeleistungsbedarfes, Rohrnetzberechnungen sowie die Kapselung des dynamischen Simulationsprogrammes TRNSYS realisiert. In der nächsten Projektphase steht die Markteinführung des Programmes und die Integration ergänzender Anwendungen im Vordergrund. Es ist zu hoffen, dass trotz Rezession eine ähnlich grosse Unterstützung des Projektes (in Millionenhöhe) durch die Privatwirtschaft wie bis anhin möglich sein wird.

Das IEA-Projekt *Calculation of Energy & Environmental Performance of Buildings* (Thermische Simulation von Gebäuden) [3] steht kurz vor dem Abschluss. 1992 konnte vor allem die benutzergerechte Aufbereitung des (behördlichen) Kühllastnachweises realisiert werden [28]. Erste Tests mit unabhängigen Ingenieurbüros haben gezeigt, dass der bisherige Kühllastnachweis praktisch unbrauchbar war (zu grosse Unterschiede der Resultate), dass aber mit dem neuen, standardisierten Nachweis die Ergebnisse wesentlich besser sind (geringe Abweichungen). Mit der Praxiseinführung des neuen Kühllast-Nachweises kann Mitte 1993 gerechnet werden.

Weitere Forschungsarbeiten im Bereich "Raumkühlung" laufen unter der Projektgruppe **Vermeidung von Kühlbedarf - Passive Raumkühlung**, welches anfangs 1991 gestartet wurde. Im Rahmen des NEFF-Projekts 501 werden die massgebenden internen Lasten bestimmt [28]. Verschiedene Projekte befassen sich mit diversen passiven Kühlstrategien. Das Projekt *Refroidissement passif de bâtiments par ventilation naturelle* [4] setzt vor allem Erkenntnisse aus dem ERL-Vorhaben in ein Planungshilfsmittel für die natürliche Nachtlüftung um. Diese Arbeiten können nun auch in das JOULE 2-Programm der EG einfließen. Im Rahmen von zwei NEFF-Projekten (390 und 464) werden zwei Kühlsysteme (Erdregister [28], nächtliche Betonkernkühlung [28]) untersucht. Alle diese Erkenntnisse können direkt in das neu formulierte Projekt der IEA *Low Energy Cooling* einfließen und zusammen mit den ausländischen Erfahrungen in einem "Handbuch der passiven Kühlung" veröffentlicht werden.

Das Vorhaben **ERL** [15] ist weitgehend abgeschlossen. 1992 wurden vor allem die Zusammenfassung und Umsetzung der Erkenntnisse an die Hand genommen. Eine sechs-bändige Dokumentation konnte im Entwurf weitgehend fertiggestellt werden. Sie wird voraussichtlich Ende 1993 veröffentlicht. Parallel dazu konnten wesentliche Ergebnisse an der Veranstaltung "Lüftungsforschung für die Praxis" [34] einem breiten, interessierten Publikum zugänglich gemacht werden.

## GEBÄUDEHÜLLE

Das Projekt **Hochwärmedämmende Wand- und Dachkonstruktionen** [5], [28] konnte im wesentlichen abgeschlossen werden. Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist anfangs 1993 geplant. Darin werden die aufgrund eines öffentlichen Wettbewerbes prämierten und angekauften Lösungen bauphysikalisch (insbesondere thermisch) beurteilt. Die Ergebnisse zeigen, dass k-Werte um  $0,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  auch für die Praxis keine Utopie mehr sind (geltender Grenzwert  $0,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , Zielwert  $0,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ). Die Modelle dieser Lösungen konnten, nachdem sie in der Schweiz schon an verschiedenen Ausstellungen gezeigt wurden, auch im Rahmen einer mehrmonatigen Wanderausstellung durch ganz Österreich präsentiert werden. Ebenso sind erste Umsetzungen dieser Konstruktionen in Gebäude realisiert worden (z.B. Demonstrationsgebäude "Brunnadern").

Parallel zu diesem Projekt wurden auch Verbesserungsmöglichkeiten für Fensterrahmen untersucht. Das Projekt **Hochwärmedämmende Fensterrahmen** [6] hat gezeigt, dass vor allem Holzrahmenkonstruktionen mit üblichen Abmessungen k-Werte um  $1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  erreichen können (Standardwert heute um  $2,0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ). Eine erste Rahmenentwicklung, das LIGNAL-Therm Fenster konnte gefördert werden. Die Firma HÄRING in Pratteln hat für diese Entwicklung bereits den Innovationspreis beider Basel entgegennehmen können. Der schwächste Teil des Fensters und damit der ganzen Gebäudehülle stellt nun der Glasrandverbund dar, welcher immer noch Kondensatprobleme verursachen kann. Arbeiten zur Verbesserung dieses Schwachpunktes sind inzwischen auch im Gange, dürften jedoch noch auf einige "Knacknüsse" stossen.

Ein weiterer Schwerpunkt im Bereich Gebäudehülle stellt die ökologische Beurteilung von Baustoffen resp. Konstruktionen dar. Für eine gesamtheitliche Betrachtung neuer Lösungen müssen diese Aspekte in Zukunft vermehrt beachtet werden. Im Vordergrund der Arbeiten steht momentan die **Ökobilanzierung der Wärmedämmstoffe** [10]. Die Untersuchung der übrigen Baustoffe erfolgt anschliessend im Rahmen des Schwerpunktprogrammes **Umwelt des Nationalfonds (NF)**. Die methodischen Aspekte werden im Rahmen des Programmes **Sozioökonomie** behandelt, die eigentlichen Bilanzierung in diesem Programm. Ebenfalls in diesem Programm werden die wichtigen Materialkennwerte bestimmt. Von besonderer Bedeutung sind dabei die **Schadstoffemissionen von Baustoffen** [9] während ihrer Nutzung. Dazu wurden eine international koordinierte Messmethode entwickelt und mit der Reihenuntersuchung der wichtigsten Baustoffe begonnen [28]. Schlussendlich soll das Emissionsverhalten von etwa 100 Baustoffen bestimmt und der Zusammenhang mit der realen Raumluftbelastung überprüft werden. Das Ziel ist, dass Baustoffhersteller ihre Produkte prüfen lassen und die entsprechenden Emissionswerte deklarieren. Für den Bauherrn sind diese Angaben vor allem beim Bezug von Neubauten oder bei der Durchführung von Gebäudesanierungen interessant, sie sind aber auch für die Raumluftqualität ganz allgemein von Interesse.

## HAUSTECHNIK

Das Forschungsprogramm befasst sich hier mit der Verbesserung der konventionellen Wärmeerzeugung, da für alternative Systeme (solar, Wärmepumpe, Holzfeuerung etc.) separate Programme geschaffen wurden.

Im Projekt **Energierrelevante Typenprüfung von Heizkesseln** [11] will man die Aussagekraft der Prüfergebnisse für den Energieplaner verbessern. Vor allem sollen aufgrund der Typenprüfung die Jahresnutzungsgrade der Heizkessel unter verschiedenen Betriebsbedingungen bestimmbar werden. Es wurden detaillierte Messungen an einem Heizkessel durchgeführt und mit Modellrechnungen verglichen. Vor allem die Bereitschaftsverluste im Teillastbetrieb sind schwierig zu bestimmen und nur bedingt den jeweiligen Verlustfaktoren zuzuordnen. Dazu wurden grundlegende Arbeiten durchgeführt und die entsprechenden Rechenmodelle überprüft. Demnächst werden weitere Heizkessel (insgesamt 8 verschiedene Typen) untersucht, um die Allgemeingültigkeit der Beurteilungsmethode zu verifizieren.

Eigentliche Verbesserungen an der Wärmeerzeugung verfolgen zwei Projekte:

- An der EMPA werden **organische Beschichtungen als Korrosionsschutz in Niedertemperaturheizkesseln** [14] untersucht. Mit hitze- und diffusionsbeständigen Kunstharzbeschichtungen wird versucht, die Korrosionsprobleme im kondensierenden Bereich des Heizkessels zu lösen und damit auch die Schwermetallbelastung der Kondensate zu verringern. Mögliche Beschichtungssysteme wurden gefunden und angeeignete Muster appliziert. Die physikalischen Prüfungen sind abgeschlossen, die chemischen Tests dauern noch an.



- Das andere Projekt, welches vom NEFF unterstützt wird, untersuchte die Anwendung von **Kunststoffkaminen im kondensierenden Betrieb**. Dazu wurde ein Kunststoffrohr in ein bestehendes gemauertes Kamin gestellt. Über den entstandenen Zwischenraum wird die Verbrennungsluft angesaugt und so ein Teil der Abgasverluste rekuperiert. Das System hat sich gut bewährt und den feuerungstechnischen Wirkungsgrad um ein weiteres Prozent auf 101,2 %H<sub>u</sub> verbessert. Die Ergebnisse wurden am Status-Seminar "Energieforschung im Hochbau" [29] vorgestellt.

Auf der Seite der Wärmeabgabe wurde die **Regelung von Fussbodenheizungen** [13] untersucht. Als äusserst träges Wärmeabgabesystem stellt die Fussbodenheizung hohe Anforderungen an die Heizungsregelung, sofern man Sonnenenergiegewinne und interne Gewinne nutzen möchte. Zur Untersuchung der Problematik wurden in einer Testkabine verschiedene Regelstrategien überprüft und rechnerisch mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS auf weitere Fälle übertragen. Dabei hat der Sonnenfühler, welcher bei Sonnenschein die Heizkurve senkt, durchwegs besser abgeschnitten als der Raumthermostat (4 bis 8% Einsparung). Gar nicht zu empfehlen ist die Nachtabstaltung bei Fussbodenheizungen. Sie kann zu grossem Mehrverbrauch (bis 23%) führen [29].

Die Projekte auf der Lüftungsseite wurden bereits unter "Energierrelevante Luftströmungen im Gebäude" vorgestellt. Besonders erwähnenswert sind hier die umfangreichen Untersuchungen an Quell- und Induktionslüftungen, die zusammen mit der Lüftungsindustrie durchgeführt wurden. Diese, durch den NEFF finanzierten Untersuchungen sind weitgehend abgeschlossen und werden momentan vom BEW unterstützt im **Handbuch moderner Lüftungssysteme** [22] zusammengefasst und mit Planungsrichtlinien ergänzt.

#### 4. Zusammenarbeit, internationale Kontakte

Das Programm **Rationelle Energienutzung im Gebäude** hat naturgemäss enge Kontakte mit verwandten Programmen wie **Solararchitektur**, **Aktive Solarnutzung & Wärmespeicherung** und **Sozioökonomie**. Gleichzeitig leistet es aber auch wichtige Beiträge für andere Programme des Bundes (DIANE, P&D, Impulsprogramme) wo Vorarbeiten resp. Projekte z.T. direkt übernommen werden konnten. Obwohl die Energieforschung normalerweise mittel- bis langfristige Ziele verfolgt, können die Unterlagen über "Energiegerechter Betrieb von Spitälern" und "Effiziente Energienutzung in Schulen" vom Programm ENERGIE 2000 direkt für die Durchführung von Kursen verwendet werden.

Auf der Forschungsseite findet eine enge Zusammenarbeit mit den Hochschulen, mit privaten Ingenieurbüros (die im Gebäudebereich eine starke Position haben) sowie mit Firmen der Bauwirtschaft statt. Zusammen mit Forschungsgeldern des NEFF, des NF und der Kantone können die Beiträge des BEW mehr als verdoppelt werden.

Die internationale Zusammenarbeit hat 1992 mit der Ausrichtung auf Europa weiter zugenommen. Im Vordergrund steht aber nach wie vor die Beteiligung an Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA). Beteiligungen an EG-Projekten sind jedoch dazugekommen und die Abstimmung auf die europäische Normierung wurde intensiviert. Bei der IEA läuft weiterhin ein zur rationellen Energienutzung in Gebäuden analoges Programm, bei welchem sich die Schweiz an folgenden Projekten beteiligt:

- *Air Infiltration and Ventilation Centre* [17] (Zusammenarbeit verlängert)
- *Calculation of Energy & Environmental Performance in Buildings (Thermal Modelling)* [3], Abschluss 1993
- *Multizone Air Flow Modelling* [20], 1992 gestartet
- *Heat Air and Moisture Transport Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE)* [8], laufend
- *Real Time Simulation in HVAC Systems* [23], 1992 gestartet
- *Energy, Air & Contaminant Flows in Large Enclosures* [24], in Vorbereitung, mit internationaler Leitung durch die Schweiz.

Daneben wurden im Rahmen des **IEA - Future Buildings Forum, (FBF)** zwei Workshops durchgeführt. Das FBF hat zum Ziel, für das IEA Programm **Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECB)**

langfristige Forschungsbedürfnisse zu erkennen und Projektvorschläge auszuarbeiten. Die beiden Workshops waren:

- *Innovative Cooling Systems* [26] (in Zusammenarbeit mit Grossbritannien)
- *Future Buildings-Innovative Low Energy Concepts* [27] (in Zusammenarbeit mit Finnland).

Der erste Workshop hat bereits zu einem neuen IEA-Projekt **Low Energy Cooling** geführt, welches 1993 gestartet wird. Aus dem zweiten Workshop bahnt sich eine Zusammenarbeit mit dem EG-BRITE-EURAM Programm an.

## 5. Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Die Umsetzung der Forschungsergebnisse weist nach wie vor eine hohe Priorität auf, obwohl sie sich oft noch über Jahre nach Projektabschluss hinwegzieht. Da die Geldmittel für die Umsetzung eng begrenzt sind, werden vor allem Synergien mit andern Gelegenheiten gesucht, um das Zielpublikum zu erreichen. Eine wichtige Umsetzungsmöglichkeit bot 1992 das 7. Schweizerische Status-Seminar **Energieforschung im Hochbau** [28], an welchem über 250 interessierten Teilnehmern aus der ganzen Schweiz eine Reihe von Projekten mit ihren Ergebnissen vorgestellt werden konnte. Die entsprechenden Projekte sind jeweils mit dem Status-Seminar-Literaturhinweis versehen. Allerdings ist wegen dem grossen Interesse der Tagungsband bereits vergriffen.

Weitere Veranstaltungen, an denen Forschungsergebnisse präsentiert wurden, waren:

- Lüftungsforschung für die Praxis, ETH, Zürich, 9. Mai 1992
- Kolloquium Kleinholzfeuerungen, ETH, Zürich, 22. Oktober 1992
- Seminar Systemintegration, ETH, Zürich, 5. November 1992
- Energiegerechte Schulbauten, Behördentagung, Frauenfeld, 25. September 1992
- Energiegerechte Schulbauten, Planer-Kurs, Weinfelden, 20. November 1992 + 4. Dezember 1992

Die hauptsächlich für die Umsetzung von Forschungsergebnissen erstellten Publikationen sind im Literaturverzeichnis aufgeführt [28] bis [34].

## 6. Ausblick

Für 1993 sind folgende Schwerpunkte geplant:

- Das Forschungsvorhaben **Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden** soll weitgehend abgeschlossen und die Publikationsreihe (sechs Bände) fertiggestellt werden. Weiterführende Projekte wurden im Bereich Luftströmung schon gestartet.
- Analog zum Projekt über **Schulbauten**, sollen Projekte über Sanierung und energiegerechten Betrieb von Kirchen und Kunsteisbahnen gestartet werden.
- Die Koordination mit dem Pilot- und Demonstrationsprogramm soll verbessert und die Initiierung ausgewählter P&D-Projekte gefördert werden.

## 7. Projektliste

- [1] B. WICK, Widen: *Effiziente Energienutzung in Schulen (EFFENS)*. (JB)
- [2] A. Duppenenthaler, R. Mantel, CLICK INFORMATIC, Basel: *Energierrelevante Anwendungen integraler Ingenieursysteme*. (JB)
- [3] G. Zweifel, EMPA - Dübendorf & P. Jaboyedoff, SORANE, Lausanne: *Thermische Simulation von Gebäuden*. (JB)
- [4] C. Roulet, EPF - Lausanne: *Refroidissement passif de bâtiments par ventilation naturelle*. (JB)
- [5] Th. Frank, EMPA - Dübendorf: *Hochwärmedämmende Wand- und Dachkonstruktionen*. (JB)
- [6] H. Emmer, J. Konzbuhl, EMMER PFENNINGER, Münchenstein: *Hochwärmedämmende Fensterrahmen*. (SB)
- [7] B. WICK, Widen: *Wärmeabfluss ins Erdreich*. (SB)
- [8] P. Steiner, EMPA - Dübendorf: *Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts (HAMTIE)*. (JB)
- [9] R. Gehrig, C. Zellweger, EMPA - Dübendorf: *Schadstoffemissionsverhalten von Baustoffen*. (JB)
- [10] M. Fischer, J. Sell, EMPA - Dübendorf: *Stoff- und Energiebilanzen von Wärmedämmstoffen*. (JB)
- [11] Th. Cerkez, EMPA - Dübendorf: *Energierrelevante Typenprüfung für Öl- und Gasheizkessel mit Gebläsebrennern*. (JB)
- [12] Ch. Weinmann, WEINMANN ENERGIES, Echallens & H.-P. Eicher, EICHER & PAULI, Liestal: *Exploitation optimale des chaufferies*. (SB)
- [13] K. FORT, Volketswil: *Optimaler Betrieb von Fussbodenheizungen*. (JB)
- [14] M. Faller, EMPA - Dübendorf: *Organische Beschichtungen als Korrosionsschutz in Niedertemperaturheizkesseln*. (JB)
- [15] F. Widder, PSI - Villigen: *Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden (ERL)*. (JB)
- [16] U. STEINEMANN, Wollerau: *ERL-Publikationsreihe*. (JB)
- [17] V. Dorer, P. Hartmann, EMPA - Dübendorf: *Air Infiltration and Ventilation Centre*. (SB 89-92, JB)
- [18] Ch. Filleux, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Demand Controlled Ventilating Systems*. (SB)
- [19] C. Roulet, EPF - Lausanne: *Etude de la thermocinétique des échanges d'air dans le bâtiment*. (SB)
- [20] C. Roulet, EPF - Lausanne: *Multizone Air Flow Modelling*. (JB)
- [21] V. Dorer, EMPA - Dübendorf: *Unterlagen Rechenprogramm Interzonenluftströmung COMERL*. (JB)
- [22] C. Filleux, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Handbuch neuer Lüftungssysteme*. (JB)
- [23] J. Tödtli, LANDIS & GYR, Zug: *Fehlererkennung in HLK Anlagen*. (JB)
- [24] A. Moser, ETH - Zürich: *Energy Efficient Ventilation of large Enclosures*. (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

## 8. Referenzen

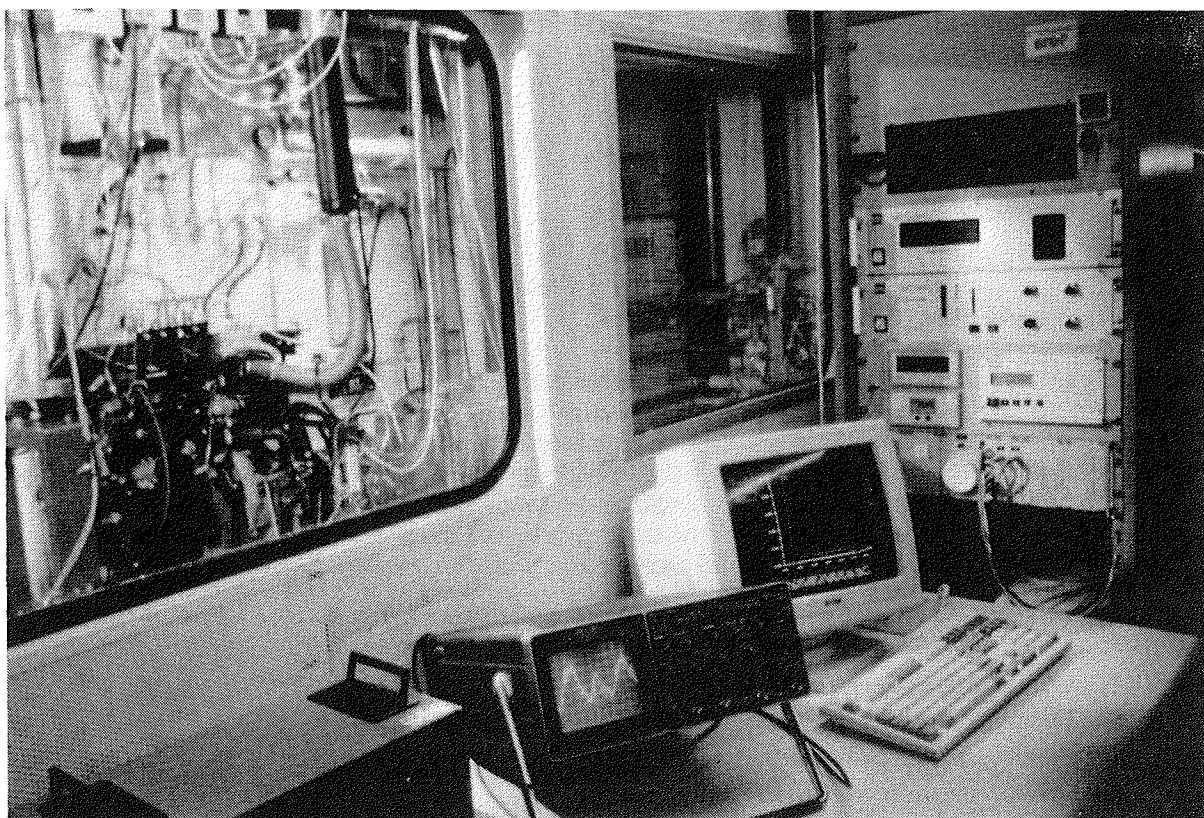
- [25] M. Zimmermann, KWH / EMPA - Dübendorf: *Raumkühlung: Wenn schon - dann passiv*, Schweizer Energiefachbuch 1993
- [26] M. Zimmermann, R. Meierhans et al: *Innovative Cooling Systems*, IEA Future Buildings Forum Workshop, Sulihull (UK), 12-14 Mai 1992
- [27] A. Sarja et al: *Future Buildings - Innovative Low-Energy Concepts*, IEA Future Buildings Forum Workshop, Espoo (SF), 1.-3. September 1992
- [28] 7. Schweizerisches Status-Seminar Energieforschung im Hochbau, Konferenzbericht EMPA-KWH, ETH, Zürich, 17./18. September 1992
- [29] B. Wick, P. Chuard, T. Baumgartner: *Energiegerechte Schulbauten - Handbuch für Planer*, SIA Dokumentation D090, August 1992.
- [30] B. WICK, Widen: *Energiegerechte Schulbauten - Leitfaden für Schulbehörden*, ENET, 1992
- [31] B. Wick, P. Bernhard, Widen: *Energiegerechte Schulbauten - Fallbeispiele*, ENET 1992
- [32] B. WICK, Widen: *Raumtemperaturregelung in Schulbauten*, 1992
- [33] B. WICK, Widen: *Energiestatistik Schulen und Sporthallen*, 1992
- [34] C. Filleux, A. Moser et al: *Lüftungsforschung für die Praxis*, Tagungsunterlage, ETH, Zürich, 19. Mai 1992
- [35] C. Roulet, P. Cretton, P. Kofoet: *Ventilation Efficiency Measurements in SULZER Test Chamber*, 1992
- [36] V. Dorer, F. Huck, EMPA - Dübendorf: *Evaluation of COMERL with the LESO Dataset, Final Report*, 1992
- [37] C. Roulet et al: *Stochastic model of inhabitant behavior in regard to ventilation*, IEA/ECB Technical Report, Nov. 1991
- [38] J. von der Maas: *Air flow through large openings in buildings*, IEA/ECB Technical Report, 1992
- [39] Fahlén et al: *Demand Controlled Ventilating Systems - Sensor Tests*, IEA/ECB Annex 18 Report, 1992
- [40] C. Roulet, Luk Vandeale: *Air Flow Patterns within Buildings - Measurement Techniques*, AIVC TN 34, Dec. 1991
- [41] *Advanced Ventilation Systems - State of the Art and Trends*, AIVC TN 35, 1992
- [42] *Air Infiltration and Ventilation Glossary*, AIVC TN 36, 1992
- [43] *A Strategy for Future Ventilation, Research and Application*, AIVC TN 37, 1992
- [44] *AIRGUIDE, Guide to the AIVC's Bibliographic Database*, AIVC TN 38, 1992
- [45] *Proceedings 3. AIVC-Conference, Nice*, 1992

# RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IM VERKEHR

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Bruno Albrecht

---



## Motorprüfstand des Projektes OMEGAZ

Der hierfür aufgebaute Motorenprüfstand bei ETH-Lausanne erlaubt die Messung der wichtigsten Kenn- und Emissionswerte für die Optimierung eines Hybridfahrzeuges mit den Brennstoffen Benzin und komprimiertem Erdgas.

## 1. Anvisierte Zielpunkte für 1992

Mit dem Berichtsjahr geht die Periode 1989/92 des Forschungsprogramms **Rationelle Energienutzung im Verkehr** zu Ende. Die Schwerpunkte des Forschungsprogramms, welche auch in die nächste Periode einfließen werden, sind:

- Erzielung von verbesserten Energiewirkungsgraden beim motorisierten Individualverkehr mit Hilfe von technischen und verkehrsorganisatorischen Massnahmen.
- Wesensgerechtere und rationellere Abwicklung des Güterverkehrs mit Hilfe von technischen und logistischen Massnahmen.
- Entwicklung und Anwendung von neuartigen Technologien beim Personen- und Gütertransport.

Hauptziel für 1992 war der Abschluss bzw. die Weiterführung der laufenden sowie die Initialisierung von weiteren erfolgversprechenden Projekten im Rahmen des gegenüber den Vorjahren beträchtlich reduzierten Budgets. Weil die Zunahme des Endenergieverbrauchs beim *motorisierten Individualverkehr* nach wie vor ungebrochen ist, wurden die neuen Projekte vor allem in diesem Bereich angesiedelt.

## 2. Durchgeführte Forschungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

### ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

#### a) *Hauptstudie Schnellbahn Swisstrom*

Dieses Projekt ist ein gemeinsames Forschungsvorhaben des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen mit dem BEW, der ETH-Lausanne und der Privatindustrie. Forschungsstellen sind das LEME und das ITEP der ETH-Lausanne [1]. Die auf Ende Dezember 1992 abgeschlossene Hauptstudie befasst sich neben einer Nachfrageanalyse mit der wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit der Schnellbahn. Dabei zeigt sich, dass das Konzept eines solchen Hochgeschwindigkeits-Transportsystems gesamthaft einige vorteilhafte Charakteristiken aufweist und auch eine wirtschaftliche Rentabilität verspricht. Es bestehen gute Aussichten für die technische Machbarkeit, obschon eine merkliche Anzahl von technischen Problemen noch vertiefter betrachtet werden muss, wie z. B.:

- Die Dichtigkeit der Schieber innerhalb des Tunnels und der Schleusen
- Der Betrieb im Falle eines Unterbruchs in einem Tunnelabschnitt
- Die Wahl eines kostengünstigen Vakuumsystems
- Die Übermittlung der Energie auf die Fahrzeuge
- Die Fahrzeugstruktur und die Systemintegration punkto Antrieb und Steuerung
- Die Optimierung der aerodynamischen Aspekte
- Die sicherheitstechnischen Probleme.

Die Untersuchung dieser Gebiete hängt im wesentlichen auch davon ab, ob die Privatwirtschaft bereit ist, bereits in der jetzigen Phase genügend finanzielle Mittel zur Verfügung zu stellen. Ein Gesuch für die Weiterunterstützung der Arbeiten durch den Bund wurde im Herbst 1992 an das EVED eingereicht.

#### b) *Verbrauchsminimales Leichtautomobil mit Erdgas-Magermotor*

Das seit 1990 laufende Projekt des Zentralschweizerischen Technikums Horw-Luzern umfasst die Optimierung eines verbrauchs- und emissionsarmen Leichtautomobils mit einem Erdgas-Magermotor sowie die Definition der technischen Mindestanforderungen für eine neue Fahrzeugkategorie **Leichtautomobile** [2]. Die 1992 durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse sind:

- Untersuchung und Optimierung des Magerbetriebs an einem Einzylinder-Versuchsmotor auf dem Prüfstand hinsichtlich Treibstoffverbrauch und Emissionswerten. Dabei stellte sich heraus, dass bei einem

Magermotor 1 bis 2 % unverbranntes Methan bezogen auf das Erdgas unvermeidbar sind, was aber energetisch und ökologisch unbedenklich ist, weil Methan kein Schadstoff ist und zweitens die Treibhauswirkung dieser kleinen Menge den Treibhausvorteil von Erdgas gegenüber Benzin (25 % weniger CO<sub>2</sub>) nur verkleinern aber nicht aufheben.

- Umrüstung eines DAIHATSU CUORE zum Pilotfahrzeug ECOLO. Der Vergaser wurde durch einen Gasmischer ersetzt und anstelle des Benzintanks ein Druckbehälter für das komprimierte Erdgas eingebaut. Der Mischer wurde schrittweise so modifiziert, dass über den ganzen Betriebsbereich des Motors der für die Abmagerung notwendige Luftüberschuss richtig dosiert wird.
- Durchführung von verschiedenen Versuchsreihen auf dem Rollenprüfstand und Verbesserung des Prototypen bezüglich Fahrbarkeit, Abgasemissionen und Treibstoffverbrauch.
- Alltagseinsatz des Prototypen während einem ganzen Jahr beim Kantonalen Amt für Umweltschutz Luzern mit einer Kilometerleistung von 6'000 km.
- Beschaffung eines leichteren Fahrzeuges derselben Marke mit einem kleineren Motor zum Bau eines zweiten Prototypen, um die noch nicht voll befriedigenden Energieverbrauchs- und Abgaswerte bezüglich der Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe verbessern zu können. Gegenüber dem ECOLO-Prototyp konnte der Verbrauch um 7 bis 15 % reduziert werden, wobei der äquivalente Benzinverbrauch bei konstanter Fahrt mit 80 km/h weniger als 3 Liter pro 100 km beträgt.
- Zur Erprobung der Bergtauglichkeit und Demonstration des Sparpotentials durch kleine Fahrzeugmassen wurde eine Pässefahrt über den Nufenen, Gotthard und die Furka organisiert. Dabei entsprach der Gasverbrauch des ECOLO-Vorgängers ECOLI mit seinem Gesamtgewicht von nur 530 kg über die Gesamtstrecke von 100 km mit total 3000 Höhenmetern 3,5 Liter Benzin.

Der Bau einer Kleinserie von fünf Fahrzeugen wurde verzögert, weil es in der Schweiz keine speziellen Abgasvorschriften für Erdgasautos gibt und der für Benzin gültige Kohlenwasserstoffgrenzwert infolge des Methans überschritten wird. Es bestehen nun intensive Kontakte zum Bundesamt für Polizeiwesen und zum BUWAL, damit ein Versuchsbetrieb im Rahmen von ENERGIE 2000 möglich wird.

#### c) *Entwicklung einer Elektro-Leichtfahrzeug-Modellfamilie*

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung von 2 Prototypen der Elektro-Leichtfahrzeug-Modellfamilie durch die Firma HORLACHER in Möhlin unter besonderer Berücksichtigung der Alltagstauglichkeit (Benutzerfreundlichkeit, Sicherheit, Energiesparsamkeit, Kostengünstigkeit) [3]. Es wurden folgende Arbeiten ausgeführt und Ergebnisse erzielt:

- Prüfung und Bewertung verschiedener Produktionsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen für eine zukünftige Serienproduktion der Fahrzeughülle der zu erstellenden Prototypen. Bei diesen Abklärungen wurde deutlich, dass sowohl von der Kostenseite als auch der erforderlichen Materialbelastbarkeit ein Ausweichen von Metall auf faserverstärkte Kunststoffe möglich wäre. Bei der praktischen Erprobung der Vielzahl von möglichen Kunststoff-Verfahrenstechniken wurde deutlich, dass für grosse tragende Teile im Fahrzeugbau wohl künftig ein Faser-Harz-Injektions-Verfahren zum Einsatz kommen wird.
- Um einen effizienten Wärmeaustausch zwischen Antriebskomponenten, Speicher und Fahrzeuginnenraum zu erzielen, wurden Dimensionierungsberechnungen des geplanten Wärmetauschers mittels eines Wassersystems für verschiedene Komponenten wie Motor, Ventile, Pumpe, Kühler, Boiler, Steuerung, Batterie simuliert. Dabei stellte sich heraus, dass mit den handelsüblichen Bleiakкумуляtoren keine ausreichende Innenraumheizung erzielt werden kann. Da auch der Batteriewärmehaushalt nicht realisiert werden konnte, schien es nicht mehr lohnenswert, an der Optimierung des thermischen Bleibatteriehaushalts zu arbeiten, da andererseits bereits sehr gute Resultate mit dem Einsatz von ABB-Hochenergie-Batterien erzielt wurden.
- Bei detaillierten Untersuchungen des Temperaturverhaltens der ABB-Natrium-Schwefel-Hochenergiebatterien mit ihrer fast vier mal höheren Energiedichte als Bleibatterien zeigte sich, dass deren Einsatz in Leichtmobilen Fahrleistungen ermöglicht, die annähernd denjenigen eines Benzinautos entsprechen. Aus energetischen Gründen ist der Einsatz dieser Batterien aber nur in Fahrzeugen mit hohen Kilometerleistungen sinnvoll (diese Batterien erfordern immer eine Betriebstemperatur von 280 - 350° C).
- Bau von Sicherheitsfahrzeug-Prototypen und Durchführung und Auswertung von *Crashtests* durch die Abteilung Unfallforschung der WINTERTHUR-Versicherung, der DEKRA und der Universität Zürich. Die Ergebnisse dieser verschiedenen *Crashtests* gegen eine Wand bzw. gegen ein doppelt so schweres Fahrzeug zeigen auf, dass die Realisierung eines genügenden Sicherheitsniveaus auch im Leichtbau erreicht werden kann !

#### *d) Vorstudie zur Definition eines Testprogramms für Elektromobile*

Das Ziel dieses Projekts des Ingenieurbüros HOBI in Wetzikon war es, einen konkreten Vorschlag für ein praxisgerechtes und aussagekräftiges Testprogramm zur Ermittlung zuverlässiger und reproduzierbarer Messwerte der Fahrleistungen und speziell der Reichweite von Elektromobilen im praktischen Einsatz aufzuzeigen [4]. Die hierfür durchgeführte schriftliche Befragung bei Elektromobil- und Komponentenherstellern sowie von Prüforganisationen und Fachzeitschriften der Auto- und Elektromobilbranche ergab folgende Ergebnisse:

- Damit Elektrofahrzeuge untereinander verglichen werden können, ist es sinnvoll, standardisierte Testkriterien aufzustellen.
- Quervergleiche zum konventionellen Auto sind sehr erwünscht.
- Für den Konsumenten sollte die realistische Reichweite unter Sommer- und Winterbedingungen ermittelt werden.
- Die Tests sollen ausserdem die Hersteller dazu anregen, die Fahrzeuge auf die Bedürfnisse der Konsumenten abzustimmen.

Daraus entstehen folgende Anforderungen an das Testumfeld:

- Diverse Messungen auf einem modernen Rollenprüfstand.
- Reichweitenmessungen auf Rollenprüfstand bei kalten und warmen Batterien (Raum heiz- und kühlbar auf + 20°, bzw. - 5° C).

Geeignete Prüfstände befinden sich in der EMPA in Dübendorf sowie am Technikum in Biel und werden für die Abgasprüfungen eingesetzt. Die Auslastung ist an beiden Orten hoch und da in Zukunft mit ca. 8 - 12 Fahrzeugtests pro Jahr zu rechnen ist, wird die Erstellung eines neuen Rollenprüfstandes vorgeschlagen.

#### *e) Leichtmobil CH-2000*

Die von der Firma REICHENBACH in Zumikon durchgeführte Vorstudie diente ursprünglich der Vorbereitung eines umfassenden interdisziplinären Vorhabens **Leichtmobil CH-2000** unter Berücksichtigung und Koordination aller bisherigen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet [5]. Ziel war es, die Anträge für ein längerfristiges Forschungsvorhaben mit Zeitbedarf und Finanzrahmen zu erarbeiten und zu definieren. Aus dieser Vorstudie haben sich im wesentlichen folgende Ergebnisse ergeben:

- Innerhalb der schweizerischen Leichtmobilbranche ist ein gut entwickeltes "Leichtmobil-Prototypenbau Know-how" vorhanden.
- Es wurde ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm für ein gesamtökologisch sinnvolles und integral optimiertes Leichtmobil erarbeitet, das zwar ambitiös ist, aber aufgrund des bisherigen Erkenntnisstandes als realisierbar und volkswirtschaftlich sinnvoll bezeichnet werden kann.
- Für die Schweiz besteht die Chance, eine Vorreiterrolle bei der Festlegung von neuen, ganzheitlichen Massstäben im Automobilbau zu übernehmen und so den Prozess einer grossseriellen Fertigung von Leichtmobilen zu beschleunigen.
- Die von der Automobilindustrie laufend angekündigten Bemühungen in Richtung eines gesamtökologisch sinnvollen Leichtmobils werden in Wirklichkeit noch nicht genügend konsequent verfolgt und es sind deshalb von dieser Seite in absehbarer Zeit noch keine konkreten Lösungen zu erwarten.

Zugunsten des in vorbereitungsstehenden **Förderungsprogramms Leichteletromobile** wurde das Projekt Leichtmobil CH-2000 auf die für den Leichtmobilbau erforderlichen Grundlagenforschungen reduziert. Die Arbeiten werden 1993 beginnen.

#### *f) Gemeinschaftlicher Gebrauch von Motorfahrzeugen*

Diese Fallstudie des Planungsbüros PETER MUHEIM & Partner in Luzern hat zum Ziel, neben dem Energiesparpotential Ansätze und Strategien zur Förderung des gemeinschaftlichen Gebrauchs von Motorfahrzeugen (Autoteilet, Taxi, Mietwagen) aufzuzeigen [6]. Die Untersuchung am Modell der AUTO-TEILET Genossenschaft (ATG) führte zu folgenden Ergebnissen:

- Der herkömmliche private Autobesitz verführt zu übermässigem Autoeinsatz. Dagegen bewirkt der gemeinschaftliche Autobesitz (*Car-Sharing*), wie er bei der ATG praktiziert wird, eine verstärkte



Hinwendung zu umweltschonenderen Verkehrsmitteln. Vormalige Autobesitzer reduzierten mit dem ATG-Beitritt ihren Autoeinsatz um 50 %. Dabei wird nur 25 % mit öffentlichen Verkehrsmitteln kompensiert, der Rest entfällt. Die im Verkehr verbrauchte Energie verringert sich um beinahe die Hälfte.

- Selbst Personen, die vor ihrem ATG-Beitritt kein eigenes Auto besaßen, steigern ihren Autogebrauch kaum, ihren Energieverbrauch können sie gar ebenfalls leicht reduzieren.
- Die Mobilitätsbedürfnisse vieler Personen könnten in der Kombination von öffentlichen Verkehrsmitteln und gelegentlichen ATG-Autofahrten sinnvoll und kostengünstig befriedigt werden. Würden alle Personen, für die der Beitritt sinnvoll erscheint, der ATG auch beitreten, so könnte der Energieverbrauch im schweizerischen Verkehrswesen um über 3 % gesenkt werden.
- Bei entsprechender Weiterentwicklung der *Car-Sharing*-Organisationen selbst und einem dafür günstigeren Umfeld kann *Car-Sharing* wesentlich zur Stabilisierung des Energieverbrauchs im Verkehr beitragen. Sollte die für die Schweiz prognostizierte Energieverbrauchszunahme im Autoverkehr allein mit *Car-Sharing* neutralisiert werden, so müssten rund 100'000 Autobesitzer ihr Auto zu Gunsten einer ATG-Mitgliedschaft aufgeben beziehungsweise sich dank ATG keines anschaffen.

#### *g) Entwicklung eines Einzelladegerätes für Elektromobile*

Dieses Projekt musste infolge Konkurs des Projektnehmers ergebnislos abgebrochen werden.

### **LAUFENDE PROJEKTE**

#### *a) Radoptimierung für Leichtfahrzeuge*

Das seit 1991 laufende Projekt der Arbeitsgemeinschaft HORLACHER-BUCHER-ESORO in Möhlin umfasst die Optimierung von Felge und Reifen für Leichtfahrzeuge bis zu einem Maximalgewicht von 900 kg [7]. Im Rahmen dieses Projektes werden Räder und Reifen auf die speziellen Bedürfnisse von Leichtfahrzeugen optimiert. Das Projektziel ist es, optimierte Räder und Reifen zu angemessenen Preisen auf den Markt zu bringen. Im Jahre 1991 wurden verschiedene Werkstoffe und Herstellverfahren für leichte Felgen untersucht, mehrere Reifenvarianten speziell entwickelt und an den Dimensionen 16" und 17" ausgetestet. Mit Hilfe dieser Resultate wurde 1992 eine 15"-Leichtmetall-Druckgussfelge und der dazugehörige Radial-Gürtelreifen entwickelt. Dabei wurden unter anderem folgende Ergebnisse erzielt:

**Reifen :** Komforteigenschaften sind kaum noch von denjenigen handelsüblicher KFZ-Sommerreifen zu unterscheiden. Bezüglich Gewicht konnte das Ziel von 2,8 kg nicht erreicht werden, da der Reifen aus Sicherheitsgründen und zur Vergrößerung der Tragfähigkeit von 100 auf 110 mm verbreitert werden musste.

**Felge :** Hinsichtlich der Formgebung zog man das Scheibenrad dem Speichenrad aus Gründen der Teileeinfachheit vor.

#### *b) Batteriebetriebenes Elektromotorfahrzeug*

Dieses Projekt von P. EBERLI in Colombier umfasst die Optimierung des batteriebetriebenen Elektromotorfahrrades "Scoot 92" für die tägliche Anwendung im Nahverkehr z.B. für den täglichen Arbeitsweg, für Haushaltseinkäufe oder für die Innerortspostverteilung [8]. Folgende Arbeiten wurden bereits ausgeführt:

- Nach der Erstellung der Gesamtkonzeption und dem Einkauf der aus vorhandenen Benzinmotorfahrrädern übernehmbaren Bauteile im Jahre 1991 konnte in diesem Jahr die Montage des Elektrofahrrades vorgenommen werden.
- Erste Testfahrten verliefen zufriedenstellend. Es zeigte sich aber, dass der verwendete Motor die erhoffte Höchstleistung noch nicht erreicht.
- Durch eine Verzögerung bei der Rücklieferung des Elektromotors aus Thailand (wo es als Muster für ein umweltfreundliches Nahverkehrsfahrzeug ausgestellt wurde) konnte die vorgesehene Homologisierung beim Eidg. Polizeidepartement in diesem Jahr nicht mehr wie vorgesehen stattfinden.

Da die vorgesehene Testreihe erst nach erfolgter Abnahme des Fahrzeuges stattfinden kann, verzögert sich das Projekt gegenüber dem vorgesehenen Zeitplan.

**c) Optimierung des Asynchronantriebs für Leichtfahrzeuge**

Dieses bis Ende 1993 dauernde Projekt der Firma BRUSA in Gams umfasst die Realisierung eines optimierten und kostengünstigen Drehstrom-Antriebsystems für Elektro-Leichtfahrzeuge [9]. Folgende Arbeiten wurden in diesem Jahr durchgeführt:

- Mit Hilfe eines eigens für diesen Zweck entwickelten Computerprogrammes wurden aufgrund des Ersatzschaltbildes des Motorenherstellers sowie weiterer wirkungsgradbestimmender Grössen der optimale Schlupf für verschiedene Belastungen und Drehzahlen von mehreren Asynchronmotoren bestimmt.
- Der optimale Schlupf wurde für verschiedenste Motoren in Stern-Dreieck-Schaltung, 120V/140V Batteriespannung, bei verschiedenen Belastungen und Drehzahlen auf einem Prüfstand ermittelt.

**d) Entwicklung des Reluktanzmotors für den Einsatz im Elektrofahrzeug**

Das Ziel dieses Forschungsprojektes der Firma BRUSA ist die Realisierung eines Direktantriebs für Elektrofahrzeuge, d. h. die Räder werden direkt von einem Motor, ohne Getriebe und Differential angetrieben [10]. Dadurch wird die Gesamtkonstruktion des Elektroantriebs bei gutem Wirkungsgrad erheblich vereinfacht, woraus vor allem auch wesentliche Kosteneinsparungen erwartet werden. Dabei wurden in diesem Jahr folgende Arbeiten durchgeführt:

- Es wurde eine Testeinrichtung aufgebaut, die zur Messung des Stillstand-Drehmomentes eines Reluktanzmotors diene. Es wurde damit auf einfache Weise möglich, den Einfluss verschiedener Parameter wie Zahnform, Zahngrösse, Luftspalt usw. auf das Drehmoment zu untersuchen.
- Aufgrund von Messungen an der aufgebauten Testeinrichtung konnte die Motorkonstruktion betreffend dieser verschiedenen Parameter optimiert werden.

**e) Ökomobil Hybrid III B**

Dieses bis Ende 1995 dauernde Vorhaben von 8 ETHZ-Instituten umfasst die Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines umweltschonenden Antriebskonzeptes für das Ökomobil Hybrid III B mit geringem Energieverbrauch und minimalen Emissionen [11]. Folgende Arbeiten wurden bis anhin ausgeführt:

- Auswahl und Bestellung eines geeigneten Verbrennungsmotors, eines VW 1,3 l-Benzinmotors mit Dreiwegkatalysator, Einzelzylindereinspritzung, Höchstleistung von 53 kW bei Drehzahl 100/s. Der Benzinmotor mit Katalysator ist seit September 1992 betriebsbereit auf dem Stationärprüfstand.
- Die ersten Berechnungen bezüglich Schwungradteil bedingten aus anfänglich nicht ersichtlichen Gründen eine völlige Umstrukturierung.
- Der Konzeptentwurf des 7-teiligen Getriebegehäuse konnte abgeschlossen werden.
- Bezüglich Hydraulik und Wärmehaushalt wurden verbindliche Randbedingungen gesetzt.
- Studium und Optimierung der Fahrzeug-Regelstrategien, insbesondere von verschiedenen Umschaltstrategien des stufenlosen Getriebes anhand von Modellrechnungen.

Die aufgetretenen Konstruktionsprobleme bei Schwungradgruppe, Getriebe und Hydraulik führen gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan zu einer erheblichen Verzögerung.

**f) Moderne Luftschiffe**

Diese Anfangs Jahr von der EWI in Zürich begonnene Vorstudie **energiesparende Alternative für ausgewählte Transportbedürfnisse in der Schweiz** sollte ursprünglich bis Ende 1992 abgeschlossen werden. Infolge gesundheitliche Probleme ist aber der eigentliche Start des Projektes verzögert worden.

**g) Hybridfahrzeug OMEGAZ**

Dieses bis zum Frühling 1993 dauernde Projekt der ETH Lausanne umfasst die Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines **Benzin-Erdgas-Hybridfahrzeuges** mit den Brennstoffen Benzin und komprimiertem Erdgas [12]. Als Ausgangsfahrzeug dient der RENAULT-EXPRESS Lieferwagen mit dem Serienmotor des RENAULT CLIO 1.4. Dabei soll dieser Benzinmotor auf Zweibrennstoffbetrieb umgebaut werden und mittels einer elektronischen Steuerung optimal betrieben werden, so dass minimale Energieverbräuche und Schadstoffwerte resultieren. Folgende Arbeiten wurden bis anhin ausgeführt:

- Aufbau eines Prüfstandes zur Messung verschiedenster Kennwerte des ausgewählten Motors.

- Einsatz und Test von vier verschiedenen Systemen zur Gasversorgung des Motors.
- Praxistests mit drei hybridbetriebenen Fahrzeugen.

#### ***h) Nickel-Hybrid-Batterien für ein Elektromofa***

Dieses bis Mitte März 1993 dauernde und von S. KAISER in Zürich durchgeführte Projekt umfasst den Einsatz eines Nickel-Hydrid-Akkus als Energiespeicher in einem Elektromofa [13]. Der Ruf nach immer leistungsfähigeren Energiespeichern vor allem von Seiten der Mikroelektronik mit ihren zahlreichen portablen Anwendungen führte dazu, dass dieser Nickel-Hydrid-Akku bis zur Serienreife entwickelt wurde und nun in diesem Pilotversuch erstmalig in einem Elektromofa eingesetzt werden kann. Bis anhin konnten folgende Arbeiten durchgeführt werden:

- Evaluation eines Batterietyps, der sowohl hochstromfähig ist als auch gute Kapazitätseigenschaften besitzt.
- Mit Hilfe der Infrastruktur der ETH-Zürich wurde ein Batterieprüfstand aufgebaut, auf dem mehrere Zellen mit verschiedenen Ladeverfahren getestet werden konnten.
- Nach der Entwicklung der ganzen Elektronik konnte zur Realisierung der Kleintraktionsbatterie geschritten werden.

Die noch ausstehenden Versuche mit dem Elektromofa werden zeigen, ob sich diese neue Batterietechnologie im harten Alltagseinsatz bewähren kann.

#### ***i) Mechanische Komponente für Leichtmobile***

Das bis Ende 1993 dauernde Projekt der ARGE HORLACHER-BUCHER-ESORO umfasst die Optimierung von mechanischen Komponenten auf die speziellen Bedürfnisse von Leichtfahrzeugen [14]. Ziel des Projektes ist es, die jahrelangen Erfahrungen mit mechanischen Komponenten für Leichtmobile weiterzuführen. Das Projekt gliedert sich in zwei Teile: Weiterentwicklung der bewährten Teile und Neuentwicklung der kritischen Komponenten sowie in die Umsetzung der dabei erreichten Resultate hin zu einer kostengünstigen, umweltgerechten und energieoptimierten Serienfertigung. Folgende Arbeiten wurden in diesem Jahr ausgeführt:

- Einschränkung des Anwendungsbereichs aufgrund bekannter Kriterien, dem technischen Stand der Leichtmobilentwicklung sowie sich abzeichnender Trends.
- Spezielle Dimensionierung und geometrische Optimierung der meisten Komponenten auf die in einem Leichtfahrzeug auftretenden Belastungen.
- Austestung und Abmessung eines kompletten Fahrwerkes.

### **3. Zusammenarbeit**

Auf nationaler Ebene wurde vor allem die fachliche und technische Zusammenarbeit mit den BEW-Programmen Treibstoffe, Leichteletromobile, und DIANE gepflegt.

Auf internationaler Ebene befassen sich mit dem Gebiet "Energie und Verkehr" vor allem die Internationale Energie Agentur (IEA) und die Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung (COST). Die notwendigen Kontakte sind hergestellt.

### **4. Geplante Forschungsarbeiten 1993**

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

- Aufgrund der Projektvorstudie LEICHTMOBIL CH-2000 sowie den Ergebnissen eines im September 1992 durchgeführten BEW-Seminars werden Zusammenarbeit mit anderen massgeblichen Bundesämtern

(BUWAL, Dienst für Gesamtverkehrsfragen, Bundesamt für Polizeiwesen usw.) die folgenden Projekte eingeleitet:

- Nominierung, Vorschriften und Gesetze im Bereich Leichtmobil
- Design- und Konzeptstudie für Leichtmobile
- Marktuntersuchung sowie Motivations- und Kommunikationskonzepte für Leichtmobile
- Umweltverträglichkeit der Leichtmobile, bestehend aus den Teilprojekten
  - . Gesam ökologische Grob beurteilung verschiedener Antriebssysteme
  - . Bewertung des optimalen Leichtmobil-Konzeptes bezüglich Antrieb und Konstruktionsmaterialien
  - . Umweltverträglichkeitsanalyse für Konstruktionsmaterialien
  - . Untersuchung über Konstruktionsmaterialien und Konstruktionskonzepte für ein serientaugliches Leichtmobil
- Studie Luftschiffe: Eine energiesparende Alternative für ausgewählte Transportbedürfnisse in der Schweiz
- Folgestudien Swissmetro
- Leichthybridmobil mit Verbrennungsmotor
- Konzept, des Einsatzbereich und Auswirkungen eines umweltfreundlichen Nahverkehrsmittels

## 5. Liste der Projekte

- [1] F. L. Perret, J. D. Favrod, M. Jufer, LEME + ITEP / EPFL - Lausanne: *SWISSMETRO (Objectifs de l'étude principal SWISSMETRO 1992 )*
- [2] W. Janach, ZTL, Horw: *Verbrauchsarmes Leichtautomobil mit Erdgas-Magermotor.* (JB)
- [3] M. HORLACHER, Möhlin: *Elektro-Leichtfahrzeug-Modellfamilie.* (SB)
- [4] H. HOBI, Wetzikon: *Testprogramm Elektromobile: Messung und Vergleich der Fahrleistungen von Elektromobilen unter standardisierten Bedingungen.* (SB)
- [5] E. Meyer, REICHENBACH, Zumikon: *Projektvorstudie Leichtmobil CH-2000.* (SB)
- [6] P. Muheim, Planungsbüro MUHEIM, Luzern: *Das Energiesparpotential des gemeinschaftlichen Gebrauchs von Motorfahrzeugen.* (JB)
- [7] T. Amacher, HORLACHER, Möhlin: *Räder und Reifen für Leichtfahrzeuge.* (JB)
- [8] P. Eberli, Colombier: *Batteriebetriebenes Elektrofahrrad.* (JB)
- [9] J. Brusa, BRUSA ELEKTRONIK, Gams: *Der Asynchronantrieb im Elektro-Fahrzeug.* (JB)
- [10] J. Brusa, BRUSA ELEKTRONIK, Gams: *Der Reluktanzmotor als Direktantrieb im Elektrofahrrad.* (JB)
- [11] K. Eberle, ETH Zürich: *Ökomobil Hybrid III - ein umweltschonendes Antriebskonzept.* (JB)
- [12] D. Favrat, LENI /EPFL - Lausanne: *OMEGAZ: Optimisation d'un moteur à essence commutable au gaz naturel comprimé.* (JB)
- [13] S. KAISER, Zürich: *Nickel-Hybrid-Versuchsbetrieb mit Elektromofa.* (JB)
- [14] T. Amacher, HORLACHER, Möhlin: *Mechanische Komponenten für Leichtmobile.* (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

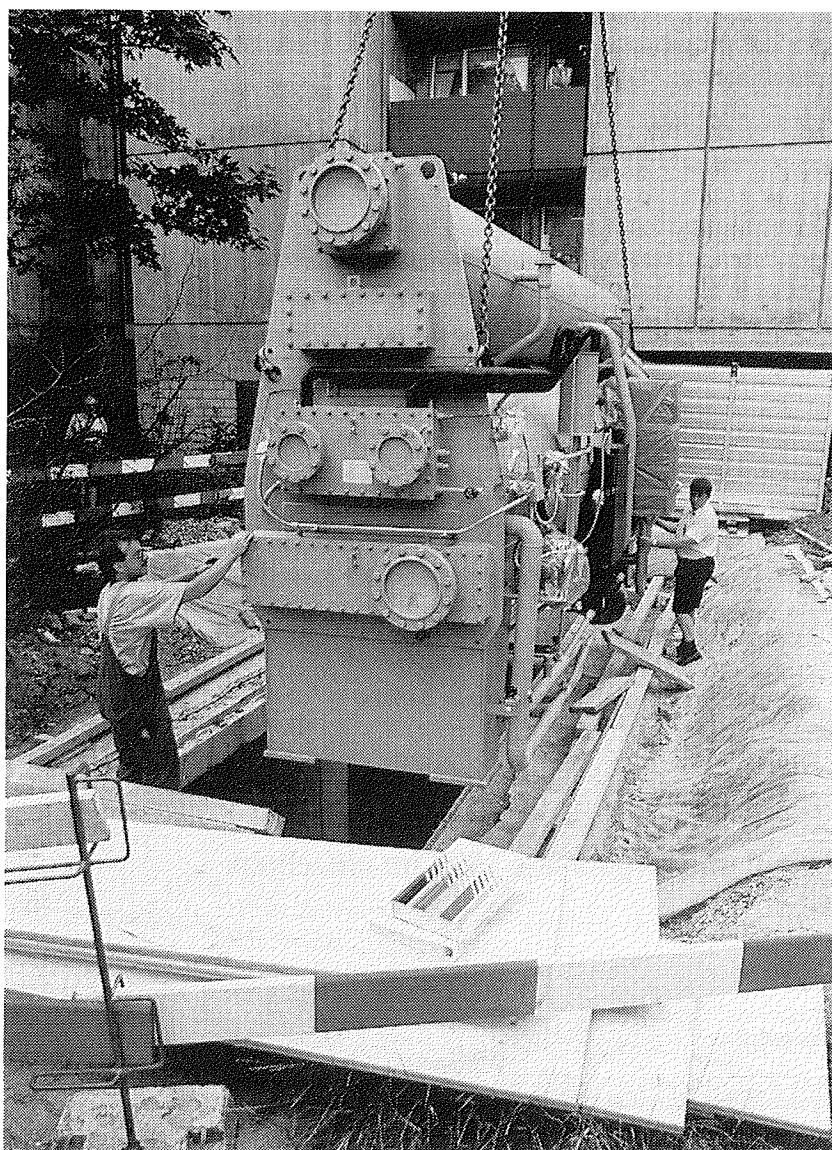
(SB) Schlussbericht vorhanden

# UMGEBUNGS- & ABWÄRMENUTZUNG, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter : Ulrich Schärer

---



## Absorptions-Wärmepumpe

Die erste grosse Absorptions-Wärmepumpe der Schweiz wird in ein Sanierungsobjekt in Brugg eingebaut. Die gewonnenen Erfahrungen sollen Impulse für die vermehrte Anwendung dieser Technologie auslösen.

## 1. Programmziele

Auch das neue Vierjahresprogramm 1992 - 1995 soll den bisher verfolgten Zielen dienen: Der Verbesserung der Technologien zur Verwertung von Umwelt- und Abwärme und damit zu deren vermehrter Nutzung - einem der Hauptanliegen auch der Aktionsgruppe Regenerierbare Energien (AG R) des Programms ENERGIE 2000.

Konkrete Ziele sind: Erstens eine Verbesserung der Leistungszahlen von Wärmepumpen resp. der Nutzungsgrade von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) und Wärmerückgewinnungssysteme (WRG) zur Senkung der Betriebskosten, zweitens die Verminderung oder mindestens Stabilisierung der Investitions- und damit Kapitalkosten der in Frage kommenden Systeme.

Sowohl das Programm als Ganzes als auch einzelne Projekte wurden im Berichtsjahr von einer internationalen Expertengruppe unter die Lupe genommen und positiv gewürdigt. Für den Programmleiter und auch die Projektleiter ergaben sich aus den geführten Gesprächen wichtige Rückmeldungen - und nicht zuletzt eine Bestätigung der eingeschlagenen Richtung.

### BEITRÄGE 1992 ZU DEN ZIELEN IM ÜBERBLICK

- Verbesserung der Jahresarbeitszahl "konventioneller" Wärmepumpensysteme durch bessere Komponenten, optimal dimensionierte und betreibbare Anlagen weiter anvisiert; substanzielle Fortschritte in den nächsten zwei bis drei Jahren zeichnen sich ab.
- Werkzeuge zur optimalen Dimensionierung und Betriebsweise von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) erarbeitet ;
- Die sich aus dem notwendigen Ersatz von Chlorierten Fluor-Kohlenwasserstoffen (CFKW) als Kältemittel ergebenden Konsequenzen auf die Konstruktion neuer Wärmepumpen abgeklärt, praktische Schwierigkeiten der Umrüstbarkeit bestehender untersucht;
- Weitere Betriebserfahrungen mit Stirling-WKK gesammelt;
- Die Zusammenarbeit mit der Industrie und der Energiewirtschaft konsolidiert und um konkrete Projekte ausgebaut.

*Die Jahresziele konnten damit grösstenteils erreicht werden.*

## 2. Arbeiten und Ergebnisse 1992 im einzelnen

### WÄRMEPUMPEN

#### a) Bereich Wärmequellen :

Im Vordergrund der Wärmequellen stand weiterhin die mit vertikalen Sonden bis etwa 120 m Tiefe erschlossene Erdwärme (auch etwa "untiefe Geothermie" genannt) - eine wegen ihrer relativ hohen und wenig schwankenden Temperatur hervorragende Wärmequelle. Erdwärmesonden werden in der Schweiz denn auch immer wichtiger, so dass der Bedarf an zuverlässigen Dimensionierungskennndaten gross ist.

Die Untersuchungen des Kantons Bern über die gegenseitige Beeinflussung mehrerer in Sondenfeldern angeordneter Erdwärmesonden [1] an der Versuchsanlage bei der HTL Burgdorf wurden weitergeführt. Gleichzeitig mit der Erfassung des Temperaturgradienten-Verlaufs können auch verschiedene Sonden-Bauarten ausgiebig getestet werden. Ergebnisse werden Dimensionierungsrichtlinien und -kennzahlen für solche Sondenfelder sein. Diese können vermehrt Bedeutung für Wärmepumpen höherer Leistung (für Wärmekollektive

oder grössere Bauten) erlangen, zudem aber auch Informationen für die Auslegung von kombinierten Heiz- und Kühlanlagen liefern. Das neu beschlossene Forschungsprogramm **Geothermie/Speicherung** wird davon profitieren können.

Noch offene Fragen bei den Erdwärmesonden selber resp. ihrer längerfristig stabilen Einbettung in den Untergrund sind angegangen: In einem Vorprojekt wurde nach grundsätzlich möglichen, ökologisch und thermisch geeigneten Optionen zu den heute verwendeten Wasser-Glykol-Gemischen als **Wärmeträgerflüssigkeit** gesucht [2], ebenso erste Überlegungen zu **langzeitstabilen Sonden hinterfüllungen** angestellt [3] und schliesslich der **Einfluss der Sondengeometrie** auf die Entnahmeleistung vorerst theoretisch untersucht - dies mit dem Ziel der technisch/wirtschaftlichen Optimierung [4].

Da immer wieder die Forderung auftaucht, Erdwärmesonden seien auch als Direktverdampfer zuzulassen, wurde der Auftrag erteilt, ein **Sicherheitssystem zur Zurückhaltung von Kältemittel** auf seine Tauglichkeit hin zu überprüfen [5].

Die positiven Ergebnisse bei der früher vorgestellten Anlage mit einem **Schotterkoffer** unter dem Hausfundament als **Wärmequelle** für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe haben zur Untersuchung einer weit grösseren Anlage ermutigt [6].

#### *b) Wärmepumpensystem / Komponenten / Betriebsoptimierung :*

Verdampfer sind für das optimale Funktionieren von Wärmepumpen von grosser Bedeutung. Die richtige Dimensionierung ist wegen der darin stattfindenden Phasenwechsel schwierig - vor allem wenn Teillasten zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus ist ein grosses Bedürfnis nach vertiefter Kenntnis des Verhalten neuer Kältemittel vorhanden. Deshalb und zur gleichzeitigen Untersuchung von **besseren Austauschflächen dieser Wärmetauscher** wurde ein grösseres Messprojekt auf einem neuen Versuchsstand der EPFL gestartet [7].

Zwei der im letzten Jahresbericht erwähnten Dimensionierungswerkzeuge für Wärmepumpen sind nun abgeschlossen. Das **Simulationsprogramme HPDesign** [8], das nicht nur das System als Ganzes beschreibt, sondern auch die einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel im Betrieb modelliert, sichert eine optimale Dimensionierung von Wärmepumpen mit Luft oder Wasser als Quelle und Wärmesenke - auch mit neuen Kältemitteln. Das zweite abgeschlossene Projekt befasst sich mit systematischen Messungen einer **drehzahlregelten Wärmepumpe** (mit Scroll-Kompressor) und deren Modellierung [9] mit dem Ziel, die geeigneten Komponenten (Kompressoren, Expansionsorgane) und **Regelstrategien** identifizieren zu können. Mit stufenlos regelbaren Wärmepumpen ist prinzipiell eine höhere Arbeitszahl erreichbar. Beide Modelle sind als PC-Programme erhältlich und wurden bei mehreren Gelegenheiten der Öffentlichkeit vorgestellt.

Dem gleichen Ziel der Drehzahlvariation diene das vom NEFF und der KWF finanzierte und nun abgeschlossene Projekt **Wärmepumpenoptimierung** [10]. Mit ihm wurden die für eine stufenlose Drehzahlregelung am besten geeigneten, auf dem Markt erhältlichen Kompressoren mit gutem Teillastverhalten evaluiert.

Der erste Teil (Wärmepumpen) des vor allem zu Ausbildungszwecken in Arbeit befindlichen **Auslegungsprogramms für Wärmepumpen und WKK** unter Berücksichtigung dynamischer Betriebszustände ist abgeschlossen [11] und wurde in einem Pilotkurs RAVEL bereits erfolgreich getestet. Der Teil WKK wird nun bis Mitte 1993 erarbeitet und eingefügt.

Ebenfalls abgeschlossen wurde das **Expertensystem zur präventiven Wartung** [12] von Wärmepumpen. Mit seiner Hilfe können die Unterhaltskosten grösserer Wärmepumpenanlagen minimal gehalten werden. Insbesondere Gasmotor-Wärmepumpen werden hoffentlich davon profitieren können. Die in einem Projekt gesammelten **Praxiserfahrungen** [13] mit solchen Wärmepumpen zeigen nämlich deutlich auf, dass deren Motoren in der Regel viel zu oft Störungen aufweisen. Nicht zuletzt auch bessere Planungsregeln, die zusätzlich auf der **Analyse und Bewertung von Betriebsstörungen** von Gasmotoren für Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen [14] beruhen, sollen Abhilfe schaffen.

Für die Praxis wichtige Erkenntnisse über die **Umrüstbarkeit** bestehender, bisher mit **R12** betriebener **Wärmepumpen auf R 134a** liefert ein abgeschlossener Versuch. Der Beweis, dass ohne allzu hohe Kosten und bei etwa gleichbleibender Leistungszahl auf dieses Kältemittel und ein damit verträgliches Öl umgestellt werden kann, wurde dabei erbracht [15]. In einem Anschlussprojekt wird nun auch die **Umstellung von R502 auf das Gemisch HP-81** getestet [16].

Die bisher geschilderten Projekte beschäftigen sich ausschliesslich mit der Verbesserung konventioneller Kompressions-Wärmepumpen. Im Berichtsjahr konnte nun im Rahmen des vorliegenden Programms erstmals auch ein Projekt zur Untersuchung von **Absorptionsanlagen** aufgenommen werden [17]: Messungen an fünf in Einfamilienhäusern eingesetzten Prototypen der Diffusions-Absorptionswärmepumpe (DAWP) bestätigen, dass eine Heizzahl von 1,5 im praktischen Betrieb erreichbar ist.

Für Wärmepumpen-Warmwasser-Erwärmer als **Ersatz von Elektroboilern** besteht ein grosses Potential. Eine günstige Jahresenergiebilanz ist u.a. vom richtigen Aufstellungsort abhängig. Ein Messprojekt an verschiedenen Anlagen gibt dazu die notwendigen Planungshinweise [18].

Eine lebhafte Diskussion ist über Vor- und Nachteile von Wärmepumpen mit **Direktverdampfer-Erdkollektoren im Vergleich mit konventionellen Systemen** (Zwischenkreislauf) entstanden. Um Klarheit mindestens über die praktisch erreichbaren Energiebilanzen zu erhalten, wurde eine Vergleichsmessung zwischen diesen beiden Systemen in Auftrag gegeben [19].

## WÄRME - KRAFT - KOPPLUNGSANLAGEN (WKK)

Die Frage, wie der Strom für die im Rahmen von ENERGIE 2000 kräftig zu fördernden elektrischen Wärmepumpen bereitgestellt werden kann, ohne insgesamt mehr fossile Energien zu verbrauchen und damit mehr CO<sub>2</sub> zu erzeugen, kann unter anderem so beantwortet werden: Bau der entsprechend benötigten Anzahl dezentraler WKK. Diese Überlegung steckt hinter den F+E-Arbeiten an diesen Technologien.

So auch des weiterhin in Arbeit befindlichen **Expertensystems zur präventiven Wartung** und Alarminterpretation [20]. Ziel: Minimierung der Wartungskosten und Erhöhung der Verfügbarkeit von WKK (analog dem Expertensystem Wärmepumpen [12]).

Der systematischen Suche und Gewichtung derjenigen Faktoren, welche beim Betrieb von WKK unter dynamisch ändernden Bedingungen wesentlich sind, ist das Projekt **Dynamische Betriebsweise von WKK-Anlagen** [21] gewidmet. Ziel ist die Gewinnung von Informationen, mit denen u.a. die richtigen Steuer- und Regelstrategien abgeleitet werden können.

Die Stirling-Maschinen als grundsätzlich interessante Optionen zu konventionellen Verbrennungsmotoren sind leider noch immer Sorgenkinder. Die V160-Maschine am Schweiz. Institut für Berufspädagogik (SIBP) wurde zwar trotz allem noch nicht ganz aufgegeben: Sie ist gegenwärtig beim deutschen Lizenznehmer in Grossrevision. Hoffentlich kann im nächsten Jahr über die vorgesehenen Tests doch endlich Gutes berichtet werden.

Die Feuerungsoptimierung am System **Holzschnitzel/Stirling-Heissluft-Motor** am Ökozentrum Langenbruck [22] verlief bisher erfolgreich. Eine gravierendere Motorenhavarie hat nun aber einen Abschluss der Untersuchung verhindert. Das Ökozentrum verfügt ebenfalls über einen **Freikolben-Stirling** (Nennleistung 300 W), der systematisch getestet wird mit dem Ziel, mögliche Schwachpunkte bei einem allfälligen *Upscaling* auf Leistungen von bis zu 3 kW zu vermeiden [23].

Ebenfalls auf dem Stirling-Prozess beruht die an der Ingenieurschule Bern geborene Idee für ein **CFKW-freies Kälteaggregat** (für Kühlschränke). Anstelle der bei konventionellen Kolben-Stirling-Maschinen einen eindeutigen Schwachpunkt darstellenden mechanischen Dichtungen werden rotierende Verdränger (resp. Arbeits-"Kolben") mit Flüssigkeitsring-Dichtungen entwickelt [24].

Zusammenfassend muss jedoch immer noch festgestellt werden, dass die **Stirling-Entwicklung** nach wie vor in der Schwebe und ziemlich undurchsichtig bleibt. Daran hat auch eine **Analyse der Situation** grundsätzlich nichts ändern können [25].

## WEITERE BAUSTEINE FÜR GESAMTSYSTEME

Die Pilotphase von **DYNATHERM** [26] lässt hoffen, dass wir recht bald eine zuverlässige Methode für die Charakterisierung der Dynamik von Energiesystemen haben werden. Aufgrund von Kurzzeitmessungen und darauf aufbauend - durch Simulationen - die Voraussage des Langzeitverhaltens (Energiebilanzen) unter ändernden Lastbedingungen sollen zuverlässig möglich werden. Dies ist im Hinblick auf die notwendige



Erfolgskontrolle bei P+D-Anlagen, aber auch zur Betriebsoptimierung und Sicherstellung qualitativ hochstehender Wärmesysteme, sehr bedeutungsvoll.

Zu ebenso guten Hoffnungen Anlass gibt das nun kurz vor Abschluss stehende Projekt *Simulation dynamique du comportement d'un réseau de chauffage à distance* [27]. Es wird ein praxisgerechtes Werkzeug zur besseren Beherrschung der zeitlich ändernden Leistungen von Fernwärmenetzen - auch konventioneller mit beispielsweise Kehrlichtverbrennungsanlagen - liefern. Ziel ist dabei die Minimierung von Systemverlusten durch optimale, den momentanen Wärmebedürfnissen entsprechende Betriebsführung.

Grössere Industriebetriebe mit bedeutendem Prozesswärme-Bedarf haben ein ganzes Netz von wärmetauschenden Apparaten - mit den zugehörigen Transportleitungen und Wärmetauschern für Wärmeabgabe und -aufnahme. In deren richtiger Anordnung liegen beträchtliche Sparpotentiale. Ein Schlüssel zu deren Realisierung stellt die Planung mit der sogenannten *PINCH-Technologie* dar. An der EPFL wurde dazu ein PC-taugliches Planungswerkzeug für kontinuierliche Prozesse entwickelt und bereits in der Industrie eingeführt. Eine Ausweitung auf diskontinuierliche Prozesse ("Batch-Prozesse") drängte sich auf und wurde in Angriff genommen [28].

**Platten-Wärmetauscher** sind wirtschaftlich und vom *Handling* her vielfach interessante Optionen zu beispielsweise Röhren-Wärmetauschern. Besonders über die Wärmeübergänge im Umschlagbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung weiss man jedoch noch relativ wenig. Bestehende Wissenslücken zu schliessen hat das Projekt *Etudes expérimentales et théoriques des échangeurs de chaleur à plaques* [29] zum Ziel. Vorerst werden nur Flüssigkeiten untersucht, es ist aber durchaus denkbar, dass in einer späteren Phase auch die speziellen Übergangsphänomene bei Phasenwechsel flüssig/gasförmig untersucht werden (Verdampfer, Kondensatoren für Wärmepumpen und Kälteanlagen).

Da diese Lösungen noch einige Zeit auf sich werden warten lassen, wird mit dem Projekt zur Optimierung von Verdampfern und Kondensatoren bei **Lösungsmittel-Rückgewinnungsanlagen** [30] ganz pragmatisch vorgegangen: An der HTL Biel wird eine von der Industrie entwickelte Anlage systematisch ausgemessen und optimiert.

Als Alternative zu herkömmlichen Wäschetrocknungssystemen könnte eine **geregelter Ventilation und Heizung von Trockenräumen** wesentliche Energieeinsparungen bringen. Diese Idee wird in [31] durch Simulationen und anhand eines konkreten Falles untersucht.

Das auch bereits im letzten Jahresbericht vorgestellte Projekt mit einer **Grundwasser-Absorptions-Wärmepumpe** (thermische Leistung 870 kW, siehe Frontbild) hat im Bau Verzögerungen erlitten, ist aber nun für Messungen bereit [32].

### 3. Umsetzung der Ergebnisse

Viele der vorgestellten Projekte konnten im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Bei jedem von ihnen stellt sich natürlich das Problem der wirkungsvollen, raschen Einführung in die Praxis. Selbstverständlich stehen die Berichte jedermann zur Verfügung. Sie werden vermutlich aber nur ausgewertet, wenn sie verständlich geschrieben und rasch interpretierbar sind. Ähnliches gilt natürlich auch für die in Form von EDV-Programmen vorhandenen Werkzeuge: Sie müssen benutzerfreundlich, transparent und rasch sein. Daran wird noch intensiv gearbeitet werden müssen. Idealziel wäre ein Gesamtpaket - wenn möglich verbunden mit Gebäudemodellen - das die gesamtheitliche Auslegung haustechnischer Anlagen erlauben würde. Die verschiedenen laufenden (RAVEL) oder in Vorbereitung befindlichen Aus- und Weiterbildungskurse sind dann das Vehikel zur raschen Einführung in die Berufspraxis. Sie sollen konsequent genutzt werden.

Im November haben wir ein von rund 200 Teilnehmern besuchtes Seminar mit dem Titel **Wärmepumpen und WKK - Integration komplexer Haustechnik in Gebäuden** veranstaltet. Neben der Vorstellung der Projekte [8], [11] und des **Simulationscodes YUM** sind wir mit Gebäudespezialisten und Regelfirmen näher ins Gespräch gekommen, um mittelfristig die oben erwähnte Integration der verschiedenen Modelle zu erreichen.

Einen wesentlichen Impuls zur Einführung neuer Wärmepumpen hoher Qualität in den Markt versprechen wir uns besonders von den Aktivitäten der **Fördergemeinschaft Wärmepumpen FW**. Sie hat einen Wettbewerb zunächst für kleine **Kompaktwärmepumpen** zum Einbau in Heizungsrückläufe lanciert. Die Industrie wird ihre hohen Anforderungen entsprechenden Neuentwicklungen auf dem kurz vor Betriebsaufnahme stehenden Test-

und Ausbildungszentrum in Töss bei Winterthur prüfen lassen und allfällig notwendige Optimierungsmaßnahmen direkt dort vornehmen können.

Verstärkt werden muss die aktive Förderung von P+D-Anlagen. Gegenüber den im letzten Jahresbericht aufgeführten Anlagen konnten im Berichtsjahr mangels guter Vorschläge keine weiteren lanciert werden.

#### 4. Internationale Zusammenarbeit

Sie hat weiterhin vor allem im Rahmen des *Implementing Agreement on Advanced Heat Pumps* der Internationalen Energieagentur IEA stattgefunden. Neuen Projekten sind wir allerdings im Berichtsjahr nicht beigetreten. Diejenigen, an welchen wir beteiligt sind (Erfahrungen mit neuen Kältemitteln in Verdampfern, *Working Fluid Safety*), haben noch keine Zwischenergebnisse, über die berichtet werden könnte. Der "Strategieplan 1999" des IEA Programms ist inzwischen in Kraft gesetzt, und erste Aktivitäten vor allem im Informationsbereich sind angelaufen. Die letztes Jahr begonnene Mitwirkung im *IEA Heat Pump Centre (HPC)*, einem Informations- und Analysezentrum für Wärmepumpen-Forschung, -Entwicklung und -Promotion, lässt sich erfreulich an - obwohl der Nutzen für unsere Aktivitäten mindestens heute noch schwer messbar ist. Partner in der Schweiz für das HPC - und Betreuer des sogenannten *National Team* - ist INFOENERGIA Bellinzona.

Von der EG-Promotionsgruppe Wärmepumpen wurden wir zur Präsentation unserer Aktivitäten eingeladen. Die mit unserem Förderprogramm verfolgten Ziele und Absichten wurden mit grossem Interesse aufgenommen, und wir wurden gebeten, in der Gruppe weiterhin mitzumachen.

#### 5. Geplante Arbeiten 1993

Neben den weiter laufenden Projekten besteht im nächsten Jahr leider nur ein enger Spielraum für die Lancierung neuer Vorhaben. Wir werden uns auf die Vertiefung der bereits angefangenen Themen konzentrieren und das Zusammenfügen einzelner Module zu einem Praxiswerkzeug etwas zurückstellen müssen. Die zu bremsenden Aktivitäten 1993 werden immerhin dem neuen Leiter des Programms ab 1. Mai 1993 eine leichtere Übernahme erlauben, ihm Zeit geben, "sein" Programm vorzubereiten - und es mit dem neuen Programm Geothermie / Speicherung abzustimmen.

#### 6. Liste der Projekte

- [1] Kanton Bern : *Thermoprogramm Erdsonden*. Informationen erhältlich beim Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern
- [2] R. J. Hopkirk, POLYDYNAMICS, Zürich: *Wärmeträgerflüssigkeiten in Erdwärmesonden*. (SB) \*
- [3] R.J. Hopkirk, POLYDYNAMICS, Zürich: *Vorbereitung eines Experimentes zur Untersuchung von Hinterfüllungen für Erdwärmesonden-Bohrungen*. (SB)
- [4] W.J. Eugster, R.J. Hopkirk, POLYDYNAMICS, Zürich: *Einfluss von Sondengeometrie auf die Heizanlagenleistung*. (SB)
- [5] F. Koller, ETH - Zürich : *Sicherheitserdsonden für Wärmepumpen-Erdwärmesysteme mit Direktverdampfung*. (JB)
- [6] A. Reichlin, EKZ-Energieberatung, Zürich: *Messprojekt Schotterkoffer EKZ-Filiale Regensdorf*. (JB)
- [7] D. Favrat, EPF - Lausanne: *Evaporation de nouveaux réfrigérants sur des tubes à surface améliorée*. (JB)

- [8] M. R. Conde, ETH - Zürich: *Simulationsmodell zur Unterstützung der Entwicklung besserer Wärmepumpen (HP Design)*. (JB, SB)
- [9] Th. Afjei, ETH - Zürich: *Messungen einer drehzahlgeregelten Wärmepumpe und Modellierung*. (SB)
- [10] ENFOG, Gossau: *Wärmepumpenoptimierung WPO, Phase 2*. (SB)
- [11] M. Nani, NTB Buchs: *Softwareevaluation für bivalente Heizanlagen und WKK-Anlagen*. (JB)
- [12] D. Maurer, ETH - Zürich: *Expertensystem zur präventiven Wartung von Wärmepumpen*. (JB, SB)
- [13] B. Eggen, EICHER & PAULI, Bern: *Gasmotor-Wärmepumpen: Erfahrungen und Planungsregeln*. (SB)
- [14] Ch. Erb, EICHER & PAULI, Zürich: *Analyse der Betriebsstörungen bei gasmotorisch betriebenen WKK- und WP-Anlagen*. (JB)
- [15] F. von Allmen, SCHECO, Winterthur: *Praxiserprobung Kältemittel R134a*. (SB)
- [16] F. von Allmen, SCHECO, Winterthur: *Praxisversuche für den Ersatz des Kältemittels R502 durch HP-81*. (JB)
- [17] H. Stierlin, C.U. Wassermann, DAWP CREATHERM, Schlieren: *Messungen an Diffusions-Absorptions-Wärmepumpen*. (JB)
- [18] N. Herzog, HERZOG + LEE, Reinach: *Wärmepumpen-Warmwassererwärmer*. (JB)
- [19] R. Rhyner, CREM, Martigny: *Test comparatif de deux pompes à chaleur*. (JB)
- [20] P. Neuenschwander, ETH - Zürich: *Expertensystem für präventive Wartung und Alarminterpretation in der Haustechnik: Phase 2, Blockheizkraftwerke*. (JB)
- [21] M. Stalder, EICHER & PAULI, Liestal: *Dynamische Betriebsweise von WKK-Anlagen, Phase II*. (JB)
- [22] Hp. Zumsteg, ÖKOZENTRUM - Langenbruck: *Holzschnitzel/Stirling-BHKW: Feuerungstechnische Analyse und Optimierung*. (SB)
- [23] Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, Langenbruck: *Freikolben-Stirling-Generator*. (JB)
- [24] K. Malach, HTI - Bern: *FCKW - freies Kälteaggregat; Bau und Ausmessung eines Funktionsmusters*. (JB)
- [25] P. Renaud, G. Oreiller, PLANAIR, La Sagne: *Moteurs Stirling: Situations et objectifs des études et développements en Suisse et à l'étranger*. (SB)
- [26] Y. Allani, EPF-Lausanne: *DYNATHERM, phase pilote*. (JB)
- [27] J. Kunz, P.-A. Haldi, EPF - Lausanne: *Simulation dynamique du comportement d'un réseau de chauffage à distance (phase 3)*. (JB)
- [28] D. Favrat, EPF-Lausanne: *Intégration énergétique de procédés industriels par la méthode du pincement étendue aux procédés discontinus et à la prise en compte des facteurs exergétiques: extension du logiciel PINCH-LENI*. (JB)
- [29] A. Bölcs, EPF-Lausanne: *Etudes expérimentales et théoriques des échangeurs de chaleur à plaques*. (JB)
- [30] H. Wälchli, ISB - Biel: *Kondensatoren- und Verdampferoptimierung für Lösungsmittelrückgewinnung*. (JB)
- [31] J. Nipkow, ARENA, Zürich: *Wäschetrocknen mit geregelter Ventilation und Heizung*. (JB)
- [32] P. Krüsi, AMENA AG, Schlieren: *Messprojekt Im Bilander, Brugg*. (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

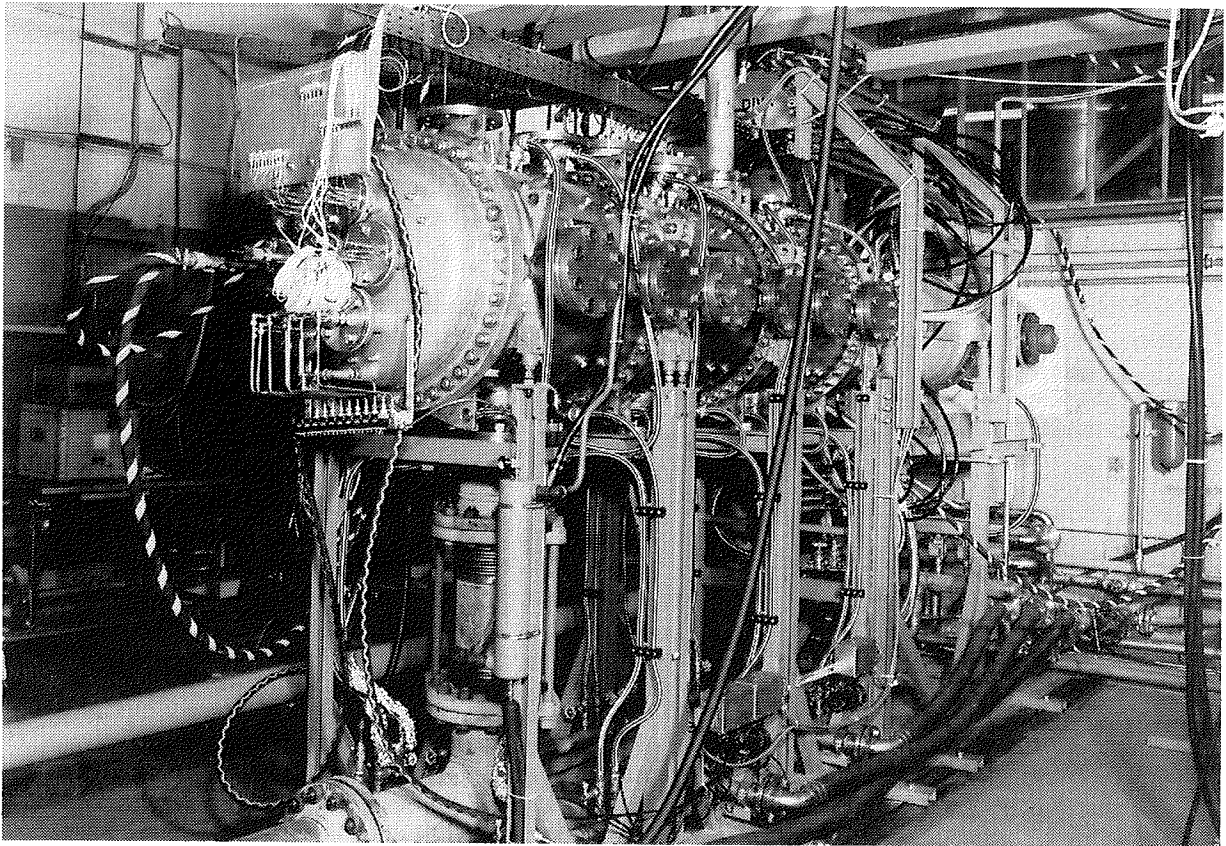


# FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Alphons Hintermann

---



## Der Hochdruck-Verbrenungsprüfstand DIVA (*Druck in Verbrennungs-Anlagen*)

Seit Anfang 1992 steht der mit modernsten Messeinrichtungen ausgestattete Hochdruckprüfstand DIVA in Baden für die beiden Partner ABB und ETH/PSI im Einsatz. Damit ist ein Grundstein für eine fruchtbare Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft für die nächsten zehn Jahre gelegt worden.

## 1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1992

Im Berichtsjahr wurde die neue Planungsperiode 1992-1995 gestartet. Das für diesen Zeitraum gültige Programm legt vor allem Gewicht auf die Sicherung der Kontinuität der laufenden Forschungsaktivitäten, eine verstärkte Umsetzung der erhaltenen Forschungsergebnisse, eine intensivierte Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Privatwirtschaft, hohe Fachkompetenz und zunehmende internationale Vernetzung der Projekte, um möglichst viele Synergien zu nutzen.

Ganz in dieser Zielrichtung liegen denn auch die im Berichtsjahr um weitere drei Jahre verlängerten Projekte in den verschiedenen Schwerpunktsbereichen [1-5]. Für die Projekte **Laser-Messverfahren** [3], **Geometrische Partikeldetektion von Russteilchen** [1] und **Reduzierung von Sickoxiden in Abgasen** [2] liegen Übersichtsberichte für die Periode 1988-1991 vor. Nach Abschluss der in dieser Zeitperiode erfolgten Aufbauarbeiten können sich nun die Forscher des Labors für Energiesysteme (LES), des Labors für Verbrennungsmotoren und Verbrennungstechnik (LVV) der ETH-Zürich und des PSI voll auf wissenschaftliche Fragestellungen konzentrieren. Am LES konnte 1992 die numerische Simulation von Verbrennungsvorgängen durch neue Projekte verstärkt werden.

Die Zusammenarbeit der Privatwirtschaft mit dem LES, LVV und PSI konnte auf zwei Ebenen weiter ausgedehnt werden. Dank der neu ins Programm integrierten drei industrieorientierten Pilot- und Demonstrationsprojekte (P&D), kann die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis beschleunigt werden.

Der **Hochdruck-Verbrennungsprüfstand DIVA** steht auf dem Betriebsgelände der ABB in Baden nach einer Einfahrperiode von drei Monaten ab März 1992 für Experimente zur Verfügung. Die Anlage erfüllt die im Pflichtenheft spezifizierten Werte. 1992 sind während rund 200 Betriebsstunden vor allem ABB-seitig Versuche gefahren worden. Verglichen mit den von ABB bisher benutzten Anlagen in Köln und Manchester sind die Versuche kostengünstiger und es ergeben sich vor allem zeitliche Vorteile.

Das Ziel, im Berichtsjahr international einige Weichen zu stellen, die direkte Auswirkungen auf unsere künftigen internationalen Zusammenarbeiten haben, wurde im wesentlichen erreicht. Die Ablehnung der beiden Anfang 1992 eingereichten JOULE II-Projekte ist als Rückschlag in den Bemühungen, die Forschungszusammenarbeiten in den EG-Raum weiter auszudehnen, zu werten. Trotz nun fehlender EG-Mittel kann eines der Projekte dennoch in reduziertem Umfang realisiert werden.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1992

### GRUNDLAGEN DER VERBRENNUNG

Im Vordergrund standen am LVV die ersten Experimente am Einzylinder-Forschungsmotor im Rahmen des Projekts **Turbulenzparameter von Strömungen** [6] sowie weiterer LVV-interner Forschungsvorhaben. Das Turbulenzverhalten im laufenden Motor konnte bei verschiedenen Motorgeschwindigkeiten und -geometrien durch zweidimensionale Laser- Doppler- Velocimetry-Messungen erstmals untersucht werden. Erste Vergleiche der experimentellen Resultate mit aufwendigen numerischen Modellrechnungen waren in guter Übereinstimmung [24,25].

Am PSI konnten die Experimente in der **katalytischen Verbrennung** [4] weitgehend durch numerische Modellrechnungen nachvollzogen werden und trugen zum besseren Verständnis der relevanten Mechanismen bei. So wurde gezeigt, dass die homogene Reaktion im Falle der katalytisch unterstützten Verbrennung von Wasserstoff nicht von Radikalen beeinflusst wird, welche von der Katalysatoroberfläche ins Gas desorbieren [26-29]. In Zusammenarbeit mit zwei Industriepartnern führte das PSI auf dem Hochdruckprüfstand DIVA Experimente zur katalytisch unterstützten Verbrennung von Erdgas durch. Dabei konnte der Brennstoff unter Gasturbinenbedingungen vollständig und mit sehr geringen  $\text{NO}_x$ -Emissionen umgesetzt werden. Hingegen war die Stabilität der Verbrennung für einen praktischen Einsatz noch ungenügend. Aufgrund der DIVA-Versuchsergebnisse haben die Industriepartner Entscheidungen für die zukünftigen Entwicklungs- und Forschungsaufgaben getroffen.

## LASER- UND ANDERE OPTISCHE MESSMETHODEN

Die Beherrschung moderner optischer Messmethoden ist ein absolutes Muss in der modernen Verbrennungsforschung. Daher wurde das PSI-Projekt **Laser-Diagnostik in der Verbrennung** [3] verlängert. Die am PSI entwickelte Variante des Degenerierten-Vier-Wellen-Mischens hat sich als neues Diagnose-Instrument für den Nachweis verschiedener Molekülen in Flammen bewährt und ist international auf grosse Beachtung gestossen [30]. Mit Erfolg wurde damit die Temperatur an OH in einer Flamme gemessen. Ein selbstentwickeltes, mobiles und fernbedienbares CARS-Spektrometer wurde erfolgreich zur Temperaturmessung an einem industriellen Brenner ausserhalb des Labors eingesetzt [31,32]. Spezielle Optiken ermöglichen Messungen auch an grossen Testobjekten.

Die bisherigen Untersuchungen im LES-Projekt **Schnell-Messverfahren in Flammen** [7] wurden in den ultravioletten und sichtbaren Bereich ausgedehnt und Messungen an verschiedenen Blaubrennern analysiert. Die hier entwickelten Messverfahren sollen in der Entwicklung von schadstoffarmen Brennern eingesetzt werden und können bei der Beurteilung bestehender Grossfeuerungsanlagen wertvolle Dienste leisten. In Zusammenarbeit mit einer Industriefirma wurden spektrale Messungen an diversen Brennern durchgeführt. Die früheren Untersuchungen an einem Tunnelofen der Zürcher Ziegeleien sind vom LES ausserhalb dieses Projekts weiter verfolgt worden.

Das frühere, an einfachen Bunsenflammen am LES entwickelte Messverfahren im Projekt **Bestimmung dreidimensionaler Temperaturfelder in Flammen mittels Holographie** [8] wurde zur Ausmessung grösserer Flammen technischer Brenner mit starkem Turbulenzverhalten erweitert. Da verschiedene Effekte wie Streuung und Absorption sich störend auf die Interferenzen auswirken, sind die vorliegenden Resultate noch nicht befriedigend. In Zusammenarbeit mit der Universität Warwick (GB) konnte die Bildverarbeitungs-Software deutlich verbessert werden. Die hier entwickelte Temperaturmessmethode konnte im PSI-Projekt [4] erfolgreich eingesetzt werden.

Ein Schwerpunkt der heutigen Anstrengungen zur Verbesserung der Abgasemissionen von Dieselmotoren liegt in der Verminderung partikelförmiger Emissionen. Im Rahmen des LVV-Projekt **Geometrische Partikeldetektion von Russpartikeln** [1] wurde eine laseroptische Messmethode entwickelt, welche die Detektion und Charakterisation von Russpartikeln in Diffusionsflammen ermöglicht. Anhand von Streuversuchen konnten die Theorien über Russpartikelstreuung vollumfänglich bestätigt werden. Zudem wird mit numerischen Simulationen versucht, die Emissionen der dieselverbrennungsspezifischen Schadstoffe zu verbessern. Angesichts der Bedeutung des Themas wurde das Projekt verlängert, wobei eine Implementation des Messsystems auf dem 1-Zylinder-Forschungsmotor zur Untersuchung simultaner kurbelwinkel- und zyklusaufgelöster Partikeldetektion vorgesehen ist [33].

Neue berührungslose laseroptische Messverfahren werden auch im LVV-Projekt **Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung** [9] entwickelt. Messungen bei verschiedenen Zündzeitpunkten der Verbrennungszelle zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Flammenfrontausbreitung vom zeitlich verzögerten Zündzeitpunkt der Verbrennungszelle. In Zusammenarbeit mit der TU-Stuttgart werden für das theoretische Verständnis umfangreiche numerische Rechnungen unter Berücksichtigung der Reaktionskinetik und Ausnutzung der Synergien aus dem Projekt [1] ausgeführt. Zudem werden die laserdiagnostischen Resultate laufend einer Privatfirma zur Verfügung gestellt.

## NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSVORGÄNGEN

Numerische Rechenverfahren sind integrierender Bestandteil der meisten Vorhaben der Verbrennungsforschung. Häufig wird dabei ein kommerzielles, primär für die Simulation von reinen Strömungsvorgängen entwickeltes Programmpaket verwendet und mit zusätzlichen Verbrennungsmodellen ausgestattet. In den folgenden Projekten bildet die numerische Modellierung den Hauptgegenstand. Zielsetzung dieser Forschungsarbeiten ist, in enger Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft praxisgerechte Programmpakete zu entwickeln.

Die Bereitstellung eines Werkzeugs für die numerische Simulation von Diffusionsflammen, speziell im Hinblick auf die Entwicklung von schadstoffarmen Feuerungen im Heizungsbereich ist Ziel des LES-Projekts **Modellierung der NO-Bildung in Flammen** [5]. In der 1992 gestarteten Verlängerung steht die Verbesserung der Modellierung von NO<sub>x</sub>-Emissionen im Vordergrund. Mit der Beschaffung des Software-Pakets Tascflow konnte eine erhebliche Verbesserung der numerischen Grundlagen erreicht werden, da nun detaillierte chemische Reaktionsgleichungen im Verbrennungsprozess berücksichtigt werden können. Um Vergleiche mit experimentellen Daten anzustellen, wurde in intensiver Zusammenarbeit mit dem LVV eine 3D-LDA-Anlage evaluiert und angeschafft, um Turbulenzmessungen zu ermöglichen. Anhand von Messkampagnen an einem konventionellen Brenner konnten Erfahrungen im Umgang mit dieser Anlage gesammelt werden. Die Industrie hat Kenntnis von diesem Vorhaben und erwartet Resultate nach erfolgter Auswertung der Messungen. Eine starke Vernetzung besteht mit dem

NEFF-Projekt **Basiswissen für Low-NO<sub>x</sub>-Brenner und -Brennkammern** [20], in dem das LES in enger Kooperation mit fünf Brenner- und Kesselherstellerfirmen die Erarbeitung von Grundlagen für eine möglichst schadstoffarme Verbrennung fossiler Brennstoffe anstrebt. Da LES- und industrieseitig die bisher erreichten Resultate als ermutigend bezeichnet wurden, beantragten die Partner eine Fortsetzung des Projekts, die der NEFF bewilligte.

Als erste Phase eines JOULE II-EG-Projekts (Teilnehmer: Institut für Computer-Anwendungen (ICA) der Universität Stuttgart, CUÉNOD Frankreich, ELCO Schweiz und LES) wurde das Gemeinschaftsprojekt **Physikalisch-numerisches Verbrennungsmodell für turbulente Diffusionsflammen** [10] initialisiert. Mit der ICA-Fachkompetenz auf dem Gebiet der Finite Elemente (FE)-Methode, angewandt auf kompressible Strömungen mit chemischen Reaktionen, soll ein industrietaugliches Werkzeug zur Entwicklung neuer Verbrennungstechnologien geschaffen werden. Das Werkzeug soll aus einem auf der FE-Methode beruhenden Programmpaket für die numerische Simulation von laminaren und turbulenten Verbrennungsvorgängen bestehen. Optimale Module für die Teilgebiete Strömung, Turbulenz und Reaktionskinetik sollen Ende 1993 zur Verfügung stehen. Um die Zusammenarbeit und den *Know-how*-Transfer IAC-LES zu verstärken, wurde neu das ergänzende Projekt **Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern** [11] gestartet. Seine Zielsetzung ist, neue Lösungsansätze für die bis heute noch nicht zufriedenstellende Modellierung der Stabilität einer turbulenten Flamme zu finden.

Mit der Inbetriebnahme des Hochdruckprüfstands DIVA wurde vom LES mit dem NEFF-Projekt **Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck** [19] ein neuer Themenkreis angeschnitten. Im Rahmen dieses Projekts sollen durch DIVA-Experimente an Hochdruckflammen von technisch relevanter Grösse Daten über vorhandene Russkonzentrationen und den damit verbundenen Strahlungshaushalt beschafft werden, die dem Ingenieur bessere Unterlagen für die Konstruktion von Brennkammern liefern. Das Fernziel der Arbeiten ist die Verbesserung der Computersimulation von Gasturbinenkammern.

## SCHADSTOFFREDUKTION UND SCHADSTOFFASPEKTE

Die Schadstoffreduktion bei den Verbrennungsprozessen ist ein wesentlicher Programmbestandteil. Die primären Massnahmen aus dem Erforschen der Grundlagen der Verbrennung [1, 3-10] werden erst im Laufe der Jahre ihre Früchte tragen und integrierender Bestandteil der nächsten Generation von Feuerungsanlagen sein. Um den verschärften Vorschriften der Luftreinhaltung zu genügen, sind parallel zu den Grundlagen in enger Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft auch die Verbesserung von sekundären Massnahmen zu fördern. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei dem Studium des Anwendungspotentials und des Langzeitverhaltens der SCR/SNCR-Verfahren in verschiedenen praxisnahen Anlagen.

Auf dem Gebiet der Abgasreinigung bei Diesel- und Gasmotoren laufen seit einiger Zeit verschiedene untereinander vernetzte Projekte. In enger Zusammenarbeit des PSI (Projekt **Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen** [2, 34-36]) mit einem privaten Ingenieurbüro (Projekte **Abgasreinigung von Dieselmotoren mit Harnstoff** [12] und **Langzeit-Betriebsverhalten von Gasmotoren mit Katalysator** [13]) wurden die erarbeiteten PSI-Grundlagen auf den Gebieten SNCR- und SCR-Entstickung erfolgreich in die Praxis umgesetzt. Das Harnstoff-Verfahren stand dabei im Vordergrund. Die Erfolge dieser Arbeiten ermutigten die Forscher, das Potential dieses Verfahrens im Projekt **Entstickung von stationären Magermotoren und Holzfeuerungen mit Harnstoff** [17] zu untersuchen. Die erste Phase zeigte die prinzipielle Möglichkeit einer Entstickung mit Harnstoff, deckte aber auch einige Mängel bei der verwendeten Harnstoffdüse und dem verwendeten Katalysator auf. In einer zweiten Phase wurde während über 1000 Betriebsstunden ein Deponiegas-Magermotor im SCR-Verfahren problemlos mit Reduktionsraten von annähernd 90% entstickt. Im Rahmen des weiter unten erwähnten Pilot- und Demonstrations-Projekts **Dauerentstickung eines Dieselmotors** [19] wird diese Methode in die Praxis umgesetzt. Die Bedeutung dieser Aktivitäten innerhalb des Programms wurde mit der Verlängerung des PSI-Projekts [11] um weitere drei Jahre unterstrichen. Damit ist für weiterführende Projekte die Sicherstellung der wissenschaftlichen Grundlagen gewährleistet.

Das nun abgeschlossene Projekt **Verbrennungsoptimierte Klein-Holzfeuerung** [14] wurde in der Privatwirtschaft unter der wissenschaftlichen Begleitung durch das Ökozentrum Langenbruck ausgeführt. Die ursprüngliche Zielsetzung, den Cheminée-Feuerraum derart zu gestalten, dass bei maximaler Energieausbeute und geringer Belastung der Umwelt die Behaglichkeit des lebendigen, sichtbaren Feuers weiterhin gewährleistet bleibt, konnte erreicht werden. Parallel dazu zielte eine zweite Entwicklung auf die Schaffung eines einfachen, rein verbrennungsoptimierten und bedienungsfreundlichen Zimmerofens ohne Sichtfenster hin. Nach Ansicht des Projektnehmers ist es gelungen, für den Klein-Feuerungssektor ein zeitgemässes, sparsames Holzheizgerät zu entwickeln und anzubieten, das viele Anwendungsmöglichkeiten eröffnet.



Die Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur emittierten Schadstoffmenge einer handbeschickten Holzfeuerung wurde im Projekt **Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen** [15] weiter verfolgt. Im Berichtsjahr wurde der Versuchsstand mit einer kontinuierlichen Messung des Abgasvolumenstroms mittels Differenzdruckmessung mit *Annubar* realisiert. Die Durchführung von Abbrandversuchen mit verschiedenen Holzfeuerungen und die Bestimmung des Schadstoffauswurfs bei unterschiedlichen Betriebsarten zeigte, dass insbesondere zur Beurteilung des intermittierenden Teillastbetriebs eine Gewichtung mit der momentanen Feuerungsleistung notwendig ist. Das Projekt wird von einem Ingenieurbüro in enger Zusammenarbeit mit der Vereinigung für Holzenergie sowie amtlichen Prüfstellen des In- und Auslands durchgeführt und ist auch in IEA-Forschungsprogramme eingebettet [37, 38].

Die Herabsetzung der Schadstoffemissionen in der Kaltstartphase bei gleichzeitiger Verbrauchsverringerung ist Thema des Vorhabens **Optimierte Verbrennungstechnologie beim Automobil-Benzinmotor** [16]. Das Schwergewicht der Arbeiten lag im Vermessen der Reaktionsgeschwindigkeit der Sauerstoffsonden mit verschiedenen Schutzhüllen-Öffnungen. Durch Änderungen an der Keramikschicht der Sonden konnte die Stabilität im Zusammenspiel mit der Motorelektronik verbessert werden. Da kommerzielle Motorenmanagementsysteme unbefriedigend waren, wurde im Rahmen des Projekts eine Neuentwicklung realisiert, die es erlaubt, sequentiell bis zu acht Zylinder je einzeln zu steuern.

Das Projekt **Müllverbrennung in Brasilien** [18] musste nach kurzer Anlaufphase neu orientiert werden. Bestimmt wurde der Heizwert von brasilianischem und japanischem Müll. Die Abklärungen an Ort ergaben, dass zu den Einflussfaktoren zur Gestaltung von Entsorgungsanlagen nicht nur die Müllanalyse sondern auch das gesamte Umfeld zu berücksichtigen ist. Im Frühjahr 1993 wird das Projekt mit einem anderen Sachbearbeiter nach erfolgter Umorientierung in Zusammenarbeit mit der Privatwirtschaft neu gestartet werden.

### 3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im ETH-PSI-Bereich herrscht eine rege Zusammenarbeit. Wie in den Projektbeschrieben hervorgehoben, findet ein echter *Know-how*-Transfer statt, indem neu entwickelte Methoden von anderen Gruppen übernommen und angepasst werden. Wesentlich trägt dazu das nun jährlich stattfindende ETH/PSI-Seminar bei. Am 25. März 1992 wurden zahlreiche Teilnehmer aus Hochschule und Privatwirtschaft über den aktuellen Stand von 12 ETH/PSI-Projekten informiert. Hingegen ist der Informationsfluss zwischen NEFF-Projekten in der Privatwirtschaft und BEW-Projekten noch mangelhaft. In den Zwischenberichten zu den NEFF-Projekten **SCR-Konzept für Gross-Dieselmotoren** [22] und **PENTONOX, SNCR-Entstickung mit Ammoniakwasser** [23] wurden die diesbezüglichen BEW-Projekte nicht einmal als Referenz erwähnt. Es ist beabsichtigt, diese Koordinationslücke innerhalb des Ende 1992 beschlossenen bundesinternen NEFF-AFB-P&D-Projekts Stickoxidemissionsmessungen bei stationären Dieselmotoren zu schliessen.

Ein wichtiges Element nationaler Zusammenarbeit bilden die SIFF-Arbeitsgruppen **Feuerungssimulationsmethoden, Laser-Messverfahren in Flammen und Abgasanalytik**. An mehreren Sitzungen haben sich die Teilnehmer gegenseitig über den laufenden Stand der Arbeiten informiert, Erfahrungen ausgetauscht und erste gemeinsame Aktivitäten in die Wege geleitet. Das Hauptinteresse der Arbeitsgruppe Simulationsmethoden gilt einem Überblick über die an Hochschulen und insbesondere in der Privatwirtschaft verwendeten kommerziellen Rechencodes und die damit gemachten Erfahrungen. Bei der Abgasanalytik steht eine Übersicht über eignungsgeprüfte, kommerzielle Emissionsmessgeräte und deren Praxistauglichkeit und Querempfindlichkeiten im Vordergrund. Die Pflichtenhefte für entsprechende Aufträge sind in Bearbeitung. Die Arbeitsgruppe wird ihre Bemühungen, den notwendigen *Know-how*-Transfer unter den laufenden SCR/SNCR-Projekten zu gewährleisten, weiterhin fortsetzen.

Mit dem Prüfstand DIVA steht eine moderne Forschungseinrichtung zur Verfügung, die in den kommenden Jahren als effizientes Instrument der Zusammenarbeit Hochschule-Industrie intensiv genutzt werden soll. Der sorgfältigen, vorausschauenden Planung der Forschung und Sicherstellung der dafür notwendigen Mittel kommt eine hohe Priorität zu. Auf Anregung des Programmleiters wurden Ideenskizzen für gemeinsame Forschungsprojekte zwischen den DIVA-Partnern ABB, PSI, LES und LVV ausgearbeitet, die nun konkretisiert werden müssen.

Seitens des LVV ist im Sommer 1992 der Impuls zur Schaffung der Interessensgemeinschaft *Computational Reactive Fluid Dynamics of Internal Combustion Engines* ausgegangen. Die Interessensgemeinschaft sieht eine

enge Verflechtung künftiger Aktivitäten des LVV und der Privatwirtschaft vor. Erste Kontakte sind geknüpft worden, die Konkretisierung wird jedoch ein bis zwei Jahre beanspruchen.

Bezüglich internationaler Aktivitäten ist einiges in Bewegung geraten. Die geleistete Aufbauarbeit der letzten Jahre beginnt ihre Früchte zu tragen. So hat die Schweiz anlässlich des Triannual Meetings der *International Flame Research Foundation IFRF* vom 13. -15. Mai 1992 den Stand eines provisorischen IFRF-Mitgliedes erhalten, mit der Empfehlung, möglichst bald gemeinsame Forschungsaktivitäten aufzunehmen. Andererseits befürwortete ein ausländischer Experte anlässlich der Programmevaluation angesichts des hohen Niveaus der vorgestellten Projekte eine direkte Kollaboration mit dem deutschen TECFLAM-Programm.

Das jährliche *Task-Leaders-Meeting* des *IEA-Implementing Agreements (IA) Conservation in Combustion* fand im üblichen Rahmen vom 22. - 25. Juni 1992 in Trondheim statt. Um diese IEA-Aktivitäten zu beleben, wurde auf Antrag der Schweiz im Executive Committee das Thema **Forscher-Austausch-Börse** traktandiert. Eine Liste von Offerten für Forscher ist in Vorbereitung. Seitens der IEA wurde das IA nur um drei (statt der beantragten fünf) Jahre und mit Auflagen verlängert. Die IEA forderte eine verbesserte Koordination unter den verschiedenen Subtasks, ein vermehrter Umwelteinbezug, neue kollaborative Subtasks mit Praxisbezug sowie eine Strategie zur Ausführung. Die innerhalb des IA entstandene enge Zusammenarbeit des LVV mit dem Istituto Motori, Neapel, die nun auch vertraglich abgesichert ist, gipfelte 1992 im gemeinsam organisierten *2nd international Workshop on Fluidmechanics, Combustion, Emissions and Reliability of Reciprocating Engines* [24,25,33].

Unsere Forschungsaktivitäten wurden noch an weiteren Tagungen der internationalen Kritik ausgesetzt und sind dabei stets auf ein positives Echo gestossen. Die wichtigsten Anlässe waren: *11th European CARS-Workshop*, Florenz, März 1992, *Combustion Symposium*, Sydney, Juli 1992, *1. Eur. CFD-Conference*, Brüssel, Sept. 1992.

Leider wurden die beiden JOULE II - Anträge von der zuständigen EG-Kommission abschlägig beantwortet, so dass die damit beabsichtigte Verstärkung der Programmaktivitäten im EG-Bereich nicht zum Tragen kommen kann und weitere Anstrengungen notwendig sind, unsere Verbrennungsforschung im EG-Bereich zu verankern.

#### 4. Umsetzung der Ergebnisse und P & D - Projekte

Die Umsetzung erfolgte einerseits über die etablierten Kanäle der Jahres- und Schlussberichte via ENET/VTX, PSI-interne Berichte sowie Veröffentlichungen in Fachzeitschriften [24-38]. Nicht zu vernachlässigen sind andererseits die Fachtagungen und Symposien im nationalen und internationalen Rahmen, die neben dem Ausloten des aktuellen Wissensstands stets auch Gelegenheit zum wichtigen persönlichen Erfahrungsaustausch bieten.

Wichtigstes Umsetzungsforum der Forschungsergebnisse ist die jährlich stattfindende Tagung der **Schweizerischen Interessensgemeinschaft für Feuerungsforschung SIFF**. Am 28. August 1992 hat die dem Thema **Entsorgungstechnik** gewidmete 4. SIFF-Tagung bei über 70 Teilnehmern aus Privatwirtschaft, Hochschulen und Behörden ein positives Echo ausgelöst und entsprach offensichtlich einem Bedürfnis des gegenseitigen Informationsaustauschs.

Das P&D-Projekt **Dauerentstickung eines Dieselmotors** [21] ist eine direkte Umsetzung der in den Projekten [2, 12,13] angefallenen Forschungsergebnisse. Darin wird der Dauerbetrieb eines Dieselmotors mit einer automatisierten Harnstoffentstickungsapparatur unter Praxisbedingungen untersucht.

Die Ziele im ABB-BEW-NEFF-Projekt **Konstant-Volumen-Verbrennung** sind ambitiös und visieren eine zukunftsweisende Generation von Gasturbinen mit verbessertem Wirkungsgrad und reduzierter Schadstoffemission an. Das Gross-P&D-Projekt wurde 1992 vertraglich geregelt und ein Prototyp im 2 - 5 MW-Bereich soll 1996 vorliegen. Solche Gasturbinen können im Einsatz in WKK-Anlagen wesentlich zur Erreichung der Ziele von Energie 2000 beitragen.

Im Ende 1992 gestarteten BEW-NEFF-P&D-Projekt *Développement d'une technique Low-NOx de combustion étagée d'huile lourde avec brûleur à prémélange* sollen in Zusammenarbeit der *Centrale Thermique de Vouvry* und der ABB die Grenzen der Doppelkegelbrenner-Technologie beim Betrieb mit Heizöl-Schwer unter Erfüllung der neuen LRV-Vorschriften ausgelotet werden. Im Projekt sollen die ermutigenden 1-MW-Laborversuche auf den 10MW-Bereich in einem Hilfsheizkessel der *Centrale Thermique de Chavalon* ausgedehnt werden.

## 5. Bewertung 1992 und Ausblick 1993

Rückblickend kann aufgrund der Berichte [1-23] auf gute Arbeit und einen kontinuierlichen Fortschritt bezüglich der geplanten Projektabläufe geschlossen werden. Verzögerungen sind lediglich bei den Projekten [8,16,18] aufgetreten. Diese Projekte können jedoch ohne zusätzliche Kosten für das BEW zu einem späteren Zeitpunkt abgeschlossen werden.

Für 1993 wird die Planung der Forschungsaktivitäten 1993-1995 der ETH (LES und LVV) und des PSI an der DIVA in Abstimmung auf die Bedürfnisse der ABB im Vordergrund stehen. Den Forschungsfragen im Zusammenhang mit den beiden ABB-BEW-P&D-Projekten wird hohe Priorität eingeräumt.

Das Jahr 1993 wird ganz im Zeichen internationaler Verknüpfungen in der Verbrennungsforschung liegen. Die Forschung hat nun ein Niveau erreicht, das sich international sehen lassen kann. Geplant ist, ein *Swiss Combustion Institute* zu gründen, das einerseits als IFRF-Mitglied gelten kann und andererseits als Mitglied des weltweit *Combustion Institute* (Pittsburgh, USA) vorgeschlagen werden soll. Es ist nicht ausgeschlossen, dass mittelfristig die konzentrierten ETH/PSI-Forschungskapazitäten zu einem neuen ERCOFTAC-Verbrennungsforschungs-Pilotzentrum erklärt werden können, um so unsere Aktivitäten im EG-Raum besser zu verankern. Ausserdem wird 1993 aktiv auf eine neue Struktur im *IEA-Implementing Agreement Conservation in Combustion* hingearbeitet.

Ganz im Sinne dieser internationalen Öffnung des Programms **Feuerung und Verbrennung** werden 1993 folgende Veranstaltungen mit internationaler Beteiligung organisiert:

<i>XII. European CARS-Workshop ECW'93</i>	22. - 23. März 1993	PSI, Villigen
<i>Joint SIFF/IFRF-Seminar on Numerical Combustion</i>	17. - 18. Mai 1993	Zürich-Regensdorf
<i>IEA Conservation in Combustion Task Leaders Meeting</i>	6. - 9. September 1993	Baden.

## 6. Liste der Projekte

- [1] B. Ineichen, B. Mandel, LVV / ETH - Zürich: *Geometrische Partikeldetektion von Russteilchen.* (SB)
- [2] M. Koebel, PSI - Villigen: *Reduzierung von Stickoxiden in Abgasen.* (JB)
- [3] T. Gerber, PSI - Villigen: *Laser-Diagnostik in der Verbrennung.* (JB)
- [4] P. Benz, S. Buser, P. Marti, A. Schlegel, PSI - Villigen: *Katalytische Verbrennung.* (JB)
- [5] J. Gass, M. Flury, M. Schlatter, LES / ETH - Zürich: *Modellierung der NO-Bildung in Flammen.* (JB)
- [6] K. Boulouchos, LVV / ETH - Zürich: *Turbulenzparameter von Strömungen.* (JB)
- [7] J. Gass, P. Stuber, LES / ETH - Zürich: *Schnell-Messverfahren in Flammen.* (JB)
- [8] J. Gass, H. Peter, LES / ETH - Zürich: *Bestimmung dreidimensionaler Temperaturfelder in Flammen mittels Holographie.* (JB)
- [9] B. Ineichen, K. Boulouchos, LVV / ETH - Zürich: *Flammenfront- und Schadstoffvisualisierung.* (JB)
- [10] K. Kündig, ELCO, Vilters: *Physikalisch-numerisches Verbrennungsmodell für turbulente Diffusionsflammen.* (JB)
- [11] J. Gass, LES / ETH - Zürich: *Numerische Simulation der Flammenstabilität bei realen Ölbrennern.* (JB)
- [12] Hp. Eicher, EICHER & PAULI, Liestal: *Abgasreinigung von Dieselmotoren mit Harnstoff.* (JB)
- [13] F. Kühnis, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, Liestal: *Langzeit-Betriebsverhalten von Gasmotoren mit Katalysator.* (JB)
- [14] W. Rüegg, RÜEGG CHEMINÉE, Zumikon: *Verbrennungsoptimierte Klein-Holzfeuerung.* (SB)
- [15] T. Nussbaumer, D. Wagner, VERENUM, Zürich: *Messverfahren zur Erfassung des Emissionsverhaltens von Holzfeuerungen.* (JB)
- [16] K. LEISTRITZ, Zürich: *Optimierte Verbrennungstechnologie im Automobil-Benzinmotor.* (JB)

- [17] F. Kühnis, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, Liestal: *Entstickung von stationären Magermotoren und Holzfeuerungen mit Harnstoff*. (JB)
- [18] L. Reh, IVK / ETH - Zürich: *Müllverbrennung in Brasilien*. (JB)
- [19] J. Gass, LES / ETH - Zürich: *Russbildung und Flammenstrahlung bei hohem Druck*. (NEFF-JB)
- [20] J. Gass, H. Dreher, M. Ochs, O. Schuler, LES / ETH - Zürich: *Basiswissen für Low-NO<sub>x</sub>-Brenner und -Brennkammern*. NEFF-Bericht.
- [21] P. Hess, CALOTEC, Hölstein: *Dauerentstickung eines Dieselmotors*. (JB)
- [22] E. Capotti, U. Trüb, PENTOMAG, Basel: *PENTONOX, SNCR-Entstickung mit Ammoniakwasser*. 4. NEFF-Bericht.
- [23] J. Vollenweider, NEW SULZER DIESEL, Winterthur: *SCR-Konzept für Grossdieselmotoren*. Teil 1, Grundlagen und Versuchsaufbau, NEFF-Bericht.

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

## 7. Referenzen

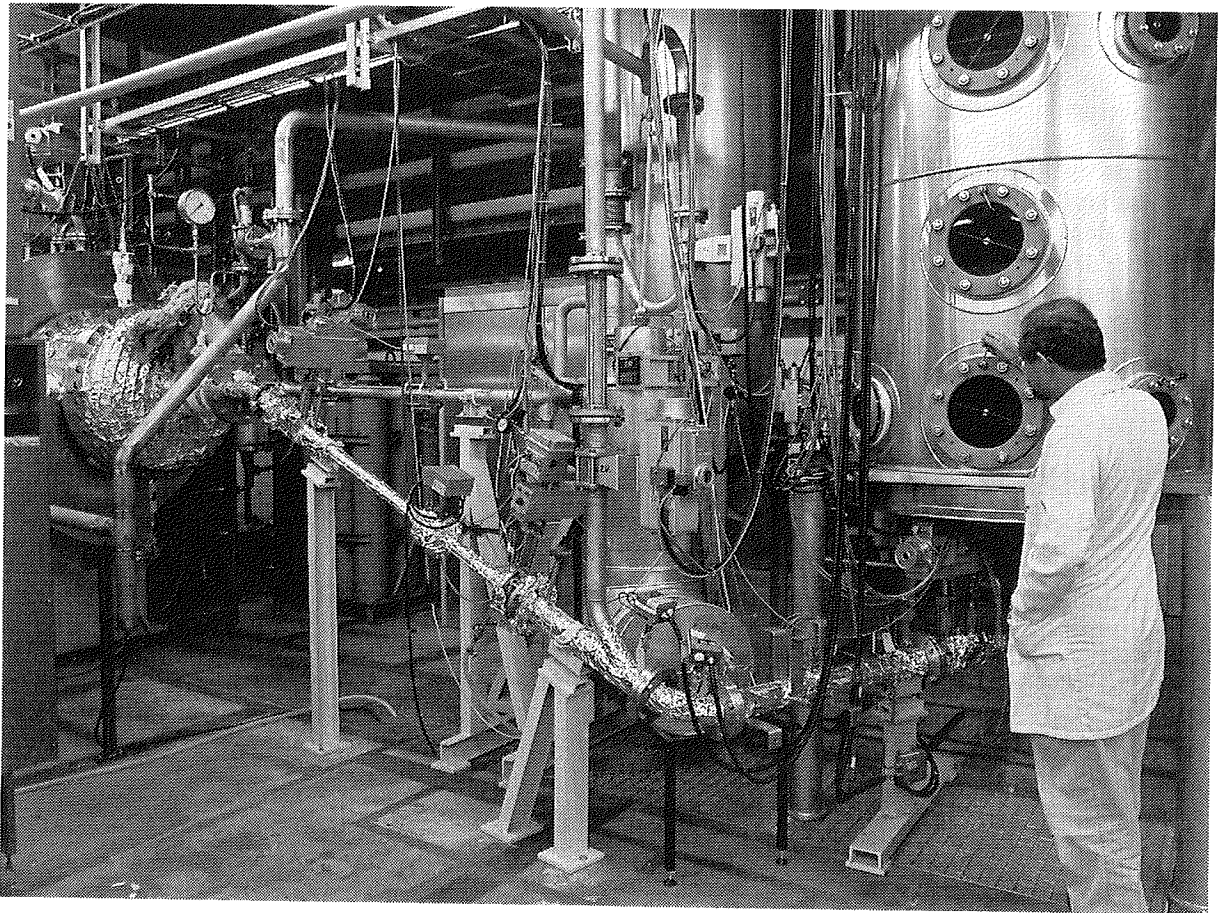
- [24] L. Kaiktsis, LVV / ETH - Zürich: *Break of Symmetry and Early Transition in a Symmetric Sudden Expansion Flow*, Proc. 1st European Conference on Computational Fluid Dynamics, 1992.
- [25] P. Dimopoulos, K. Boulouchos and L. Kaiktsis, LVV / ETH-Zürich: *On the Turbulent Flow Field in a Motored Reciprocating Engine*, Proc. Conf. Capri, 1992.
- [26] P. Benz, S. Buser, A. Schlegel, PSI - Villigen: *Bemerkungen zu Katalysatorsystemen zur katalytisch stabilen Verbrennung*. PSI-Bericht AN-51-92-01.
- [27] P.E. Marti, M. Maciejewski, A. Baiker, PSI - Villigen: *Methane Oxidation over Palladium on Zirconia Prepared from Amorphous Pd<sub>1</sub>Zr<sub>3</sub>-Alloy*, Journal of Catalysis, 1993.
- [28] A. Schlegel, P. Benz, S. Buser, PSI - Villigen: *Heat Transfer and Pressure Drop in Ceramic Foams in Forced Convective Flow*, Wärme- und Stoffübertragung, Springer Verlag, 1993.
- [29] S. Buser, P. Benz, A. Schlegel, PSI - Villigen: *Katalytisch unterstützte Verbrennung von H<sub>2</sub>-Experiment, Bestimmung der OH-Konzentration und der Temperaturerhöhung durch homogene Reaktion*. PSI-Bericht TM-51-92-10
- [30] M. Winter, P. Radi, PSI - Villigen: *Nearly Degenerate Four-Wave-Mixing Using Phase Conjugate Pump Beams*. Opt. Lett., 17, 320, 1992.
- [31] R. Bombach, B. Hemmerling, W. Kreutner, PSI - Villigen: *A Transportable CARS System for Measuring Temperature Fluctuations*. Proc. XI. European CARS-Workshop 1992.
- [32] W. Hubschmid, R. Bombach, T. Gerber, PSI - Villigen: *Autocorrelation Coefficient of the Radiation Output of a Frequency Doubled Nd: YAG Laser*, Appl. Physics B56, 25, 1993.
- [33] B. Ineichen, B. Mandel, T. Steiner, LVV / ETH - Zürich: *Soot Particle Detection and Characterization in a Diffusion Flame*. Proc. Conf., Capri, 1992.
- [34] M. Koebel, M. Elsener, PSI - Villigen: *Entstickung von Abgasen nach dem SNCR-Verfahren: Ammoniak oder Harnstoff als Lösungsmittel?* Chemie Ing. Technik 64, 934, 1992.
- [35] M. Koebel, PSI - Villigen: *Stickoxidminderung in Abgasen*. SIA 38, 693, 1992.
- [36] M. Koebel, M. Elsener, PSI - Villigen: *Hydropyrolyse von Harnstoff in der Wirbelschicht*. PSI-Bericht TM-51-92-07
- [37] D. Wagner, VERENUM, Zürich: *"KAMSIM", Kamin-Simulationsprogramm*, 1992.
- [38] T. Nussbaumer, D. Wagner, VERENUM, Zürich: *A New Method to Measure the Integrated Amount of Pollutants from Nonstationary Wood Combustion Process*. Proc. Conf. Interlaken, 1992.

# KERNTÉCHNIK UND NUKLEARE SICHERHEIT

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Wolfgang Kröger

---



**Experimentieranlage POSEIDON am PSI**

Die Experimentieranlage erlaubt die Untersuchung von Rückhalte­mechanismen von radioaktiven Gasen und Aerosolen, die nach einem schweren Unfall aus dem Reaktordruckbehälter entweichen könnten.

*Von links nach rechts: Aerosolgenerator, Vermischungskammer, Zuleitungen, vertikaler Wassertank.*

## 1. Programmziele

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

- der Aufrechterhaltung der Kompetenz in Fragen der nuklearen Sicherheit, der Entsorgung und der zugehörigen Anlagentechnik im Hinblick einer sicheren Nutzung der Kernenergie auch in der Zukunft,
- der Ausbildung von Nuklearwissenschaftlern und Kerntechnik-Ingenieuren im Rahmen attraktiver Forschungsaktivitäten in Zusammenarbeit mit den Hochschulen,
- der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen bis hin zu Expertisen für gutachterliche Stellungnahmen zu Einzelaspekten im Bereich Kernenergie/Kerntechnik,
- dem aktiven Verfolgen der international stattfindenden Erarbeitung sicherheitstechnischer Anforderungen und Merkmale für zukünftige Kernanlagen sowie Evaluation von Grundzügen und Limiten technischer Lösungen sowie
- dem Erbringen wissenschaftlich-technischer Dienstleistungen im nuklearen Sektor samt sicherem Betrieb der dazu notwendigen Anlagen.

Schwerpunktmässig findet die nukleare Energieforschung in einem Bereich des Paul Scherrer Instituts (PSI) in Villigen statt; die Beiträge der Hochschulen konzentrieren sich auf die Lehre, Diplomanden und Doktoranden führen allerdings ihre Forschungsarbeiten in der Regel ebenfalls am PSI durch. Im Jahr 1992 wurden ca. 220 Personen-Jahre (davon ca. 60 für Infrastruktur, etc.) und ca. 10,8 Mio. Fr. Sachmittel in dieser Forschung investiert. Etwa 1/3 der Personalmittel und über die Hälfte der Sachmittel wurde durch die Elektrizitätswirtschaft und die NAGRA, das BEW über die HSK sowie den NEFF meistens im Rahmen von Forschungsaufträgen finanziert. Das BEW steuerte ca. 16% der drittfinanzierten Sachmittel und ca. 22% des drittfinanzierten Personals bei. Das Forschungsprogramm **Kerntechnik und Nukleare Sicherheit** wird in enger Partnerschaft mit dem Programm **Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK** durchgeführt.

## 2. Arbeiten und Ergebnisse 1992

Die Forschungsarbeiten am PSI gliedern sich in drei Themengebiete:

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

Bei letzterem Forschungsgebiet geht es darum, neuartige Sicherheitsmechanismen, die in Reaktoren der nächsten Generation Anwendung finden sollen und die vermehrt auf passive Komponenten und inhärente Systemeigenschaften bauen, auf ihre Funktionstüchtigkeit zu überprüfen bzw. verlässlich nachzuweisen und in ihren Grenzen kennenzulernen.

Das Berichtsjahr ist durch die Inbetriebnahme neuer Experimentieranlagen bzw. die Konkretisierung neuer Projekte gekennzeichnet, die in den Vorjahren konzipiert wurden. Neben Arbeiten auf die angestammten Forschungsgebiete wurde zusammen mit dem Bereich Allgemeine Energieforschung des PSI und der ETHZ ein interdisziplinäres Projekt zur ganzheitlichen Betrachtung von Energiesystemen (hinsichtlich Sicherheit, Ökonomie, Umweltschutz) in Angriff genommen [1]. Im Folgenden werden die wichtigsten der am PSI auf dem Gebiet der Kernenergieforschung abgewickelten Projekte kurz dargestellt.

## REAKTORSICHERHEIT

Auf dem Gebiet schwerer Reaktorunfälle wurde der Versuchsstand CORVIS [2] im Berichtsjahr fertiggestellt. Das Projekt hat zum Ziel, ein mögliches Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters (RDB) in einem späten Kernschmelz-Unfallstadium experimentell und analytisch zu erfassen; aus der Art und dem Zeitpunkt dieses Versagens hängt nämlich die Kühlbarkeit der Schmelze und das weitere Verhalten des Reaktorcontainments ab. Bei den Experimenten werden unter atmosphärischem Druck ("Niederdruckszenarium") Ausschnittsmodelle der unteren RDB-Kalotte (Reaktorstahl von bis zu 10 cm Dicke) mit reaktortypischen Rohrdurchführungen im Maßstab 1:1 einer Schmelze ausgesetzt. Die Kernschmelze wird hier durch bis zu 2000 kg Thermit-Schmelze simuliert, die mit einem elektrischen Lichtbogen (300 kW) nachgeheizt wird. Im analytischen Teil des Projektes werden Rechenmodelle zum RDB-Versagen entwickelt und validiert, die auch auf Hochdruckszenarien übertragbar sind. Solche Modelle wurden bereits für die Experiment-Auslegung und für die Berechnung von Vorexperimenten eingesetzt. Die errechneten Temperatur-Zeitverläufe im Stahlboden grenzten zwar die experimentellen Ergebnisse grob ein, aber den Versagensort konnte man noch nicht richtig vorausberechnen. Deshalb hat sich der Verdacht erhärtet, dass Konvektion innerhalb der Schmelze eine entscheidende Rolle spielt und die Ergebnisse beeinflussen könnte. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung des BEW durchgeführt.

Die Experimentieranlage POSEIDON zur Untersuchung der Rückhaltung von Aerosolen und Gasen in Wasservorlagen wurde fertiggestellt [3]. Zur Generierung von Aerosolen wird in sog. Plasmafackeln Metallpulver verdampft und anschliessend rasch gekühlt. Als Trägergas dient eine Mischung von Dampf und Stickstoff. Das Aerosolmaterial kann jede Kombination von CsI, CsOH und Mn oder Sn sein. Gasförmiges Molekularjod kann auch produziert und dem Trägergas beigemischt werden. Der Gasgemisch wird mit einem Einspritzsystem durch Wasser von bis 100°C in einem Tank von 1 m Durchmesser und 5 m Höhe getrieben. Die Aerosol- und Jodkonzentration werden am Ein- und Austritt des Wassertanks gemessen, woraus sich der Rückhaltefaktor bestimmen lässt. Der Dekontaminationsfaktor nimmt mit Wasserhöhe und -temperatur zu und mit dem Durchmesser der Austrittsöffnung ab. Mit diesen experimentellen Daten werden am PSI entwickelte Rechenprogramme (z.B. BUSCA) validiert, die für entsprechende Berechnungen für reelle Wasservorlagen in KKW eingesetzt werden. Das Projekt wird finanziell vom NEFF unterstützt.

Zum deterministischen Ausschluss von Wasserstoff-Explosionen im Containment eines Kernkraftwerkes nach einem schweren Unfall kann das Containment im voraus "unempfindlich" gemacht werden. Aus einer Vielzahl von dies bewerkstelligenden Stoffen scheint Kohlendioxyd ( $\text{CO}_2$ ) der vielversprechendste. Um die notwendige Menge des zu lagernden  $\text{CO}_2$  zu ermitteln, sollte die Zündgrenze des 4-Gas-Gemisches "Luft-Dampf-Wasserstoff- $\text{CO}_2$ " bekannt sein [4]. Autoklaven-Versuche bei Drücken von 1-6 bar und Temperaturen von 80-180°C sind derzeit im Gang, um die Zündgrenze sowie die Flammenausbreitung, Druck- und Temperaturspitze zu bestimmen. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt.

Im Mittelpunkt des Projektes STARS (Simulationsmodelle zur Transientenanalyse von Reaktoren in der Schweiz) [5] standen die Erprobung/Validierung und Erweiterung des Berechnungssystems zur Transientenanalyse; ferner wurden die Kernkraftwerk-Anlagenmodelle erprobt und die für die Analyse von Störfällen und Unfällen in diesen Anlagen erforderlichen nuklearen und anlagenspezifischen Datensätze aktualisiert und vervollkommen. Mit deren Hilfe wurden (insbesondere auslegungüberschreitende) Störfälle analysiert. So sind z.B. für die KKW Mühleberg und Leibstadt (KKL) Analysen von Reaktivitätsstörfällen mit versagender Reaktorschnellabschaltung abgeschlossen worden. Die Ergebnisse zeigen, dass dabei keine sicherheitstechnischen Grenzwerte verletzt werden. Im Rahmen der Validierung von Rechenprogrammen wurden mit dem Programm RAMONA-3B stationäre axiale Leistungsverteilungen im KKL berechnet. Der Vergleich mit Incore-Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung; die mittlere Standardabweichung beträgt 5,2%. Aufgrund der im Rahmen von STARS erworbenen Kenntnisse wurde 1992 ein detailliertes Gutachten zur Methodik des Herstellers für Sicherheitsanalysen im Sicherheitsbericht für das Nachrüstprojekt des KKW Beznau erstellt. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt.

Auf dem Gebiet der Komponentensicherheit [6] wurden für die Rohrleitungsexperimente E31 am Heiss-Dampf-Reaktor das strukturdynamische Globalverhalten der integren Rohrleitung mit vertieften und erweiterten Nachrechnungen analysiert; das lokale, bruchmechanische Verhalten in der Rissregion wurde mit Hilfe der Methoden der Finiten Elemente (FE) unter Verwendung der Rechenprogramme ADINA und ORVIRT und unter Berücksichtigung der Werkstoffplastifizierung studiert. Neutronenbestrahlung von niedriglegiertem ferritischem Stahl im SAPHIR bei 290°C verursachte Versprödung. Eine 18 h lange Wärmebehandlung bei 460°C reduzierte die Versprödung. Die Versprödungsrate nach der Wärmebehandlung und erneuter Bestrahlung war nicht grösser. Kupfer, Phosphor und Nickel konnten als versprödungsfördernde Elemente identifiziert werden. Bezüglich



**Spannungsriiss-Korrosion** wird untersucht, ob dieses Phänomen unter Neutronenbestrahlung gefördert wird und unter welchen Bedingungen - wenn überhaupt - in Reaktorstrukturen auftreten kann [7]. Die bisherigen Untersuchungen zeigten unter simulierten Siedewasserreaktor-Bedingungen keine Risse nach 1000 Stunden; nur unter besonders hohem Sauerstoffgehalt des Wassers und hoher Durchfluss - beide weit über die in SWR zulässigen Grenzen konnten Risse erzeugt werden. Die HSK beteiligt sich finanziell an diesen Untersuchungen.

Der Transport und die Ablagerung (**Kontamination**) aktivierter Korrosionsprodukte im **Primärkreislauf** von Leichtwasserreaktoren kann zu erhöhter Ortsdosisleistung und Strahlenbelastung des Personals führen [8]. Insbesondere bei SWR mit äusseren Umwälzschleifen steigt die lokale Dosisleistung, verursacht durch Co-60, mit der Betriebsdauer an. Diese Phänomene werden zudem wesentlich durch das jährliche Abfahren des Reaktors von Betriebsbedingungen auf Raumtemperatur beeinflusst. 1991 und 1992 wurde das Abfahren im KKL durch ein ausgedehntes analytisches Programm verfolgt. Im Reaktorwasser des Kernkraftwerks wurde während des Abfahrens im August 1992 erstmalig die Freisetzung von Partikeln *on-line*, mittels Weisslichtstreuung durch ein Saphirfenster, verfolgt sowie periodisch der O<sub>2</sub> - und der H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> -Gehalt, und die g-Aktivität der verschiedenen Nuklide gemessen. Die Partikelkonzentration erreicht in der Abkühlphase bei 160°C ein Maximum, das von einem starken Anstieg des Co-60 Gehaltes und vom Auftreten von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> begleitet ist. Die Erkenntnisse aus solchen Messungen münden in Empfehlungen ein, wie man durch gezielte Zugabe von Elementen ins Reaktorwasser dessen Kontamination reduzieren kann. Das Projekt wird mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes **EDEN** [9] werden im Hotlabor Materialien aus dem Kernbereich eines Reaktors mit Blick auf Mechanismen, die die Werkstoffeigenschaften verändern können, untersucht. Das Hotlabor ist als einziges Labor in der Schweiz auf die Handhabung von hochaktiven und spaltbaren Materialien ausgelegt. So wird beispielsweise, im Rahmen von zwei internationalen Programmen, an der Optimierung des Leichtwasserreaktor-Brennstabhüllrohres gearbeitet mit dem Ziel, die Einsatzzeit im Reaktor zu verlängern zur Verbesserung der Brennstoffnutzung und zur Verminderung der Abfallmenge. Dazu werden Brennstäbe mit geringfügig veränderter Zirkon-Basislegierung in Reaktoren bestrahlt und die stark strahlenden Proben anschliessend im Hotlabor mit verschiedenen Methoden analysiert. Im Sekundärionen-Massenspektrometer werden z.B. Festkörperoberflächen durch Ionenbeschuss gezielt abgetragen und die ausgestossenen, geladenen Teilchen nach Ladung und Masse analysiert. Bei der Analyse der Zusammensetzung der Oxidschicht eines Brennstabhüllrohres zeigte sich, dass die Lithiumkonzentration - Lithium wird im Druckwasserreaktor zur Neutralisation der Borsäure zugesetzt - an der Grenzfläche Oxidschicht-Metall, wo der eigentliche korrosive Angriff stattfindet, sehr gering ist. Dies lässt vermuten, dass deren Einfluss auf die Geschwindigkeit der Hüllrohrkorrosion vernachlässigbar ist. Die Kernkraftwerkbetreiber unterstützen finanziell diese Arbeiten.

## ENTSORGUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE [10]

Mit der **Sicherheitsanalyse KRISTALLIN-1** für ein Endlager hochaktiver Abfälle im granitischen Gestein der Nordschweiz werden die sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen eines vieljährigen Projektes gezogen. Im Vergleich zur früheren Sicherheitsanalyse (Projekt Gewähr, 1985) werden die technischen Barrieren im Endlager gleichgewichtig mit der geologischen Barriere behandelt. Das PSI arbeitet auch an dieser Sicherheitsanalyse der NAGRA mit: Als Voraussetzung für eine Abschätzung der Löslichkeitslimiten von Nukliden wurde die Zusammensetzung des Porenwassers im Verfüllmaterial Bentonit modelliert; für ein vorgegebenes Basis-Szenario und unter Variation vieler Parameter wurde sie alsdann zur Berechnung der Freisetzung von Radionukliden aus dem Glas und ihres diffusiven Transports durch den Bentonit eingesetzt. Das Resultat dieser Rechnungen ist der Quellterm für den Nuklidtransport durch die geologischen Schichten des Umgebungsgesteins.

Auch dieser wird am PSI behandelt: Im Vordergrund stand die Untersuchung des Einflusses verschiedener geologischer Konzepte für Wasserfließsysteme und von Bandbreiten entsprechendes Parameter auf die Wirkung der geologischen Barriere. Es konnte auch gezeigt werden, dass der Einfluss von Kolloiden auf den Nuklidtransport im Kristallin unbedeutend ist. Schliesslich wurden die Modellvorstellungen und Parameterwerte für den Nuklidtransport in Oberflächen- und oberflächennahen Wässern, sowie für Nahrungsketten konsolidiert, womit sich eine potentielle Dosisbelastung für den Menschen berechnen lässt.

Ein beträchtlicher Aufwand wird zur Messung und Interpretation der **Sorption** verschiedener Elemente an verschiedensten Festphasen erbracht. Seit etwas über einem Jahr liegt das Schwergewicht auf einem mechanistischen Verständnis der Sorption im Rahmen von Oberflächenkomplexbildungs-Modellen. Zu diesem Zweck musste die geeignete Methodik für die experimentelle Versuchsführung entwickelt werden. Das System Nickel/Kalzi-



um/Montmorillonit wurde in Abhängigkeit von pH, Konzentrationen und Ionenstärke untersucht. Während Kalzium vorwiegend durch Ionentausch sorbiert, bildet Nickel bei pH > 5 Oberflächenkomplexe. Für Sorption von Cäsium auf Mylonit konnte eine Isotherme für die Bedingungen des Feldexperimentes im Felslabor Grimsel vorausgesagt werden. Das entsprechende Migrationsexperiment wird 1993 im Felslabor durchgeführt werden.

Die Entsorgungsaktivitäten des PSI werden von der NAGRA finanziell unterstützt.

## SICHERHEITSMERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Am 7. Juli hat der Nulleistungs-Reaktor PROTEUS erstmals Kritikalität mit einem Kern aus für HTR jetzt typischem niedrigangereichertem Brennstoff (*low enriched uranium, LEU*) erreicht. Die neuen **HTR-Experimente** [11] sind Hauptbestandteil eines koordinierten Forschungsprogrammes der IAEA, an dem neben der Schweiz weitere sechs Länder beteiligt sind. Im Rahmen dieses Programmes untersucht man experimentell und analytisch die HTR-Neutronenphysik zwecks Gewinnung qualitativ hochwertiger Messdaten; diese dienen der Validierung von Rechenprogrammen, die zur Analyse sicherheitstechnischer Aspekte (z.B. Reaktivitätsänderung bei Wassereintrich-Störfällen) und generischer Fragen zur Reaktorphysik (z.B. Reaktionsraten im doppelt heterogenen LEU-Brennstoff (Partikel/Brennelement), Neutronenleckage in Hohlräumen) eingesetzt werden.

Zur Bestätigung der im Sicherheitsbericht festgelegten Sicherheits- und Betriebsgrenzen des umgebauten Reaktors war die experimentelle Bestimmung der einzelnen Sicherheitsparameter (z.B. Wert der Kontroll- und Abschaltstäbe) besonders wichtig. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten erhalten, obwohl die kritische Höhe des Kugelhaufens in diesem ersten Kern signifikant (ca. 10%) unterschätzt wurde.

Das Ziel des Projektes ALPHA [12] ist die experimentelle und analytische Untersuchung sicherheitsrelevanter Eigenschaften zukunftsweisender Konzepte, nämlich von Wärme- und Stofftransport-Prozessen, die Schlüsselfunktionen für passive Langzeit-Nachwärmeabfuhr (NWA) in zukünftigen LWR bilden; am PSI werden die Auswirkungen der Präsenz nicht-kondensierbarer Gase auf die Funktionstüchtigkeit passiver Komponenten (Dampfkondensatoren) untersucht. Die Arbeiten konzentrierten sich im Berichtsjahr auf Auslegung, Berechnung, Konstruktion und Bau der verschiedenen experimentellen Anlagen. Dabei bildet die PANDA-Versuchsanlage das Kernstück des Projektes; sie simuliert den Reaktordruckbehälter, das Containment und die neuartigen passiven Containment-Kühlkondensatoren eines Siedewasserreaktors (SBWR) in Volumen-Maßstab 1:25, jedoch in Originalhöhe (25m). Die generelle Definition der Anlage und des Messkonzeptes sind erstellt; die internationalen Vertragspartner (EPRI, GE) haben sie begutachtet und akzeptiert. Die Herstellung der einzelnen Grosskomponenten (Behälter, Kühlkondensatoren) ist in einem fortgeschrittenen Stadium, das Betonfundament bereits fertiggestellt; der Aufbau der Anlage kann somit termingerecht im Februar 1993 in Angriff genommen werden. Parallel wurde ein umfangreiches Qualitätssicherungsprogramm durchgeführt.

Die zwei anderen im ALPHA-Projekt vorgesehenen Versuchsanlagen LINX (Mischungsvorgänge im Containment) und AIDA (Transport- und Aerosolverhalten in Kondensatoren) wurden ebenfalls ausgelegt und sind in Fabrikation. In einer relativ kleinen experimentellen Einrichtung LINX-I wurden bereits einige abklärende Vorversuche durchgeführt, um einerseits Auslegungsunterlagen für die grösseren Anlagen (PANDA, LINX-II) zu beschaffen, und andererseits um erste experimentelle Daten für die Entwicklung von Berechnungsmodellen bereitzustellen.

Mittlerweile hat das Projekt weiter an Bedeutung gewonnen, da die US-Aufsichtsbehörde (USNRC) den Nachweis der Funktionstüchtigkeit des passiven NWA-Systems als Schlüsselement für die Typenprüfung (*Design Certification*) des SBWR bezeichnet hat. Die Resultate der in PANDA-Testanlage geplanten Versuche werden daher im amerikanischen Genehmigungsprozess miteinbezogen. PANDA ist von der Grösse und Konzeption her auf absehbare Zeit die einzige Anlage, die derartige Untersuchungen zulässt.

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

Die Motivation für die Forschungsarbeiten zum **Natriumgekühlten Schnellen Brüter** [13] liegt am wissenschaftlichen Interesse zur Untersuchung physikalischer und thermohydraulischer Sicherheitsprobleme dieses Reaktortyps und am Verständnis allfälliger Sicherheitsprobleme grenznaher Brüterreaktoren, das den schweizerischen Behörden in Form von Expertisen zugute kommt. Die reaktorphysikalischen Berechnungen zeigen, dass die Behandlung der Resonanz-Wirkungsquerschnitte verbessert werden soll. Bei vorerst mit Wasser

simulierten Mischungsphänomenen im Primärkreislauf wurden mit Laserschnittbildtechnik die Wirbelentwicklung visualisiert, und die gemessenen Geschwindigkeitsprofile mit Rechnungen verglichen. Das Projekt wird durch das BEW und die Elektrizitätswirtschaft finanziell unterstützt.

Mit seinen Anlagen (Beschleuniger, Hotlabor), seiner Erfahrung in Reaktorphysik, Beschleunigerphysik, und Handhabung a-haltiger Stoffe (z.B. Plutonium) sowie durch die Entwicklung der Spallationsquelle SINQ ist das PSI in bester Lage, theoretische und experimentelle Arbeiten auf dem Gebiet der **Transmutation** (Umwandlung) von Actiniden durchzuführen [14]. Im Rahmen einer einjähriger Vorstudie, wurde einerseits die theoretisch erreichbare Toxizitätsreduktion von Np-237 und anderer langlebiger höherer Actinide ermittelt. Auf dem Gebiet der Brennstoffherstellung andererseits konzentrierten sich die Arbeiten auf Mischnitride als Vorläufer zu zukünftigen Actinidenbestrahlungen im Reaktor PHÉNIX. Parallel wird der Ersatz von Uran (selbst eine Quelle von Actiniden) durch inerte Materialien (z.B. Zirkon) untersucht. Diese Arbeiten, die auch der Aufrechterhaltung der Kenntnisse und Kapazität im Umgang mit nuklearem Brennstoff am PSI dienen, werden mit Unterstützung der Elektrizitätswirtschaft und des CEA durchgeführt.

### 3. Internationale Zusammenarbeit

- **CORVIS:** Vertragliche Kopplung von 18 Institutionen aus 9 Ländern (Frankreich, Deutschland, USA, Italien, Niederlande, Korea, Grossbritannien, Finnland und Schweiz)
- **Aerosol-Rückhaltung POSEIDON:** *Electric Power Research Institute* (EPRI, USA), Framatome.
- **Komponentensicherheit, HDR-Experimente, Spannungsrisskorrosion:** Kernforschungszentrum Karlsruhe, IAEA, MPA Stuttgart, VTT Finnland.
- **EDEN, Materialien des inneren Kernbereichs, Brennstoffforschung:** OECD/NEA-Halden Programme, EPRI/NFIR, internationale Brennstoffprogramme (DOMO, PRIMO, GEMINI, GAP/GAIN).
- **HTR-Experimente:** Delegierung von Experimentatoren aus USA, Deutschland, Japan, China, GUS im Rahmen IAEQ-Programm; Beteiligung von Frankreich.
- **ALPHA:** EPRI, General Electric.
- **Schneller Brüter:** European Fast Reactor (EFR), CEA.
- **Actinidentransmutation:** CEA, OECD/NEA

### 4. Perspektiven für 1993

Die oben dargestellten Programme stellen mittel- und langfristige Forschungsaktivitäten dar. Die meisten davon werden auch im 1993 fortgeführt oder werden durch neue Aufgaben auf verwandtem Gebiet ersetzt. Die eigentlichen CORVIS-Experimente sollen im März 1993 anfangen; es ist vorgesehen alle 2-3 Monate ein Durchschmelzexperiment durchzuführen. Die POSEIDON-Experimente werden Ende Januar 1993 starten und bis Ende 1993 dauern. Die erste Phase des Projektes STARS geht Ende 1993 zu Ende; es ist vorgesehen, den Zusammenarbeitsvertrag mit der HSK zu erneuern und den Schwerpunkt des Projektes auf die Analyse schwerer, auslegungüberschreitender Unfälle zu verlagern. Im Jahr 1993 ist es vorgesehen, bei den Untersuchungen zur LWR-Kontamination durch Verwendung neuer, sog. Couette-Autoklaven realistischere Laborbedingungen zu erreichen. Die Arbeiten zu KRISTALLIN-1 werden 1993 abgeschlossen. Die HTR-PROTEUS-Experimente werden 1993 mit Messungen an neue Anordnungen fortgeführt; das Projekt soll 1995-96 enden. Im Rahmen des

Projektes ALPHA werden die experimentellen Anlagen, insbesondere PANDA vervollständigt und instrumentiert; die ersten Messungen sind für Mitte 1994 geplant. Nach der abnehmenden Intensität der europäischen Aktivitäten zum schnellen Brüter, wird die Ausrichtung bzw. die Fortsetzung des Projektes 1993 zusammen mit den Vertragspartnern kritisch überprüft werden. Das gleiche gilt für die Aktivitäten zur Actinidentransmutation nach Abschluss der einjährigen Vorphase.

## 5. Publikationen

Im Rahmen der beschriebenen Projekte wurden 1992 über 70 Arbeiten in Fachzeitschriften bzw. in Tagungsbänden von internationalen Konferenzen publiziert; weitere über 60 Arbeiten wurden im Rahmen von Kolloquien und Seminaren präsentiert. Diese sind im Jahresbericht des Forschungsbereichs "Nukleare Energie" des PSI (Annex IV) aufgeführt; die Liste kann auch beim Programmleiter angefordert werden.

## 6. Liste der Projekte

Angaben über Jahresberichte (bzw. Schlussberichte) für die von BEW mitfinanzierten Projekte sind im Überblicksbericht zum Forschungsprogramm **Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK** zu finden.

- [1] S. Hirschberg, PSI - Villigen: *GaBE (Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen)*
- [2] H. Hirschmann, PSI - Villigen: *CORVIS (Corium-Reactor Vessel Interaction Studies)*
- [3] S. Güntay, PSI - Villigen: *POSEIDON-II - Experiment*
- [4] E. Schenker, PSI - Villigen: *Zündgrenzen CO<sub>2</sub>*
- [5] E. Knoglinger, PSI - Villigen: *STARS (Simulations-Modelle für Transienten Analysen der Reaktoren in der Schweiz)*
- [6] S. Brosi, PSI - Villigen: *HDR-Projektarbeiten*
- [7] P. Tipping, PSI - Villigen: *Spannungsriß-Korrosion - Loop*
- [8] E. Schenker, PSI - Villigen: *Kontamination LWR*
- [9] G. Bart, PSI - Villigen: *EDEN (Entwicklung, Durchführung und Evaluation von Nachbestrahlungsuntersuchungen)*
- [10] J. Hadermann, PSI - Villigen: *Programm Entsorgung radioaktiver Abfälle*
- [11] R. Chawla, PSI - Villigen: *HTR-PROTEUS - Experiment*
- [12] G. Varadi, PSI - Villigen: *ALPHA (Advanced LWR Passive Heat Removal and Aerosol Retention)*
- [13] R. Brogli, PSI - Villigen: *Sicherheit des Schnellen Brüters*
- [14] P. Wydler, R. Stratton, PSI - Villigen: *Actiniden-Transmutation (Physik, Brennstoff)*

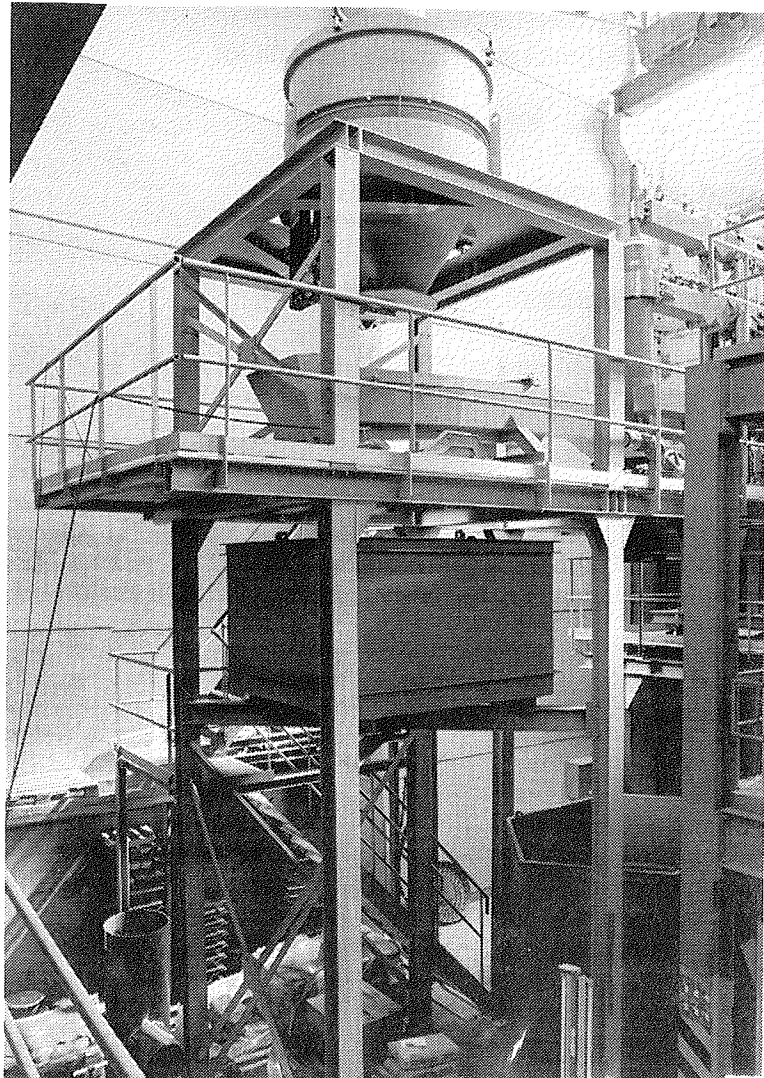


# REGULATORISCHE SICHERHEITS- FORSCHUNG DER HSK

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Sabyasachi Chakraborty

---



Experiment beim PSI zum Reaktordruckbehälter-Versagensmodus beim Kernschmelzen

Versuchsstand mit Versuchstiegel, Reaktionstiegel, Lichtbogenofen mit Grafitelektroden, verfahrbare Abstichrinne und Auffangwanne für Schmelze.

## 1. Programmziele

Das Forschungsprogramm zur Unterstützung der nuklearen Sicherheitsbehörde, die sog. **regulatorische Sicherheitsforschung der HSK** befasst sich mit aktuellen Fragen der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes im Zusammenhang mit der Erarbeitung von Entscheidungsgrundlagen für die nukleare Sicherheit nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik. Um das weite Spektrum der interessierenden Forschungen auf dem genannten Gebiet optimal abzustecken, wurden verschiedene Institutionen je nach Kompetenz für die Durchführung der Forschungsarbeiten beauftragt:

- Paul Scherrer Institut (PSI)
- Institute der Eidg. Technischen Hochschulen
- Inländische und ausländische Ingenieur-Unternehmungen
- Institutionen, die internationale Forschungsprogramme durchführen.

## 2. Arbeiten und Ergebnisse 1992

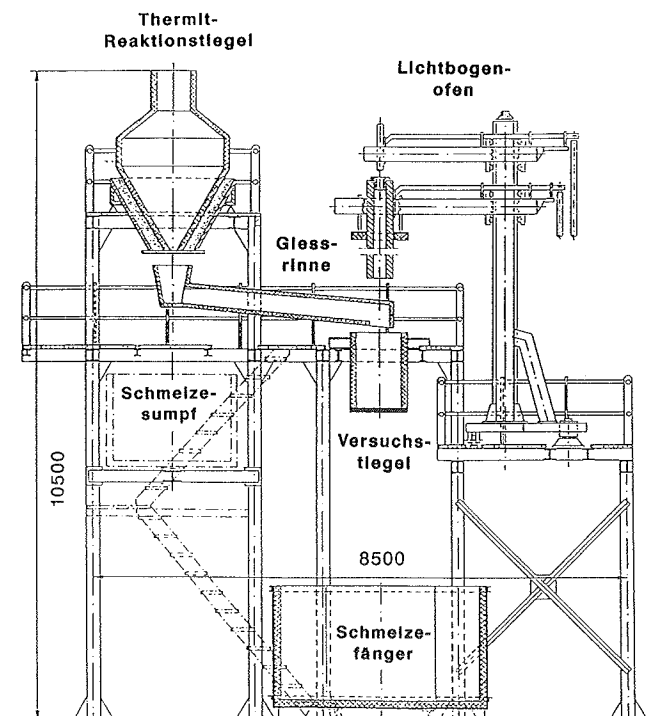
### TÄTIGKEITEN IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEM PSI

Die HSK-unterstützten Forschungsarbeiten im PSI können eingeteilt werden in Arbeiten auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit und Arbeiten auf dem Gebiet des Strahlenschutzes.

#### a) Nukleare Sicherheit

1. Das Projekt **CORVIS (Corium Reactor Vessel Interaction Studies)** [1] untersucht das Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) bei einem Kernschmelzunfall. Hierzu werden Experimente durchgeführt sowie numerische Modelle zum Versagensvorgang entwickelt. Das Projekt befindet sich noch in der Vorbereitungsphase.

Schema der Experimentieranlage CORVIS  
(siehe auch umseitiges Foto)



2. Das Projekt **STARS (Simulationsmodelle zur Transientenanalyse von LWR)** [2] befasste sich mit der Erprobung/Validierung und Erweiterung des Rechencode-Systems für die schweizerischen Kernkraftwerke (KKW). Zudem wurden die für die Analyse von Störfällen und Unfällen erforderlichen nuklearen anlagenspezifischen Datensätze aktualisiert. Erstmals konnten stationäre, axiale Leistungsdichteverteilungen - berechnet mit dem Programm RAMONA - mit Messwerten des Kernkraftwerkes Leibstadt genügend genau verglichen werden. Das Rechencode-System wurde um den Kern-Thermohydraulik-Code COBRA-41 und den Containment-Code CONTAIN erweitert. Damit ist es möglich, die HSK mit Analysen anlageninterner Störfälle entsprechend dem neusten Stand von Wissenschaft und Technik zu unterstützen.
3. Das Projekt **Spannungsrisskorrosion (SpRK)** von Stählen für Reaktorkomponenten im Heisswasser [3] hat die Durchführung von Versuchen im Heisswasserkreislauf als Hauptziel, um die Kühlmittelbedingungen und andere Randbedingungen (simulierte Reaktorbedingungen), unter welchen SpRK auftreten kann, zu untersuchen bzw. zu ermitteln. Erst nach starker Veränderung (Verschlechterung) der simulierten normalen Reaktorumgebungsbedingungen wurde bei 15 von 102 der im Heisswasserkreislauf des PSI eingesetzten Proben Spannungsrisskorrosion beobachtet. Es scheint, dass die Leitfähigkeit des Wassers bei den Versuchen eine dominierende Rolle spielt. Dies stellt ein interessantes Ergebnis dar und muss noch näher untersucht werden.
4. Mit der Mitarbeit im **HDR-Programm** [4] lieferte das PSI auf internationaler Ebene einen Beitrag zur Bruchmechanik-Forschung. Hauptziel dieser Forschung war, die Sicherheitsreserven sowohl von integren wie auch von rissbehafteten Reaktorkomponenten für den Lastbereich von Normalbetrieb bis zu extremen, auslegungüberschreitenden Störfällen zu bestimmen.
5. Mit dem Projekt **Wasserstoff-Zündgrenzen** [5] soll experimentell die untere Zündgrenze von Wasserstoff in wasserdampfhaltigen Luft-Kohlendioxid-Wasserstoff-Gemischen nach schweren Störfällen bestimmt werden. Dies soll dann erlauben, die Atmosphäre des Sicherheitsbehälters eines Druckwasserreaktors unempfindlich machen. Es wurden Zündversuche an Gemischen ohne und mit Wasserdampf im Temperaturfeld zwischen Raumtemperatur und 100° C durchgeführt. Gemische mit weniger als 7.5 Vol. % Sauerstoff lassen sich unabhängig vom Wasserstoffgehalt nicht mehr zünden.
6. Das Projekt Auswertung und Modellierung von **NEPTUN-Wiederbenetzungsdaten** [6] hat experimentelle Daten ausgewertet, um das Modell für das Filmsieden bei inverser Ringströmung zu verifizieren und zu verbessern.

**b) Strahlenschutz**

7. Im Projekt **LWR-Kontaminationskontrolle** [7] wurden folgende Arbeiten durchgeführt:
  - Die Vorarbeiten zu Untersuchungen zur Aktivitätsablagerung unter kontrollierter Strömung.
  - Die Messung der Aktivität des Reaktorwassers mit Erfassung der anionischen, kationischen und an Partikel gebundenen Radioaktivität, sowie der *on-line*-Partikelzählung im Kernkraftwerk Leibstadt vor und während der Abschaltung.
  - Umfangreiche Entwicklungsarbeiten und Kalterprobung zu Modifikationen am Schwebstoffloop und zu einer erweiterten *on-line*-Analytik (Kühl- und Heizfinger, Reflexionsspektroskopie, Messung des elektrischen Widerstandes und des Redoxpotentials des Wassers, das Korrosionspotential der Stähle und Impedanzmessungen).
8. Im Projekt **Dosimetrie** [8] wurden die allgemeinen Entwicklungsarbeiten an Spurendetektoren für die Neutronen-Personendosimetrie abgeschlossen. Es wurden verschiedene Detektormaterialien studiert, neue Ätzmethoden entwickelt und umfangreiche Studien zur Energie- und Winkelabhängigkeit des Ansprechvermögens durchgeführt. Im Rahmen internationaler Projekte wurde die Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Personendosimetrie überprüft.
9. Im Rahmen des Projektes **Strahlenschutzmesstechnik** [9] wurden Vorarbeiten in Form ausführlicher Literaturstudien für eine Richtlinie über Freigabemessungen von Materialien geleistet, sowie Abklärungen

zur Verbesserung der Jod-Kalibrierung von KKW-Abluftsystemen und zur Methode der Auswertung von komplexen Gamma-Spektren durchgeführt.

10. Das Projekt **RADAU** [10] hat ein Programmsystem zur Ermittlung der Dosisleistung durch atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe in komplexem Gelände entwickelt. Ein Auswahlverfahren für ein Modell, welches zugleich für Echtzeit- und Prognose-Simulationen nach störfallbedingten Emissionen geeignet ist, wurde auf der Basis von Bewertungskriterien wissenschaftlicher, Programm-/Maschinen-technischer und benützerseitiger Art erarbeitet und durchgeführt. In einer Vorwahl wurden 2-3 bestqualifizierte Modelle für jede der 5 gefundenen Approximationsmethoden ermittelt. Diese Modelle sind statistischer, deterministischer, Hybrid, gaussischer Puff und strömungsdynamischer Art. Sie wurden einem praktischen Test, der Analyse des Tracer-Experimentes SIESTA, unterworfen. Es zeigte sich eindeutig, dass das Hybridmodell ADPIC des APAC-Systems der *Lawrence Livermore National Laboratories* in USA das am besten geeignete Modell für atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Schadstoffe in komplexem Gelände darstellt.
11. Im Projekt **ECOSYS** [11] wurden Validierung und Sensitivitätsanalyse des radioökologischen Computermodells ECOSYS vorgenommen. Zweiundzwanzig Parameter wurden im Hinblick auf seine Empfindlichkeit zur Dosisbestimmung untersucht. Die empfindlichsten Parameter sind die Biomasse der Vegetation, Radionuklidtransfer von Pflanzen zu Tieren, Depositionsgeschwindigkeiten der Aerosole, Boden zu Pflanzen-Transfer der Radionuklide, Auslaugen der Radionuklide von der Wurzel-Zone der Pflanzen, Bodendichte, *food processing* Faktoren und Resuspension des kontaminierten Bodens.

#### TÄTIGKEITEN ZUSAMMEN MIT HOCHSCHULEN UND PRIVATWIRTSCHAFT

- Die Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie des Instituts für Geophysik der ETH Zürich [12] hat die Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke und des PSI durch **aerogammaskopmetrische Helikopteraufnahmen** vermessen. Diese Messungen werden jährlich wiederholt. Die gemessene künstliche Aktivität wird in Landkarten eingezeichnet. Die Resultate der Messflüge 1992 liegen im Rahmen der Erfahrungswerte der früheren Jahre, d.h. es wurden in der Umgebung der Kernanlagen keine nennenswerten Änderungen der flächenhaften Radioaktivitätsverteilung festgestellt.
- Das Institut für Metallforschung und Metallurgie der ETHZ [13] untersuchte das **Wachstum von Spannungskorrosionsrissen** in Reaktordruckbehälterstählen vom Typ MnMoNi 55 in Heisswasser von 288°C. Zurzeit werden die Grenzen dieses Risswachstums weiter erforscht und bestimmt. Die experimentellen Untersuchungen werden sowohl in Zusammenarbeit mit dem PSI im Heisswasserkreislauf am PSI als auch unter stagnierenden Bedingungen in den Autoklaven des ETH-Instituts durchgeführt.
- Im Rahmen des OECD Programmes PISC-III (*Programme for the Inspection of Steel Components*) [14, 15] wird in einem internationalen Ringversuch der derzeitige Stand der Prüftechnik der mechanisierten **Ultraschallprüfung** von Reaktordruckgefässen ermittelt. Die Firma SULZER-Innotec erfasste in diesem Zusammenhang den Stand der Technik bei der schweizerischen Reaktordruckgefässprüfung. Die Aktivität "NDW" (*Nozzles and Dissimilar Metal Welds*) ist weitgehend abgeschlossen. Der Ringversuch bestätigte viele bekannte Tatsachen, wie die Abhängigkeit der Rissauffindwahrscheinlichkeit von der Grösse, der Lage und der Orientierung des Risses sowie die Schwierigkeit der Tiefenbestimmung (grosse Streuung der Werte). Darüber hinaus konnte aber auch aufgezeigt werden, was von den heutigen Prüftechniken erwartet werden kann.

#### WISSENSCHAFTLICHE STUDIEN IM AUFTRAG DER HSK

- Optimierung (d.h. optimaler Zeitpunkt) der gefilterten Druckentlastung [16] des Sicherheitsbehälters während eines Kernschmelzunfalles. In diesem Projekt wurde ein PC-Simulationsmodell entwickelt, mit dem standortbezogene Entlüftungsstrategien getestet und optimiert werden können. Dabei werden verschiedene radiologische Auswirkungen auf die Bevölkerung in Betracht gezogen.
- Es wurden Spannungs- und Verformungsanalysen für ein Durchführungsrohr im Randbereich des Reaktordruckbehälter-Deckels durchgeführt [17].



- Die Studie **Vergleich der Erdbebengefährdung an den Standorten der schweizerischen Kernkraftwerke** [18] erklärt die Unterschiede im Lichte der verwendeten unterschiedlichen Berechnungsannahmen. Betrachtet werden der Bezugshorizont, die Gefährdungsfunktion und der Frequenzinhalt.
- Um die Risikoanalysen der schweizerischen Kernkraftwerke nach einem einheitlichen Verfahren zu überprüfen, wurde ein *Review Guidance Document* [19] erstellt.
- Der schwere Kernschmelzunfall-Code MELCOR der *U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)* (die HSK beteiligt sich finanziell am Forschungsprogramm der NRC) [20] wurde für die Modellierung der schweizerischen Kernkraftwerke Mühleberg, Beznau, Gösgen und Leibstadt implementiert. Es wurden umfangreiche Modellierungen und numerische Sensitivitätsstudien durchgeführt.
- Im weiteren wurde für die Beurteilung der Risikostudie des Kernkraftwerkes Beznau das Anlagesimulations-Modell für den modernen SCDAP/RELAP5 Computer Code für schwere Unfälle der NRC entwickelt.

### 3. Publikationen

Über die geleisteten Arbeiten wurde eine grosse Anzahl von Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht sowie zahlreiche Papers an Fachkonferenzen der *Nuclear-Community* präsentiert. Eine Liste dieser Beiträge ist in den entsprechenden Projekt-Jahresberichten aufgeführt.

### 4. Internationale Zusammenarbeit

Auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheit spielt die internationale Zusammenarbeit eine zentrale Rolle. Sie bedeutet einerseits Zusammenarbeit mit ausländischen Institutionen, andererseits Mitarbeit an internationalen Forschungsprogrammen, z.B. Aktivitäten der *OECD-Nuclear Energy Agency*, der Internationalen Atomenergieagentur sowie der Europäischen Gemeinschaft. Eine solche Zusammenarbeit fand praktisch bei allen grossen Forschungsprojekten statt.

Die Beteiligung an internationalen Forschungsprogrammen betraf:

- Halden Reactor Projekt der OECD
- TMI-Reactor Pressure Vessel Investigation Programme der OECD
- Forschungsprogramm für schwere Kernkraftwerkunfälle der USNRC
- OECD Programme for the Inspection of Steel Components (PISC III)
- The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) der USNRC

### 5. Bewertung

Die genannten Forschungsprojekte konnten die anvisierten Jahres-Projektziele weitgehend erreichen. Bei den Projekten [2, 10] traten begründete Verzögerungen auf. Die einzelnen Projekte wurden durch die Forschungsleiter der HSK kritisch verfolgt. Eine Art der Qualitätssicherung der Arbeiten kann durch Publikation in renommierten wissenschaftlichen Zeitschriften, die strenge Review-Verfahren haben, erreicht werden. Einige Projekte haben diese Art von Publikationen wahrgenommen.

Beim PSI sind die Projekte [2, 3, 5, 9, 10] für die HSK von unmittelbarem Interesse. Die Resultate dieser Forschungsarbeiten fliessen direkt in die Bewertungsgrundlagen zur Sicherheit der Kernkraftwerke der HSK. Von eher generellem Interesse für die nukleare Sicherheit und den Strahlenschutz sind die Projekte [1, 4, 6, 8, 11].

## 6. Liste der Projekte

- [1] H. Hirschmann, PSI - Villigen: *Experimente zum RDB-Versagenmodus beim Kernschmelzen (CORVIS)*. (JB)
- [2] E. Knoglinger, PSI - Villigen: *Simulationsmodelle zur Transientenanalyse (STARS) von LWR*. (JB)
- [3] R. Attinger, U. Ineichen, Ph. Tipping, PSI - Villigen: *Spannungsrissskorrosion von Stählen für Reaktorkomponenten in Heisswasser*. (JB)
- [4] S. Brosi, PSI - Villigen: *Heiss-Dampf-Reaktor (HDR)*. (SB)
- [5] E. Schenker, PSI - Villigen: *Wasserstoff-Zündgrenzen*. (JB)
- [6] J. Dreier, PSI - Villigen: *Auswertung und Modellierung von NEPTUN-Wiederbenetzungsdaten*. (JB)
- [7] E. Schenker, PSI - Villigen: *Kontaminationskontrolle im Primärkreislauf von schweizerischen Siedewasserreaktoren*. (JB)
- [8] C. Wernli, D. Azimi, PSI - Villigen: *Dosimetrie*. (JB)
- [9] Ch. Schuler, PSI - Villigen: *Strahlenschutzmesstechnik*. (JB)
- [10] V. Herrnberger, PSI - Villigen: *Programmsystem RADAU für die Ermittlung der Dosisbelastung durch atmosphärische Ausbreitung radioaktiver Stoffe im komplexen Gelände*. (JB)
- [11] R. Andres, PSI - Villigen: *Validation and sensitivity analysis of the radioecological computer model ECOSYS*. (JB)
- [12] L. Rybach, ETH - Hönggerberg: *Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen*. (JB)
- [13] R.M. Pedrazzoli, A. Kraus, M.O. Speidel, IMM / ETH - Zürich: *Spannungsrissskorrosion von Reaktordruckbehälterstählen*. (JB)
- [14] SULZER-INNOTECH, Winterthur: *OECD Programme for Inspection of Steel Components (PISC III) Aktivität Nr. 2 Full Scale Vessel Test (FSV) und Mitarbeit in der Data Analysis Group (DAG) Nr. 2.2*. (JB)
- [15] SULZER-INNOTECH, Winterthur: *OECD Programme for the Inspection of Steel Components (PISC III) Aktivität Nr. 3 Nozzles and Dissimilar Metal Welds (NDW) und Mitarbeit in der Data Analysis Group (DAG) Nr. 3.1, sowie Aktivität Nr. 4 Round Robin Test on Austenitic Steel (AST)*. (JB)
- [16] B. Covelli, TECOVA, Wohlen: *Optimierung der gefilterten Druckentlastung*. (JB)
- [17] H.J. Rensch, SDK, Basel: *Spannungs- und Verformungsanalyse im Inconelrohr im RDB-Deckel infolge Schweissnahteigenspannungen*. (SB)
- [18] J.-C. Griesser, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Vergleich der Erdbebengefährdung an den Standorten der schweizerischen Kernkraftwerke*. (SB)
- [19] M. Khatib-Rahbar, ERI, USA: *Preparation of a Review Guidance Document for Swiss Nuclear Power Plants*. (SB)
- [20] M. Khatib-Rahbar, ERI, USA: *Technical Support for Implementation of Severe Accident Methods*. (SB)
- [21] M. Khatib-Rahbar, ERI, USA: *Additional System Analysis & Severe Accident Technical Support to HSK concerning detailed Review of Beznau Probabilistic Safety Assessment*. (SB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

# SOLAIRE THERMIQUE ET STOCKAGE DE CHALEUR

Rapport de synthèse  
sur les activités 1992 du programme de recherche

Chef de programme: Pierre Bremer

POLYSUN [C] Copyright BEW, OFLN 1992

File Edit POLYSUN

**Projektdatenblatt**

**Projekt** Code **P002** Ort **JONA**  
Beschreib **DEFH Curtiberg, Jona**

Standort

**Thermische Sonnenenergieanlagen, Projekt P002 [DEFH Curtiberg, Jona]**

Variante **6** Projekt **P002** letzte Änderung 19 JUN 92 15:16  
Bezeichnung Variante auf Vordach

Anlagentyp  
☒ 1-Speicher WW  
☐ 2-Speicher WW  
☐ Thermosyphon WW

täglicher Warmwasserverbrauch **300** Liter  
 Kollektornummer aus LTS\_Katalog **4** Kollektorkatalog  
 Bezeichnung **Azur 3**

Kollektorausrichtung in Grad  
 5.970  
 m2  
 Nord  
 45  
 Süd  
 0

Leitungslängen im Haus  
 Vorlauf **8.00** m  
 Rücklauf **8.00** m

Bemerkungen:  
Niedrigenergie

Anlageparameter Vordimensionierung Simulation Resultate

Neu Kopieren Ändern Suchen << >> Löschen Abbruch Ok

POLYSUN

La nouvelle interface conviviale pour codes solaires thermiques

## 1. Objectifs

L'année 1992 a été une année d'adaptation: bien que la plupart des domaines d'application de l'énergie solaire thermique aient été traités, ils doivent être consolidés dans la pratique. Le nouveau programme 1992-1995 élargit les applications à la production de froid et d'électricité thermosolaire. La collaboration avec l'industrie est renforcée.

Cofinancés par l'OFEN, quatre projets ont pu être menés à terme [6, 7, 22, 23]. Deux projets sont en voie d'achèvement [8, 14]. Onze projets sont encore en cours [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 21] et six projets sont nouveaux [15, 16, 17, 18, 19, 20].

## 2. Les travaux effectués en 1992

### MÉTÉOROLOGIE SOLAIRE

Dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), un projet visait à déterminer des techniques adéquates pour l'interpolation spatiale du rayonnement solaire et des procédures d'établissement de données météorologiques annuelles de référence (*DRY : Design Reference Year*). Bien que les travaux soient terminés, la rédaction internationale des rapports finals est restée en souffrance et leur parution a dû être reportée à 1993 [1]. Mentionnons que seize "*DRY*" ont été établis pour la Suisse et sont obtenables auprès de la Division *Bauphysik* de l'EMPA, à Dübendorf.

Ces procédures seront utiles pour la mise à jour de la publication METEONORM 95.

### COMPOSANTS

Comme par le passé, les travaux de recherche courants concernant tous les aspects de la technique des capteurs actifs ont été poursuivis au Laboratoire fédéral d'Héliotechnique de Rapperswil. Les résultats principaux sont [2]:

- 27 nouveaux capteurs ont été testés, ce qui porte leur nombre au total à 55. Les catalogues des protocoles de mesures ont été diffusés à plus de 700 exemplaires.
- La demande pour des essais particuliers est en constante progression : 17 capteurs ont été testés selon des cahiers des charges spécifiques, notamment 4 capteurs construits par des associations de constructeurs en *do-it-yourself* (*Selbstbaugruppen*).
- L'infrastructure de mesures a été complétée d'un stand pour les capteurs à air.
- Le rapport sur la résistance aux intempéries des couvertures transparentes (plus de 3 ans d'essais) paraîtra en 1993.
- Le rapport sur le traitement de surface des absorbeurs (établi en commun avec des centres de recherche suédois et allemand) est en procédure de consultation.
- Les essais sur les caloporteurs haute température (170°C) permettent d'envisager une solution satisfaisante au lancinant problème de la surchauffe des capteurs à l'arrêt.

Dans le cadre du projet AIE *Advanced Active Solar Energy Systems* auquel participent 9 pays, l'amélioration de performance d'un chauffe-eau escomptée par réduction du débit capteur n'est pas confirmée, du moins pas sur les configurations typiquement suisses. La maîtrise d'une stratification optimale dans l'accumulateur reste un art difficile. Néanmoins, grâce à la synergie résultant des expériences acquises dans les autres pays, une *toute*

*nouvelle conception d'un chauffe-eau solaire a pu être imaginée. Elle se distingue par sa simplicité et son coût de production nettement réduit. Un premier prototype a été construit et sera testé en 1993 [3].*

L'élément principal d'un capteur est son absorbeur. C'est aussi l'un des plus coûteux. Réduire les coûts tout en améliorant le rendement d'absorption est le but du nouveau projet **Absorbeur 2000** lancé en commun par l'ITR à Rapperswil et les Universités de Bâle et de Hambourg. Partant de la construction classique dite "tube à ailette", il s'agira de développer une méthode de fabrication industrielle et un traitement de surface sélective non galvanique [4].

Les chauffe-eau solaires intégrés (capteur et accumulateur dans une même unité) sont peu pratiqués en Suisse. Ils ont l'avantage de simplifier le raccordement au réseau d'eau. Dans le projet **Toblerone**, trois prototypes sont à l'étude. Ils ont la forme du chocolat bien connu, dont deux pans ont la fonction d'absorbeurs. Les prototypes ont été fabriqués et les essais auront lieu en 1993 [5].

## APPLICATIONS

Plusieurs projets, dont la durée s'est étendue sur plusieurs années, ont pu être menés à terme :

- Les performances d'installations solaires de **production combinée** d'eau chaude et de chaleur de chauffage de trois maisons individuelles, identiques aux habitants près, ont été mesurées pendant deux saisons. Le but du projet était d'analyser diverses configurations du système de gestion de l'accumulateur, notamment l'*injection directe*.

Les résultats principaux obtenus sont :

L'injection directe donne les meilleurs résultats, mais pas d'une façon significative. En effet, la puissance de chauffage solaire et le volume de stockage de ces installations sont souvent trop faibles par rapport à la demande de chauffage, de sorte qu'il y a rarement excès de chaleur. En outre, dans les 2 autres installations du type "en vrac", l'accumulateur n'est pas raccordé à la chaudière (configuration "normale"), ce qui réduit les pertes de stockage d'autant et rapproche leur performance à celle de l'injection directe.

Ce sont ces deux dernières configurations qu'il faut recommander pour ce type d'application et réserver l'injection directe au cas de stockage long terme [6].

- Les expériences acquises sur le projet **SOLARIN 2** (400 m<sup>2</sup> de capteurs évacués, chaleur industrielle) ont été consignées dans le rapport final, encore en consultation. Ce rapport servira également de guide pour les applications industrielles [7].
- Le projet **Marcinhès**, un centre industriel et artisanal, a finalement dû être interrompu, les installations n'étant toujours pas terminées et le bâtiment sous-occupé. Les mesures ont été arrêtées. Il a été convenu avec le responsable du projet que le rapport final fera l'objet de la thèse d'un doctorant, qui a plus particulièrement suivi l'installation de pompe à chaleur avec stock solaire saisonnier en terre. La thèse paraîtra en octobre 1993 [8].

Les projets suivants sont toujours en cours :

L'installation pilote de **stockage saisonnier en nappe phréatique** a dû être modifiée, afin de freiner l'écoulement important constaté lors de la première année de fonctionnement. Un système de *by-pass* hydraulique a été mis en place en 1992. L'installation sera de nouveau opérationnelle en 1993 [9].

Le dixième cycle de **SPEOS** (Stockage de chaleur en nappe phréatique, à EPF-Lausanne) a confirmé le bon fonctionnement de l'échangeur à lit fluidisé, mais le colmatage des drains en aval, initialement nul, s'est progressivement manifesté. Lors d'un colloque international, une équipe de chercheurs allemands a proposé un dispositif d'injection de CO<sub>2</sub> à métal fritté qui "pulvérise" les bulles de CO<sub>2</sub>. Les résultats obtenus à ce jour donnent pleine satisfaction [10].

La préétude concernant la possibilité d'un **stockage latent** de chaleur de récupération dans un système industriel est retardée par des difficultés opérationnelles du système de rejet de chaleur. Il s'agit d'un séchoir à air chaud d'engrais produits à partir de boues de station d'épuration d'eaux usagées. L'échangeur air / eau s'encrasse rapidement par la charge organique de l'air. Le problème à résoudre d'abord est la filtration de l'air avant de pouvoir entreprendre la préétude [11].

Un système de **régulation prévisionnel** a été installé sur deux chauffe-eau solaires dans deux maisons familiales identiques. Le circuit solaire comporte, en outre, un échangeur de chaleur sur le retour d'un chauffage de sol. Il s'agit de mettre en évidence le gain de performance obtainable en gérant la production d'eau chaude, le chauffage et la chaudière d'appoint en fonction d'algorithmes de commande optimale basés sur la prévision de l'ensoleillement et de la température extérieure. Afin d'éviter un biais entre les deux utilisateurs, la régulation prévisionnelle est alternée tous les 15 jours entre les deux villas. La mise en service a eu lieu fin octobre 1992 et les premiers résultats sont attendus après la période de chauffage 92 / 93 [12].

Dans une première phase d'approche technologique, le Laboratoire d'Énergie Industrielle de l'EPF-Lausanne a pu tester au banc d'essais et sur site un circuit solaire dont le caloporteur est un fluide organique. Le capteur spécial est à la fois **évaporateur et condenseur**. Il est constitué de tubes évacués et de tubulures de condensation. Les valeurs de température et de pression obtenues permettent d'envisager un cycle thermodynamique de Rankine, en utilisant un compresseur *scroll* fonctionnant en turbine. Aussi a-t-il été décidé d'entamer en 1993 la deuxième phase dédiée aux essais pratiques sur turbine *scroll*, domaine d'application inexploré jusqu'ici. Les aspects théoriques du circuit seront étudiés par le Laboratoire des systèmes énergétiques de l'EPF-Zürich [13].

Le capteur "**asphalte**", serpentín de cuivre coulé dans l'asphalte d'une zone piétonnière et servant à la recharge d'un stock en terre alimentant une pompe à chaleur, a produit 330 kWh/m<sup>2</sup> an pendant la saison 91 / 92. Les prévisions initiales de 250 kWh/m<sup>2</sup> an sont donc nettement dépassées. La campagne de mesure est terminée et le rapport final est en préparation [14].

Six nouveaux projets ont été mis en route :

- Le projet **SAILLON 1 MW Solaire** comporte 1'000 m<sup>2</sup> d'absorbeurs (sans couverture transparente) installés sur les toits d'un complexe de 48 logements. Ce projet bénéficie d'une aide financière de la Confédération au titre de projet pilote P+D. Les absorbeurs alimentent un stock saisonnier en aquifère et une distribution de chaleur originale CALOBUS (eau chaude et chauffage par le même réseau). Le projet de recherche consiste en un suivi expérimental de l'installation solaire. La mise en service est prévue pour le printemps 1993 [15].
- Les *sheds* d'une halle industrielle sont couverts de **panneaux photovoltaïques hybrides** refroidis à l'air. L'air ainsi préchauffé est utilisé pour la ventilation de la halle. En été, la chaleur est stockée en terre. Le projet comporte la modélisation du système et le suivi expérimental. Le système de mesure (140 variables) a été mis en place et les mesures ont débuté en novembre 1992. L'ensemble électrique et thermique fonctionne selon les prévisions. La puissance thermique est environ 4 à 5 fois plus grande que la puissance électrique, soit un rendement "hybride" de l'ordre de 60 %. Une analyse complète sera possible en automne 1993 [16].
- Les résultats de mesures de la **maison familiale autonome** (80 m<sup>2</sup> / 118 m<sup>3</sup> de stockage en cuve à eau) avaient démontré un large surdimensionnement. Les excédents sont maintenant injectés dans la fabrique d'équipement solaire voisine. Son toit est entièrement couvert de capteurs solaires (520 m<sup>2</sup> électriques, 80 m<sup>2</sup> thermiques), ce qui permet d'assurer l'*autonomie énergétique de cette fabrique*. Le chauffage est assuré par une pompe à chaleur. Le système d'acquisition de données a été installé : les mesures ont débuté en juillet (photovoltaïque) et en décembre 1992 (thermique) [17].
- Le préchauffage d'eau chaude sanitaire (e.c.s) dans les maisons multifamiliales est actuellement l'application optimale (énergétiquement et économiquement) de l'énergie solaire. Il importe également d'en faire les bilans. Afin d'éviter de longues périodes de mesures, une méthodologie de mesure rapide (quelques semaines) a été mise au point pour des petites installations familiales. Il importe de l'étendre à des installations plus grandes. C'est le but du projet **Signature énergétique d'une grande installation de préchauffage d'eau chaude sanitaire**. Il se présente sous la forme d'un immeuble des années 60,

avec 126 logements, et 400 habitants. Lors d'une rénovation, 210 m<sup>2</sup> de capteurs et un accumulateur de 4 m<sup>3</sup> ont pu être installés. Le bouilleur électrique existant est de 2 m<sup>3</sup>. La consommation moyenne est de 20 m<sup>3</sup>/jour. L'installation de mesure est terminée et les mesures fines commenceront en 1993 [18].

- Le **séchage solaire** du foin est très répandu en Suisse. On compte quelque 1'300 installations, la plupart construites par leur propriétaire. Le dimensionnement de ces installations se fait selon un programme de calcul établi en son temps sur un modèle réduit. Il s'agissait de vérifier par des mesures sur des installations réelles. En même temps, un questionnaire a été envoyé aux 1'300 propriétaires: 550 ont répondu. Le dépouillement est en cours. Plusieurs installations font ou feront l'objet de mesures selon la nature du toit : Eternit ondulé, toit alu, ou encore de toit tuiles. L'analyse des mesures sera terminée au début 1993 et les résultats serviront au cours PACER [19].
- Un **bâtiment administratif climatisé** est en quelque sorte un objet idéal pour l'application de l'énergie solaire active, la réfrigération estivale pouvant être réalisée au moyen de machines de froid à absorption. Une préétude théorique au moyen de modèles de simulation a débuté en novembre 1992. Il s'agira d'optimiser la production de froid et de chauffage d'un bâtiment administratif fortement isolé et d'atteindre un taux de couverture aussi élevé que possible [20].

## LOGISTIQUE

Le projet d'une **signature énergétique pour installations solaires** (production combinée d'eau chaude et chaleur de chauffage) a dû être définitivement interrompu, le chercheur responsable des programmes informatiques étant tombé gravement malade. L'état d'avancement des travaux a néanmoins pu être conservé sous une forme permettant un achèvement du projet [21]. Ceci se fera dans le cadre d'un projet AIE, coordonné par la Suisse.

Le logiciel informatique convivial pour praticiens **POLYSUN** (voir exemple page de garde) est terminé et est disponible auprès d' INFOENERGIE. Dans sa version actuelle, il tourne sur le code *Windows 3.1* et comprend les données d'ensoleillement de tout lieu en Suisse, les données techniques de tous les capteurs testés au Laboratoire de Rapperswil et permet le calcul détaillé d'installations de production d'eau chaude sanitaire. Une mise à jour permanente est assurée [22].

L'analyse des **facteurs socio-économiques limitant l'utilisation de l'énergie solaire** est terminée et se présente sous document très complet brossant la situation actuelle de l'énergie solaire thermique en Suisse. Les milieux immobiliers ont été contactés, ainsi que les constructeurs de matériel solaire. Parmi les nombreux obstacles analysés citons : les obstacles économiques et financiers, les rapports propriétaires-locataires, la réglementation en matière de droit des constructions, le manque d'information des décideurs. Ce document sera fort utile dans le cadre du programme ENERGIE 2000 [23].

## 3. Collaboration nationale et internationale

Le projet **Absorbeur 2000** s'effectue en collaboration avec le programme de recherche Thermochimie et avec l'industrie. De même, la **nouvelle conception d'un chauffe-eau solaire** bénéficie de la collaboration de l'industrie.

La participation de la Suisse aux projets de l'AIE dans le domaine de l'énergie solaire thermique reste très active:

- Le projet *Advanced Solar Energy Systems* entrera dans sa 4<sup>ème</sup> année en 1993. La Suisse assume la coordination d'une activité.
- La préparation du nouveau projet *Advanced Glazing and Associated Materials for Solar and Building Applications* est terminée. La Suisse y participera activement.

- Le projet *Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage in the Built Environment* a dû être reporté d'une année par manque de cas concrets, bien que la Suisse aurait au moins 2 cas à offrir.

#### 4. Transfert à la pratique

De nombreux projets d'application sont une forme pratique de transfert des connaissances. Ce type de transfert est en outre favorisé par les projets Pilotes & Démonstration et le programme de promotion du solaire actif.

Un séminaire d'information sera organisé en 1993.

#### 5. Perspectives 1993

Divers nouveaux projets sont prêts à être mis en oeuvre en 1993, notamment l'étude d'un système de récupération de chaleur dans les serres horticoles et, comme déjà mentionné, la poursuite des essais sur un cycle de Rankine solaire.

#### 6. Liste des projets en cours en 1992

- [1] A. Zelenka, ISM - Zürich: *Techniques for Supplementing Network Data*. (RA)
- [2] U. Frei, IT - Rapperswil (Solarenergie Prüf- und Forschungsstelle): *Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Solaranlagen*. (RA)
- [3] U. Frei, IT - Rapperswil: *Optimierung von solaren Wasserwärmungsanlagen mittels der Low-Flow-Technik*. (RA)
- [4] U. Frei, IT - Rapperswil: *Absorber 2000*. (RA)
- [5] J.-Ch. Hadorn, BSI, Lausanne & ENERGIE SOLAIRE, Sierre: *Chauffe-eau solaire intégré*. (RA)
- [6] O.Zahn, L.Keller, M.O.Nilsson, C.Calatayud, KELLER & ZAHN, Lavigny: *Mise au point et test d'installations solaires à injection directe simplifiée*. (RF)
- [7] J.V. Hurdes, HURDES ENERGIECONSULTING, Langwiesen: *Industrielle Sonnenenergienutzung in der Praxis*. (RF) (à paraître).
- [8] A.Mermoud, D.Pahud, O.Guisan, B.Lachal, GAP & CUEPE / Uni - Genève: *Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE)*. (RA)
- [9] J.-Ch. Hadorn, BSI, Lausanne & ENERGIE SOLAIRE, Sierre: *U-Sierre*. (RA)
- [10] B. Saugy, LMS / GPGU & LENI / EPF - Lausanne: *SPEOS, Test de traitement et évaluation*. (RA)
- [11] F. Righetti, INTERTECNIC, Vevey: *Stockage latent intégré dans un système industriel*. (RA)
- [12] J.-L.Scartezzini, EAUG / CUEPE, Uni - Genève: *Régulateur prévisionnel appliqué à une installation solaire active*. (RA)



- [13] Y. Allani, LENI-DME / EPF - Lausanne: *Mini-centrale solaire alpine "SCIP"*( phase d'approche technologique). (RA)
- [14] B. MATTHEY, Montezillon: *Analyse du bilan énergétique de l'installation héliogéothermique de la salle polyvalente de Cortaillod*. (RA)
- [15] J.-Ch. Hadorn, ENERGIE SOLAIRE, Sierre, & BSI, Lausanne: *Saillon IMW solaire*. (RA)
- [16] P. Berchtold, ENERGIE & HAUSTECHNIK, Sarnen: *Fabrikgebäude mit einem hohen solaren elektrothermischen Deckungsgrad*. (RA)
- [17] P. Stähli, HTL- Burgdorf: *Energiemessung an Solarwerkstatt Jenni*. (RA)
- [18] B. Lachal, CUEPE, Genève : *Application d'une procédure de test à un système solaire de préchauffage de l'ECS : SPIRKL-CGO*. (RA)
- [19] K. Egger, INFOENERGIE, Tänikon: *Sonnenkollektoren für die Heubelüftung : Erfolgskontrolle*. (RA)
- [20] O. Berchtold, Ch. Fillieux, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Ganzjährige Nutzung der Solarenergie in Bürogebäuden*. (RA)
- [21] A. Eggenberger, EGGENBERGER BAUPHYSIK, Burgdorf: *Kurztestmethode für Sonnenenergieanlagen (KTSA)*. (RA)
- [22] E. Rohner, EXERTEC ENGINEERING, Rapperswil : *POLYSUN, allgemeine Benutzeroberfläche für solartechnische Programme*. (RA)
- [23] P. Rezzonico, P. KRUMMENACHER, Villars-Burquin: *Analyse socio-économique des obstacles à l'utilisation de l'énergie solaire thermique*. (RF)

(RA) rapport annuel 1992 disponible

(RF) rapport final disponible

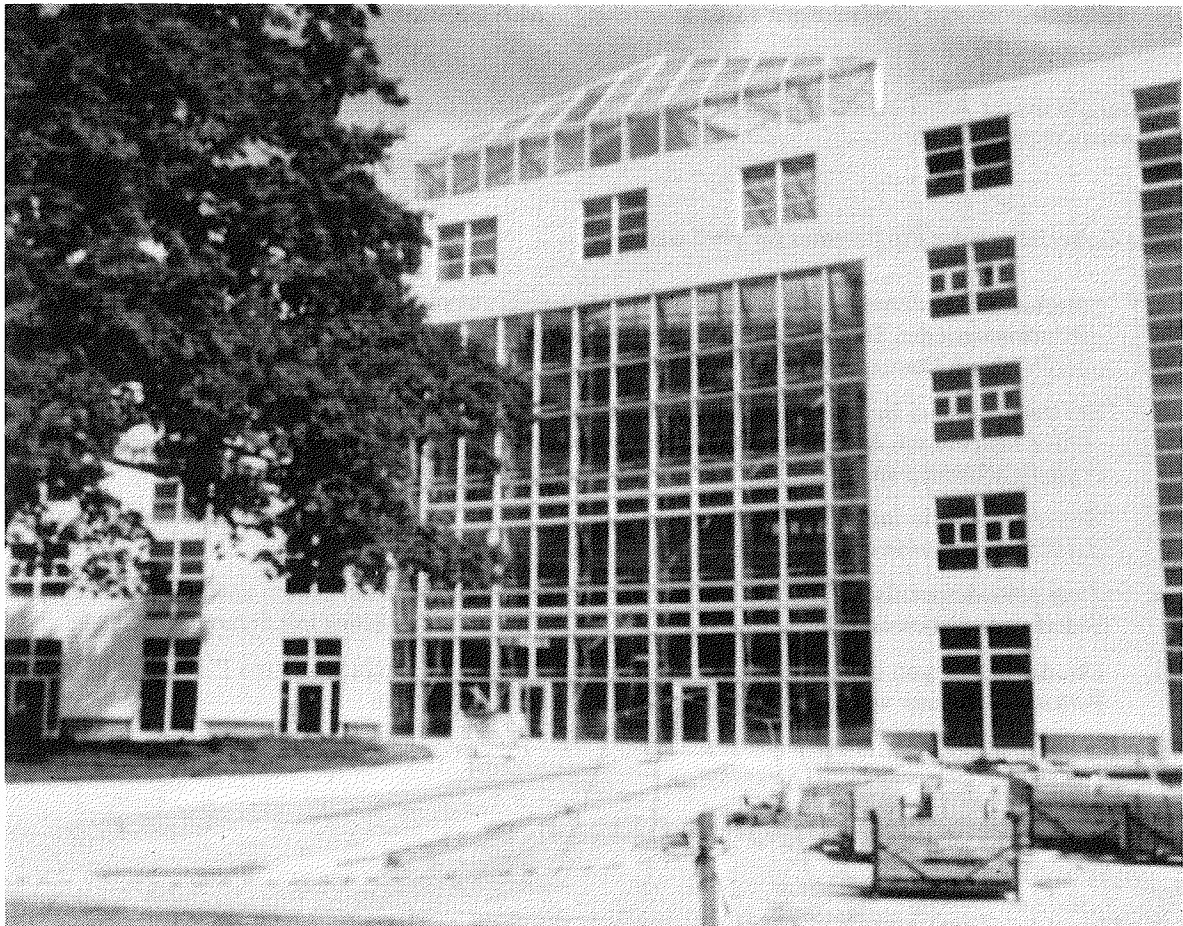


# SOLARARCHITEKTUR

**Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992**

**Programmleiter: S. Robert Hastings**

---



## **Bürogebäude LANDIS + GYR in Zug**

Vom energetischen Standpunkt aus gesehen ermöglichen Atrien die Tageslichtnutzung im Innern und vermindern die Heizlast, sei es durch ihre Wirkung als Pufferzone, oder Vorwärmung der Frischluft. An diesem Bau soll die Wirksamkeit eines Atriums durch Messungen und Auswertungen bestimmt werden.

## 1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1992

**Solararchitektur** ist die gezielte, intensive Nutzung der Sonnenenergie als Quelle für Wärme und Licht, um Heizenergie- und Stromverbrauch minimal zu halten, ohne Komforteinbusse wegen Überhitzung oder Blendung.

Das Forschungsprogramm **Solararchitektur** befasst sich mit den passiven und hybriden Nutzungsmöglichkeiten der Sonnenenergie und deren Integration in den Bau. Untersucht werden mittels Computermodellen, Auswertung von Prototypen und Messungen an Gebäuden:

- **Solarthermische Systeme** (Solarluftheizsysteme, Luftabsaugfassaden, transparente Wärmedämmung, gebäudeintegrierte Wärmespeicher, neue Gläser )
- **Tageslichtnutzung** (Messprojekte, numerische Simulation )
- **Gebäudespezifische Anwendungen** (Solaranwendungen nach Gebäudetyp, Niedrigenergiehäuser, Sanierungsmassnahmen)

Resultate dieser Arbeiten sind: neue Konzepte, Bauelemente und Komponenten, Planungshilfsmittel und Simulationsprogramme.

Die Zielsetzungen des Programmes für 1992 waren:

1. Solarluftheizsysteme besser verstehen und Verbesserungsmöglichkeiten finden: Untersuchung von gebäudeintegrierten Solarheizsystemen, insb. Hypokausten; Messkampagnen an Bauobjekten; Konzeptoptimierung durch Computermodell.
2. Bei transparenten Bauteilen die Entwicklung neuer Produkte und Lösungen des Überhitzungsproblems weiter bearbeiten. Mögliche Vorteile einer schweizerischen Beteiligung am IEA-Programm und Prüfmöglichkeiten an der EMPA in Dübendorf und am IT-Rapperswil abklären.
3. Konzepte für die intensive Nutzung von Tageslicht, um den Stromverbrauch zu verringern, mittels physikalischer sowie mathematischer Modellierung weiter untersuchen.
4. Zwei gebäudespezifische Themen hatten Schwergewicht: Neubauten mit extrem tiefem bis null Heizenergiebedarf und existierende Gebäude als Kandidaten für wirksame Sanierung mit Solarmassnahmen.
5. Um die bisherigen Erkenntnisse den Planern zugänglich zu machen, sollten Planungshilfsmittel auf Personal-Computer weiterentwickelt, ergänzt und ausgetestet werden.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

### SOLARLUFTHEIZSYSTEME

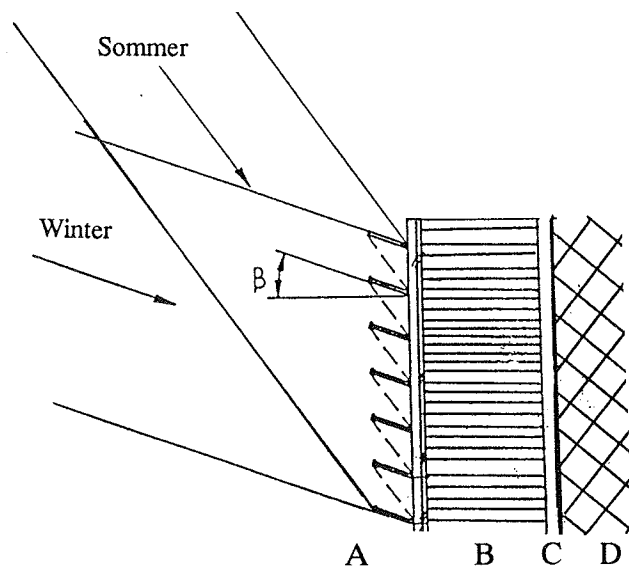
Um die Jahresmitte wurde das Projekt **Entwicklung eines Rechenmodells für Hypokaustenspeicher und dessen Einbindung in das Simulationsprogramm TRNSYS** [1] gestartet. Das Schwergewicht der Arbeit lag bisher auf der Beschaffung von Messdaten mittels einer Prüfeinrichtung an der EMPA, um die mathematischen Algorithmen validieren zu können. Als Grundlage für das Berechnungsmodell diente ein bestehendes Modell für Fussbodenheizung. Dieses wurde bereits angepasst.

Im Projekt **Luftkollektoranlage und Latentspeicher in Schüpfen** [2] ging es um die Suche nach einem funktionierenden Prinzip für ein Kollektor/Latentspeichersystem, passiv entladen, mittels Simulationsrechnung und Labormessungen an ausgebauten Speicherelementen. Falls diese noch laufenden Abklärungen eine Lösung aufzeigen können, soll die bestehende Anlage umgebaut werden. Mit Simulationsrechnungen wurde angefangen.

## TRANSPARENTE WÄRMEDÄMMUNG

Im Rahmen des Projektes **Transparente Isolation auf Glaskapillarbasis** [3] gelang es nach Änderungen des Verfahrens Versuchsplatten herzustellen, welche in Bezug auf Transmission und Gesamtenergiedurchlassgrad die Zielvorgabe erfüllen. Im kommenden Jahr wird eine Demonstrationsfassade gebaut.

Verschiedene Techniken des Überhitzungsschutzes wurden im Projekt **Gebäude mit transparenter Isolation: Optimierung des Überhitzungsschutzes** [4] untersucht. An diversen Mustern von Lamellenblech wurden die Direkt- und Diffustransmission gemessen. Die erreichten Resultate waren gut. Die Herstellmethode für Lamellen mit dem optimalen Winkel sowie die Art der Befestigung müssen noch verbessert werden. Messungen an einer Testfassade wurden begonnen.



### Das Prinzip des Überhitzungsschutzes:

Sommer: Hoher Sonnenstand, Abhalten der Strahlung  
Winter: Niedriger Sonnenstand, Durchlass der Strahlung

A: Beschattungselement  
B: Transparente Wärmedämmung  
C: Luftspalt  
D: Mauerwerk  
β: Lamellenwinkel

### Fester Sonnenschutz vor einer transparenten Wärmedämmungs-Wand

## NEUE GLÄSER

Auf dem Gebiet transparenter Materialien herrscht zur Zeit international eine rege Entwicklungstätigkeit. Das Projekt **Untersuchungsmethoden für neue Gläser und transparente Materialien** [5] hat zum langfristigen Zweck, die systematische Bewertung neuer Gläser zu ermöglichen. Im Rahmen des im Herbst gestarteten Projektes **Optische und thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien (Datenbank und PC-Rechenprogramm)** [6] wurde damit begonnen, die technischen Unterlagen zu bearbeiten.

## ÜBRIGE PROJEKTE

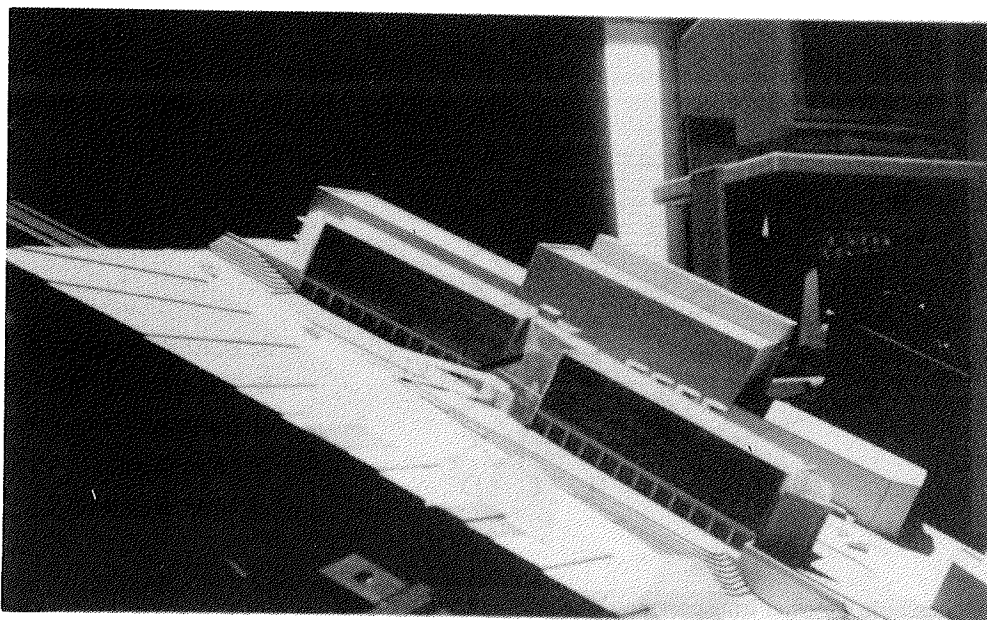
Im Projekt **Verbesserte passive Nutzung der Sonnenenergie mit Hilfe von teiltransparenten Latentspeichermaterialien** [7] werden die Möglichkeiten untersucht, mit Materialien zu arbeiten, welche durch Absorption der Strahlung zum Schmelzen gebracht werden wodurch Solarwärme ohne zusätzliches Volumen gespeichert wird. In einer ersten Phase wurde die Wirtschaftlichkeit dieses Prinzips untersucht und mit andern Verfahren verglichen. Es zeigte sich, dass diese Variante konkurrenzfähig ist. Die zweite Phase, in der Rechenmodelle entwickelt werden, läuft zur Zeit.

In **Aspekte des Bauens mit Lehm in der Schweiz** [8] wurde abgeklärt, was an Energieeinsparung und Verbesserung der Ökobilanz durch Verwendung von Lehm erreicht werden kann. Es wurde eine Befragung unter Bewohnern von Lehmbauten und Materialuntersuchungen durchgeführt.

## TAGESLICHTNUTZUNG

Das Projekt *Eclairage naturel à Genève: modèles et mesures* [9] hat zum Ziel, eine internationale Datenbank mit Messwerten über die Himmelselligkeit aufzubauen und ein Rechenmodell für die Helligkeitsverteilung zu erstellen. In Genf wurde eine Messstation in Betrieb genommen, erste Messwerte liegen vor. Die hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Messwerte machten eine umfassende Prüf- und Eichphase nötig; es mussten die Instrumente aller beteiligten Stationen geeicht werden. Um die Zuverlässigkeit der Daten gewährleisten zu können wurde ein Qualitätssicherungssystem eingeführt.

Projekt *Laboratoire de lumière naturelle - Analyse de systèmes d'éclairage latéral* [10]: Es wurde hauptsächlich am künstlichen Himmel gearbeitet. Er dient zur Simulation jeder Art von Bewölkungsgrad - von bedeckt über bewölkt bis klar. Seine Inbetriebnahme ist für Anfang 1993 vorgesehen. Eine Vorrichtung zur Erfassung des visuellen Komforts wurde erprobt, hier sind noch einige Anpassungsarbeiten vorzunehmen. Heliodon und künstliche Sonne, - zwei fertiggestellte Komponenten - wurden eingesetzt, um ein Lichtleitsystem für eine Druckerei zu untersuchen, mit welchem das Tageslicht tiefer in die Räume gelenkt werden kann.



Heliodon mit Baupmodell. Untersuchung der Beleuchtungsverhältnisse in Abhängigkeit vom Sonnenstand.

Im Projekt *Möglichkeiten der Tageslichtnutzung* [11] wurde das Kapitel über Tageslicht im Schlussbericht eines IEA Projekts fertiggestellt. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden für den Praktiker im Jahr 1993 als separate Broschüre auf deutsch publiziert werden. Weiter wurden zugunsten von IEA-Projekten die Tageslichtnutzungsprogramme mit dem Computercode DOE-2.1 gekoppelt, das Programmpaket ADELINe getestet und ein Benutzerhandbuch verfasst.

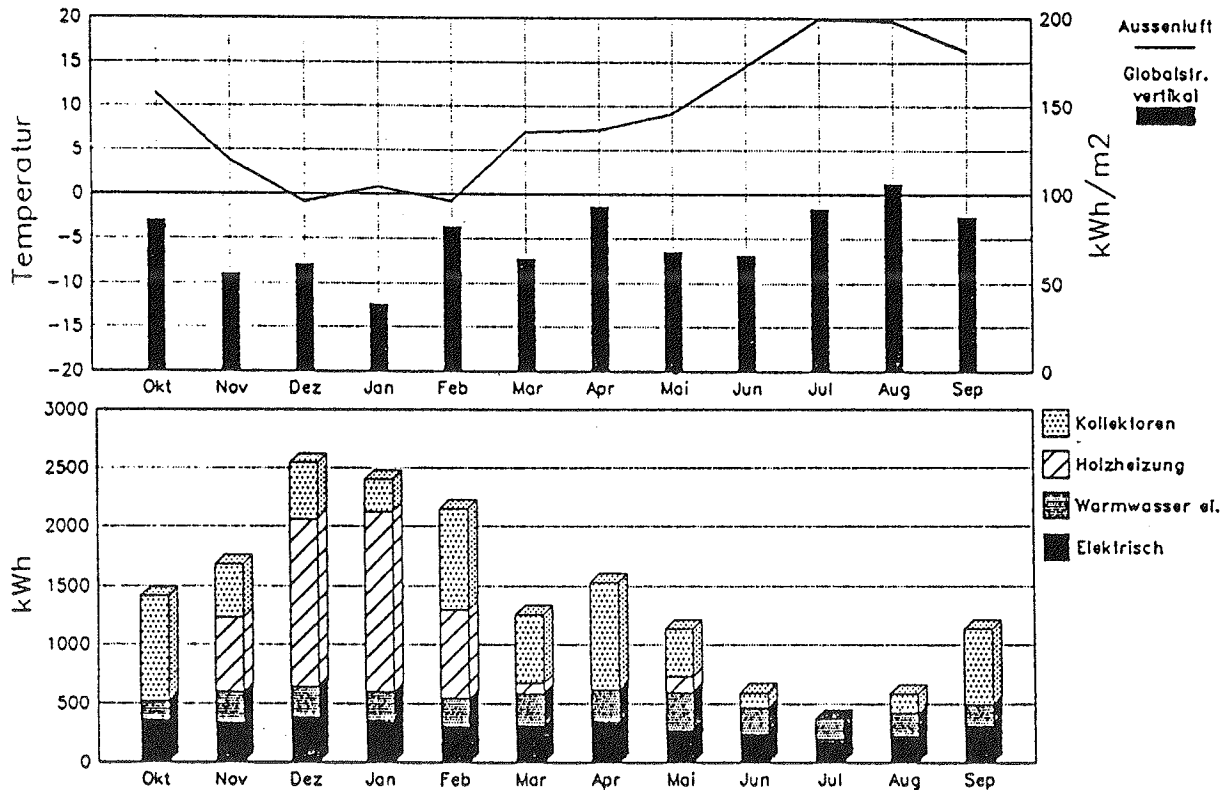
## SOLARANWENDUNGEN NACH GEBÄUDETYPEN

Mit dem Ziel, etwas über die Bewährung der Solarprinzipien zusammenzutragen, wurde das Projekt *Erhebung über die Erfahrung mit Sonnenenergiehäusern der ersten Generation* [12] gestartet. Bis jetzt wurde ein Inventar von in Frage kommenden Objekten aufgenommen.

Im Projekt *Modellentwicklung für grosse Atrien* [13] wird ein Rechenmodul zur Simulation der natürlichen Lüftung, der Verteilung der Sonneneinstrahlung, der Temperaturschichtung und der Komfortbeurteilung erstellt. Es soll in ein dynamisches Simulationsprogramm (TRNSYS) eingebaut werden. Der Programmteil "natürliche Lüftung" ist zum grossen Teil fertiggestellt, die übrigen Gebiete sind noch in Arbeit

## NIEDRIGENERGIEHÄUSER

Das Messprojekt **Solarhaus Lenherr** [14] wurde im ersten Halbjahr abgeschlossen. Im Schlussbericht wird festgehalten, dass es sich bei diesem Haus mit den Systemelementen Wintergarten-Fensterkollektor-Boden/Wand-speicher bezüglich Heizenergie um ein Niedrigenergiehaus handelt mit einem Heizenergiebedarf von 70MJ/m<sup>2</sup> a und dass der Fensterkollektor an schönen Wintertagen mit einem mittleren Wirkungsgrad von 42% arbeitet. Gelehrt hat dieses Projekt, dass der Luftwiderstand in Speicher und Luftkanälen niedrig gehalten werden muss.



Solarhaus Lenherr: Monatliche Klimawerte und Energieeinträge

Das Messprojekt **Solarhaus Bühler** [15] ist im Gange. Merkmale dieses Hauses sind Fensterkollektor mit Hypokaustenspeicher. Bis jetzt wurden Luftmengenmessungen durchgeführt und die sommerliche Überhitzung untersucht.

Erst gegen Ende Jahr angelaufen sind das Messprojekt **Einfamilienhaus Gwadt** in St. Gallenkappel [16] und die **Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil** [17], letzteres eine Ergänzung zu einer NEFF-finanzierten Messkampagne; mittels Simulationsrechnungen mit dem Computercode TRNSYS sollen Varianten zur gebauten Ausführung untersucht werden, wobei das bestehende Haus die nötigen Justierparameter liefert. Hier wurden bis jetzt Vorarbeiten durchgeführt.

## SANIERUNGSMASSNAHMEN

Das Projekt **Ausnutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen: Erarbeiten von Konzepten, Identifikation von Wissenslücken und Erstellung eines Forschungsprogramms** [18] soll Information liefern über Einsatzmöglichkeiten. Das grosse Potential an Sanierungen soll für die Solarprinzipien zugänglich gemacht werden. Bisher wurden Projektvorschläge gesammelt.

## PLANUNGSHILFSMITTEL

Im Projekt *Banque de données interactive sur la conception et la construction de bâtiments solaires* [19] wurde eine Datenbank erarbeitet mit Beispielen von Solarbauten aus der Schweiz. Es handelt sich um ein Computerprogramm, welches Anregungen zum Einsatz solarer Prinzipien vermittelt und Beispiele zeigt. Die Arbeiten sind so weit fortgeschritten, dass eine erste Programmversion an interessierte Architekturbüros zur Begutachtung abgegeben werden konnte.

Beim Projekt *ISOLDE, An Integrated Expert System to Help Building Designers* [20] handelt es sich um ein Computerprogramm, welches die Erkenntnisse aus einem IEA-Projekt über Heizung/Kühlung, Tageslichtnutzung und Atrien zusammenfasst und dem Praktiker zugänglich macht. Seit Mitte Jahr ist es in Norwegen und in der Schweiz in Erprobung. Die Reaktion auf das Programm war positiv. Wünsche auf bessere Benutzerfreundlichkeit und einige inhaltliche Änderungen wurden angebracht. Die eingegangenen Anregungen führten zu einer Überarbeitung, welche zur Zeit läuft.

Im Projekt **PC-Rechenprogramm HELIOS** [21] ging es darum, den bestehenden Computercode HELIOS-1 - ein Planungshilfsmittel für energetische Analyse und Optimierung der Aspekte Direktgewinn, Absorberwand, Transparente Wärmedämmung (neu), sommerlicher Wärmeschutz und Heizenergiebedarf - mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche zu versehen und für den Einsatz auf PC umzuarbeiten. Die Arbeiten wurden abgeschlossen. Zur Einführung in die Praxis wurden vier halbtägige Kurse angeboten, welche auf ein erfreuliches Echo stiessen.

Das Projekt **Interne Lasten in Nichtwohngebäuden: Grundlagen für den Solarplaner** [22] ist ein Zusatz zu einem laufenden NEFF-Projekt. Ziel dieser Arbeit ist es, die Gleichzeitigkeit der verschiedenen internen Lasten festzustellen, sowie herauszufinden, wann und wie häufig Bürobewohner durch Abschattung die Sonnenstrahlung fernhalten. Um auf diese Frage eine Antwort zu finden, sind spezielle Messungen nötig. Bisher wurden an zehn Gebäuden solche Messungen durchgeführt

## 3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

### a) *National:*

- DIANE-Projekt Tageslichtnutzung: Koordination bezüglich Ergänzungsmöglichkeiten und Konzept bei Testräumen, Brochuren für Planer und Rechenmöglichkeiten mittels Simulationsprogrammen.
- DIANE-Projekt Ökobauten: Mitwirkung in der Begleitgruppe
- Begutachtung und Lancierung von Projekten in Zusammenarbeit mit andern Programmleitern
- Eidg. Fachkommission für die Nutzung der Sonnenenergie: Stellungnahme zu Projektgesuchen, Begutachtung von Schlussberichten, Teilnahme an Kommissionssitzungen.

### b) *International:*

- Mitglied des Kuratoriums und des wissenschaftlichen Beirats der Arbeitsgemeinschaft Solar, Nordrhein-Westfalen, Deutschland: Begleitung und Begutachtung eines Forschungsvorhabens mit ähnlicher Zielsetzung wie das Schweizer Programm.
- Schweizerische Vertretung bei zwei laufenden IEA-Projekten *Building Energy Analysis Tools* (EPF-L), *Advanced Solar Low Energy Houses* (ETH-Z), sowie bei den zwei sich in der Definitionsphase befindlichen IEA-Projekten: *Solar Air Systems* und *Solar Retrofits*.



## 4. Transfer in die Praxis

### a) *Unterricht, Tagungen und Workshops*

- Bauen mit Sonne (Diplom-Wahlfachvorlesung an der Abt. Architektur der ETH Zürich, besucht von ca 90 Studenten pro Semester).
- Doppelwandfassaden (Erfahrungsaustausch, Bern, 22. Juni 1992)
- *4th International Summer School*, Universität Klagenfurt : *Direct Gain* und *Design of a House Using a PC Analysis Tool*, 17. - 20. August 1992
- TRNSYS für Einsteiger (Seminar, Gunten, 23.-27. November 199)
- Wer hat Angst vor Solaranlagen ? (Kurs für Baubewilligungsbehörden: KNS)
- Sonne und Architektur (Impulsprogramm PACER-Kurs)
- Neuer Komfort mit Tageslicht ( Impulsprogramm RAVEL-Kurs)

### b) *Publikationen*

- *Technology Summaries for Solar Low Energy Houses* (IEA-Bericht)
- *Design Summaries of Solar Low Energy Houses* (IEA-Bericht)
- Erfahrungsaustausch Doppelwandfassaden
- Solararchitektur (Beitrag in Tagungsband der Regensburger Solartage 1992)
- *Using the Sun in Commercial Buildings* (Einführungsartikel zu einem IEA-Jahresbericht)
- *Solar Air Heating Buildings - A Working Document* (IEA-Bericht)
- Bulletin Forschungsstelle Solararchitektur, Nr 3 & 4 (ein Mitteilungsblatt mit einer Auflage von ca.600 Ex. )
- Solararchitektur - Ein neues Selbstverständnis ( ein Bildband von INFOENERGIE)

## 5. Bewertung 1992 und Ausblick 1993

Das Konzept für die Jahre 1992 - 1995 des Forschungsprogrammes **Solararchitektur** wurde begutachtet und gutgeheissen. Auch im Sinn einer auswärtigen Betrachtung des Programms hat sich die Programm-Begleitgruppe - zusammengesetzt aus Praktikern - zweimal getroffen, um laufende Projekte zu beurteilen sowie Vorschläge und Ergänzungen zu neuen Projektgesuchen einzubringen.

Für 1993 wird das Schwergewicht auf der Begleitung bereits angelaufener Projekte liegen. Neue Forschungsprojekte werden auf Grund beschränkter Finanzmittel nur in sehr geringem Mass möglich. Anders ist es mit P & D - Anlagen, hier sollen einige neue Projekte gestartet werden. Zu erwarten sind u.a. Pilotprojekte die neue Konzepte oder Komponenten erproben, sowie Demonstrationprojekte z.B. Doppelfassaden und Atrien für die Vorwärmung der Frischluft. Auf nationaler Basis soll die alle zwei Jahre fällige Projektleiter-Klausur stattfinden und für die Öffentlichkeit soll wieder ein Status-Seminar in Lausanne gestaltet werden. Auf internationaler Basis ist der Beginn von zwei neuen IEA-Forschungsprojekten *Solar Air Systems* und *Solar Retrofits* vorgesehen.

## 6. Liste der Projekte

- [1] K. FORT, Volketswil: *Rechenmodell für Hypokaustenspeicher*. (JB)
- [2] G. Zweifel, EMPA - Dübendorf: *Luftkollektoranlage und Latentspeicher in Schüpfen*. (JB)
- [3] F. Mühlethaler, INFRACONSULT, Bern: *Transparente Isolation auf Glaskapillarbasis*. (JB)
- [4] P. Schneiter, ERNST SCHWEIZER, Hedingen: *Gebäude mit transparenter Isolation, Optimierung des Überhitzungsschutzes*. (JB)
- [5] Th. Frank, EMPA-Dübendorf: *Untersuchungsmethoden für neue Gläser und transparente Materialien*. (JB)
- [6] Th. Frank, EMPA - Dübendorf: *Optische und Thermische Eigenschaften von Verglasungsmaterialien*. (JB)
- [7] H. Manz, KWH / EMPA - Dübendorf: *Verbesserte passive Nutzung der Sonnenenergie für die Raumheizung mit Hilfe von teiltransparenten Latentwärmespeichern*. (JB)
- [8] H. Hugi, IHB / ETH - Zürich: *Aspekte des Bauens mit Lehm in der Schweiz*. (JB)
- [9] O. Guisan, GAP / CUEPE - Genève: *Éclairage naturel à Genève, modèles et mesures*. (JB)
- [10] N. Hopkirk, EMPA - Dübendorf: *Tageslicht*. (JB)
- [11] J.-L. Scartezzini, LESO-PB / EPF - Lausanne: *Laboratoire de lumière naturelle*. (JB)
- [12] Th. Bürki, ERNST BASLER & Partner, Zollikon: *Sonnenenergiehäuser der ersten Generation*. (JB)
- [13] D. Aiulfi, SORANE, Lausanne: *Modellentwicklung für grosse Atrien*. (JB)
- [14] A. Gütermann, AMENA, Schlieren: *Solarhaus Lenherr, Schwyz*. (SB)
- [15] M. BLATTER, Reinach: *Messprojekt Solarhaus Bühler*. (JB)
- [16] D. Brühwiler, DB INFORMATIK / ENERGIETECHNIK, Volketswil: *Messprojekt EFH Gwadt*. (JB)
- [17] G. Zweifel, EMPA - Dübendorf: *Simulation Null-Heizenergiehaus Wädenswil*. (JB)
- [18] A. Haller, ERNST SCHWEIZER, Hedingen: *Ausnutzung der Sonnenenergie bei Sanierungen*. (JB)
- [19] W. Weber, CUEPE - Genève: *Banque de données interactive*. (JB)
- [20] N. Morel, LESO-PB / EPF - Lausanne: *ISOLDE*. (JB)
- [21] Th. Frank, EMPA - Dübendorf: *PC-Rechenprogramm HELIOS-1*. (JB)
- [22] R. Ruch, EICHER + PAULI, Liestal: *Interne Lasten in Nichtwohngebäuden: Grundlagen für den Solarplaner*. (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

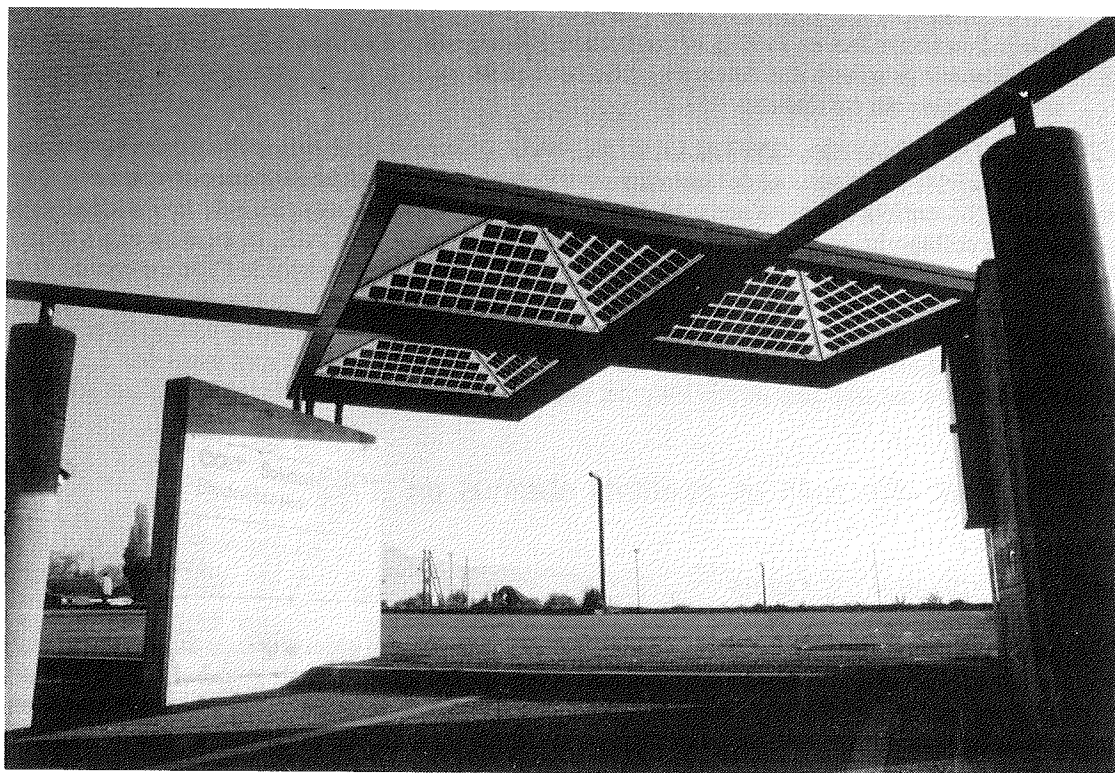
(SB) Schlussbericht vorhanden

# PHOTOVOLTAÏQUE

Rapport de synthèse  
sur les activités 1992 du programme de recherche

Chef de programme : Christophe de Reyff

---



## **DEMOSITE** photovoltaïque à l'EPF-Lausanne :

Ce toit translucide composé de *modules* de 414 W<sub>p</sub> en forme de pyramide dont deux faces sont couvertes de cellules PV illustre les possibilités d'intégration PV à l'architecture. Créé par COLT, à Baar, et SOLUTION für Solartechnik, à Härkingen, il est l'une des contributions suisses à un projet international.

## 1. Objectifs pour 1992

Les activités du programme de recherche **Photovoltaïque PV-CH** se sont réparties selon les 5 domaines suivants :

- **CELLULES** : le problème de la **stabilité** et de la **dégradation photo-induite** des cellules en **silicium amorphe** continue de demander des efforts pour être maîtrisé; pour les **cellules très minces en silicium cristallin** munies d'une couche anti-reflet, la question des recombinaisons en surface et celle de la simplicité de dépôt sur la face arrière d'une structure dite de *light trapping* restent prioritaires.
- **MODULES** : d'autres matériaux d'**encapsulation** avec toutes les propriétés requises optimales sont examinés; le développement d'éléments de construction PV, telle la **tuile solaire**, est poursuivi.
- **ONDULEURS** : l'emploi de **technologies nouvelles** permet d'abaisser encore le prix spécifique de l'onduleur; les faiblesses et défauts des appareils existants sont supprimés ou atténués grâce à la poursuite des mesures sous conditions réelles; une plus grande **fiabilité** pourra être ainsi garantie.
- **INSTALLATIONS** : différents sites permettent de comparer les **performances** de la filière PV grâce à des effets d'albédo, de température, d'altitude, de climat, de zones urbaine ou alpine, etc.; les tests de différentes composantes sur un même lieu apportent par contre une comparaison croisée; la constitution progressive d'une **banque de données** et de **statistiques** cantonales et nationale est poursuivie.
- **INTÉGRATION À L'ESPACE CONSTRUIT** : l'inauguration du **DEMOSITE**, à l'EPF - Lausanne, a marqué un temps fort en 1992 pour ce chapitre ; l'intégration d'éléments PV architecturaux à l'enveloppe du bâtiment se trouve maintenant établie comme un *must* de la technologie PV ; de beaux **exemples architecturaux** ont été réalisés.

**ÉTUDES, COORDINATION, INSTALLATIONS P&D** (pilotes et de démonstration) : des études particulières se sont poursuivies sur la **sécurité** des installations PV, sur les filières technologiques diverses, sur les **optimisations**, sur les potentiels ; la mise sur pied du stand *The Swiss PV Initiative* lors de la **11e Conférence PV de Montreux**, la collaboration à deux activités du Programme solaire de l'AIE, la mise en route d'un nouveau Programme sur les **installations PV de puissance** de l'AIE, la coordination avec le Centre commun de recherche des Communautés européennes, CCR à Ispra et la décision de participation au nouveau projet **EUROVOLTAIC** de l'initiative européenne **EUREKA**, telles sont les occasions d'une coopération nationale et internationale soutenue. Les installations P&D se multiplient : une trentaine fonctionnent et sont mesurées. La Confédération elle-même a déjà à son actif plus de 300 kWp; les autres installations P&D représentent quelque 800 kWp.

## 2. Travaux effectués et résultats obtenus en 1992

### TECHNOLOGIE DES CELLULES

La mise au point et la caractérisation de cellules basées sur le **silicium amorphe** avec un rendement stable et une dégradation atténuée ont été poursuivies à l'Institut de Microtechnique, IMT, à Neuchâtel [1]. Les **cellules tandem p-i-n-p-i-n** ont atteint une efficacité de 8,7 %. La dilution du plasma de silane par de l'argon et du xénon a donné un profil de dégradation qui montre qu'une dilution à 10-15 % est idéale. Un micro-dopage ciblé, ou profilé, de la couche intrinsèque a permis une compensation de la dégradation. Les premières cellules p-i-n en silicium microcristallin ont été préparées, mais les couches ne sont pas encore optimisées.

Au Centre de recherche en physique des plasmas, CRPP, à Lausanne [2] les techniques de diagnostic sur **plasmas de silanes** ont été affinées pour déterminer leur composition ionique et radicalaire (l'ion  $\text{SiH}_3^+$  est dominant) et les profils cinétiques et énergétiques des ions et radicaux neutres. La maîtrise de la formation de poudre, la modulation de puissance et la simulation d'un plasma ont permis d'apporter des corrélations avec la qualité des films déposés.

L'Institut Paul Scherrer, PSI, à Zürich et à Villigen [3] a poursuivi la mise au point de **cellules très fines** (de 50 à 250  $\mu\text{m}$ ). Une  $U_{oc}$  de 680 mV et un rendement de 17 à 18 % ont été atteints pour des cellules de 200  $\mu\text{m}$  et une longueur de diffusion de 600  $\mu\text{m}$ . Avec une couche anti-reflet, 19,5( $\pm 0,5$ ) % et 670 mV ont même été atteints. Pour des cellules plus minces (jusqu'à 50  $\mu\text{m}$ ) une valeur abaissée de  $U_{oc}$  pourrait être relevée par une meilleure passivation de surface.

Des travaux soutenus par le NEFF ont lieu à l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich [4] et à l'AFIF, à Zürich [5] sur l'obtention électrochimique de **feuilles de silicium** et sur la préparation de couches minces avec d'autres **semi-conducteurs**. En conclusion de ce chapitre, on peut souligner que la publication [78] d'un laboratoire chinois sur l'obtention d'une cellule au silicium ayant un rendement de 35 % sans concentration, n'a pas ralenti les efforts, bien au contraire !

## TECHNOLOGIE DES MODULES

Le projet, soutenu par le NEFF, de préparation de modules par **encapsulation avec des résines synthétiques** a été achevé par GLAS TRÖSCH SOLAR, à Ursenbach [6]. Aucun des produits testés ne remplit à 100 % les exigences requises. Toute une série de tests accélérés de résistance et de stabilité ont été faits. Des modules de plus de 3 m<sup>2</sup> ont été fabriqués. Les essais en conditions réelles et dans la durée se poursuivent [63].

Un élément important d'enveloppe architecturale est la **tuile solaire** créée par NEWTEC PLASTON, à Widnau, dans un projet NEFF achevé [7]. Diverses variantes de matériaux et de connexions électriques ont été élaborées. Le problème de l'étanchéité et de la durée de vie est capital. Un verre acrylique a été finalement retenu. Le format a été choisi de façon que la tuile solaire soit transportable : 7 kg, et 75 cm x 50 cm = 0,375 m<sup>2</sup> ; ceci correspond à 24 cellules PV et à une puissance de 36 Wp produisant ~33 kWh par an. Ainsi une installation domestique de 5,4 kWp nécessiterait quelque 150 tuiles solaires (8 m x 7 m = 56 m<sup>2</sup>) ; 2 installations sont réalisées [74].

Un autre projet dans ce domaine vient d'être lancé par le NEFF chez ALUSUISSE-LONZA, Neuhausen [8]. Il s'agit d'un système de **façade** avec cellules PV intégrées. Les nombreux aspects économiques, écologiques et techniques sont envisagés ; un optimum reste encore à trouver pour concilier toutes les exigences.

PMS ENERGIE, à Mönchaltorf [9], développe un élément PV intégrable pour **toit plat**, (*SOFREL, Solar Flat Roof Element*), qui est prévu pour équiper le toit de la nouvelle banque UBS à Manno. Divers matériaux sont envisagés. C'est un sujet très interdisciplinaire. Les problèmes de statique et d'esthétique sont à résoudre.

## ONDULEURS

À l'ETS - Burgdorf [10] se poursuivent les mesures comparées des onduleurs PV. Cette année ont été **testés** les *TOP CLASS 1500* et *3000*, *SOLCON 3400 HE*, *PV-WR 1800* et *ECOVERTER 1000*. Il résulte de ces campagnes de mesures que les faiblesses et **défauts** des produits ont été détectés et améliorés grâce à la collaboration avec les fabricants. Ainsi ce sont des **versions améliorées** de ces onduleurs qui sont maintenant produites en série.

À L'ETS - Bienne un premier projet s'est achevé [11] qui a démontré que, dans la gamme de 3 kWp, les autres techniques de résonances envisagées sont plus onéreuses que la technique retenue à ce jour, du fait des prix des semi-conducteurs de puissance. Un autre projet a débuté [12] pour mettre au point un **système de mesure numérique**, donc plus précis, de la puissance d'onduleurs PV. Un projet de **convertisseur cc/cc** pour l'application de la technologie PV à des installations de production d'hydrogène par électrolyse [13] permettra d'éviter des pertes de conversion et d'optimiser simultanément le *MPP-Tracking*.

Chez INVERTOMATIC, à Riazino, le projet NEFF se poursuit pour développer un **onduleur de 100 kWp** [14]. L'amélioration du *MPP-Tracking* permettra de mieux suivre les variations dynamiques rapides d'ensoleillement. Les possibilités d'asservissement extérieur et de mise en parallèles de plusieurs onduleurs sont étudiées et en voie de réalisation. Les prototype de 80 kWp (*ECOPOWER 80*) ont été réalisés, un est installé [50].

Une préétude, financée par le NEFF, a démarré chez ALPHA REAL, à Zürich, pour un concept d'**onduleurs dispersés**, c'est-à-dire, de micro-onduleurs de 40 à 300 Wp intégrés directement à chaque module [15]. De son côté le CERS soutient à l'ETS - Buchs [16], avec la firme SCHMIDHAUSER, à Neukirch-Egnach, comme partenaire industriel (après le retrait d'ASCOM, à Berne, et de l'ÖKOZENTRUM, à Langenbruck), un projet d'onduleur dans la gamme de 5 à 20 kWp, et **triphase** pour assurer une injection symétrique dans le réseau.

## INSTALLATIONS SUR SITE

Durant l'hiver 91/92 des **mesures spectrales** ont été faites à la station de Laj Alv et au PSI à Villigen [17]. Les résultats des mesures 1987-1992 sont consignés dans le rapport final. La planification de la centrale PV voisine à Caischedra du projet *DESERTASOL* [53, 79] est coordonnée avec ces résultats. Le PSI a aussi achevé la campagne de mesures des effets d'**albédo** sur l'installation PV de 2,4 kWp à la station du TITLIS après 3 ans et demi de suivi [18]. Le nouvel onduleur mis en oeuvre en 1992 a montré un rendement de 94 %. La part de l'albédo à la production électrique s'est élevée à 214 kWh/m<sup>2</sup> sur 1343 kWh/m<sup>2</sup>, soit 15 % en moyenne annuelle

(12,7 et 17 % les 2 années précédentes); la part maximale en valeur mensuelle a même atteint 29,2 %. Grâce à l'albédo, l'irradiation maximale a dépassé 10 fois durant l'année les 1500 W/m<sup>2</sup> et a atteint 1760 W/m<sup>2</sup> ; la réponse des solarimètres étant entachée d'une inertie, ce sont près de 2000 W/m<sup>2</sup> qui ont dû être avoisinés. Sur l'installation de 2 kWp du projet *GIBB* à Berne [19], les élèves et apprentis ont continué leurs expériences, en changeant l'onduleur et en faisant des essais de refroidissant du champ PV.

L'installation de 7,5 kWp des SIG a fait l'objet d'une **dernière année de mesures** par l'Université de Genève [20]: elle a produit 5894 kWh, mais avec des pannes allant de 10 à 80 jours pour les trois onduleurs ; ce qui a causé une perte d'énergie de 11 % ; en comptant aussi les jours de pannes, la **performance ratio (PR)** de l'année se monte à 58 %, et, en n'en tenant pas compte, à 65 % ; le rendement moyen des trois onduleurs a été de 84 % ; l'efficacité annuelle de la partie PV est de 8,5 % (allant, selon les mois, de 7,1 % à 10,0 %) avec les jours de pannes, et de 9,5 % (de 9,0 % à 10,1 %) sans les jours de pannes. Ces résultats sont à comparer à ceux de l'installation à courant continu de 2,2 kWp des TPG : 9,3 % (allant, selon les mois, de 8,2 % à 9,8 %, pour l'année comprise entre juin 90 et mai 91) et une PR de l'année se montant à 75 % (de 67 % à 79 %).

À L'ETS -Lugano, dans le projet TISO [21], les tests de composants et systèmes PV se poursuivent, à côté de la continuation des mesures de l'installation de 10 kWp aux modules en silicium monocristallin et de celle de 4 kWp aux modules en silicium amorphe. L'installation de 10 kWp, la 1<sup>re</sup> d'Europe reliée au réseau, a fêté son 10<sup>e</sup> anniversaire, le 13 mai. Il a été mis en route les tests de comportement des modules **sous haute tension** ainsi que, par l'achat d'une caméra thermographique, les **tests de thermovision** permettant d'enregistrer la carte thermique d'un module ou d'un champ PV. Trois nouveaux lots de 6 modules chacun ont été acquis. La constitution de la **banque de données** se poursuit avec plus de 300 modules enregistrés : elle comprend les **données électriques** livrées avec le matériel et celles effectivement mesurées (à  $\pm 0,1$  Wp près), les rendements des cellules et des modules (à  $\pm 0,1$  %) aux conditions standard de test, *STC*, du CCR à Ispra, ainsi que les **données mécaniques** livrées et celles soigneusement mesurées et enregistrées (dimensions à  $\pm 0,1$  mm et masses à  $\pm 2$  g près). La question est d'importance : il y a souvent des différences entre les descriptions des catalogues et la réalité. À cela s'ajouteront bientôt les mesures des **caractéristiques I-U** des modules en conditions réelles ainsi que celles aux températures nominales de fonctionnement de cellules, *NOCT*.

L'installation de **560 kWp** - soit 10'560 lamifiés de type M55 à 53 Wp, montés par groupes de 96 en tables de 5,1 kWp sous  $\pm 420$  Vcc, inclinées à 40°, en une surface active de 4506 m<sup>2</sup> répartie sur 2 ha - réalisée au **Mont-Soleil** par le Consortium *PHALK 500* [67], a été inaugurée le 28 avril [79, 80]. La station de mesures, mise en marche dès mai, est exploitée par EWI, à Zürich en coopération avec l'ETS - St-Imier [22]. À côté des mesures *STC* faites sur les lamifiés eux-mêmes et sur les tables montées, les **performances** de la centrale dans son ensemble sont enregistrées quotidiennement. À la suite de l'incident grave, la centrale n'a fonctionné, du 26.5 au 24.10, qu'à 10-20% de sa puissance nominale et durant ce temps la *Performance Ratio (PR)* n'aurait été que de 8-14 %. Depuis sa mise en marche, la centrale a reçu près de 1'000 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie solaire, soit environ 4 millions de kWh. Sa production électrique durant ces 8 mois s'est élevée à **116'284 kWh, somme des relevés quotidiens** du compteur des FMB, soit environ 1/4 de la valeur attendue avec un rendement de 10 %. La PR pour les 8 mois de 1992 se monte à 23 % avec des pointes de plus de 60 % en novembre et décembre. L'onduleur est **performant**, dépassant les 90 % de rendement dès 10 % de charge.

Le projet d'établissement d'une **statistique énergétique** nationale et d'un **contrôle de qualité** de la filière PV a été lancé conjointement par l'OFEN et l'UCS qui ont mandaté ALPHA REAL [23 et 79]. Plus de 400 installations PV sont reliées au réseau. À partir des données descriptives de l'installation, une production supputée est calculée; elle est comparée aux données mensuelles fournies par les 148 installations participant actuellement à l'expérience. L'ETS - Burgdorf [24] a entrepris une **campagne de mesures fines** dans le canton de Berne qui débute. L'ETS - Sion, dans son projet SOLEIV [25], dans le contexte climatique valaisan, a mis en place un banc de mesure pour 8 types de modules et 3 angles d'inclinaison pour déterminer de façon simultanée leurs caractéristiques sous les mêmes conditions ; il est aussi installé un système avec poursuite sur un seul axe qui permet la comparaison avec le champ fixe ; pour le **système d'acquisition de données autonome**, une interface a été mise au point, conviviale, économique et économe en énergie ; deux installations PV de 3 kWp dûment instrumentées complètent le tout ; l'une est sur un toit de l'ETS - Sion ; l'autre est installée en ville de Sion [61] en un long ruban intégré à une terrasse surplombant des garages; le **convertisseur** a été développé par l'ETS - Sion.

## INTÉGRATION À L'ARCHITECTURE

ALPHA REAL a terminé son projet sur la recherche d'une **intégration architecturale optimisée** [26]. À longue échéance il s'avère que les coûts d'investissement seront moins chers lorsqu'une intégration est réalisée. Une

comparaison des facteurs économiques a été faite : il existe des coûts proportionnels et d'autres non proportionnels à la surface réalisée. Le besoin d'arriver à des dimensions standard a été démontré. Des installations pilotes sont là [63]. L'intégration de générateurs PV dans l'enveloppe du bâtiment s'est encore concrétisée dans plusieurs réalisations de la communauté de travail ATLANTIS ENERGIE, Berne, & ZETTER, Soleure [27, 62, 79] : à Kirchberg, la firme SCHEIDEGGER a inauguré en mai une façade PV de 18 kWp combinée avec un captage de la chaleur. Les éléments actifs servent entièrement d'**éléments de protection pour la façade** ; les 3 installations de Bienne, Arisdorf et Kirchberg continuent d'être mesurées. Cette technologie de **grands modules intégrés** est maintenant mûre.

Dans le cadre du Programme **Solaire** de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), l'activité **PV dans l'espace construit** prévoit que chaque pays membre propose une maison comme **objet de démonstration** ; PMS ENERGIE, Mönchaltorf, a équipé d'un système d'acquisition de données (y compris les températures des modules en 3 points du champ) la toiture solaire (3 kWp) à la Schauenbergstrasse 50, à Zürich [28] ; les données enregistrées suivent toutes les recommandations des normes du CCR à Ispra.

À l'EPFL, en bordure du parking sud du site d'Écublens, se trouve un ensemble de réalisations architecturales comprenant **plusieurs types d'éléments PV intégrés au bâtiment** : toitures, façades, vitrages, volets d'obscurcissement, allèges, etc. Ces pavillons, réalisés par des firmes industrielles de provenance internationale, constituent le *DEMOSITE*, établi par la Suisse dans le cadre de l'activité **PV dans l'espace construit** du Programme **Solaire** de l'AIE, et qui a été inauguré le 6 octobre ; il est géré par le LESO [29] ; 8 pavillons permettent de voir installées 2 façades, 5 toitures et 1 combinaison des deux avec divers éléments PV architecturaux ; les installations sont suivies et leurs **performances réelles** consultables en ligne ; des visites, des colloques, des documents et une future publication régulière, *DEMOSITE-NEWS*, complètent sa diffusion. Le pavillon N° 6 représenté en page de titre est constitué d'un élément de toiture formé ici de 3 pyramides de 1,74 m x 1,74 m, en matériau translucide permettant un éclairage naturel ; chaque pyramide présente 2 de ses faces triangulaires (1,74 m x 0,994 m) entièrement translucides et 2 autres faites chacune d'un module de 69 Wp, composé de 47 cellules PV.

Sur le site de l'EPFL plusieurs bâtiments sont équipés de capteurs PV [30, 31, 32] : un **brise-soleil**, pourvu de modules PV sur mesures, orne le dernier étage du *LESO* ; 5 **sheds** équiperont un toit du Département de Génie civil, les 12 kWp étant divisés en 3 champs inégaux de 2,4 kWp, 4,0 kWp et 5,6 kWp pour étudier l'optimisation de surface [36] ; une intégration en façade au Département des Matériaux est en voie de réalisation avec des modules en silicium amorphe qui seront fixés comme des éléments de contre-cœur classiques ; une autre installation a été planifiée au Laboratoire de Réseaux d'énergie électrique.

Après la publication du rapport sur le potentiel en Suisse, le projet **Marquises au soleil**, confié à BONNARD & GARDEL, Lausanne, est entré dans sa 2<sup>e</sup> phase plus pratique [33] : planifier un projet pilote en **gare d'Aigle** pour installer environ 20 kWp, par rangées de modules posés très à plat (8 °), en configuration soit transversale, soit longitudinale, soit mixte. L'appel d'offres a été fait, l'évaluation du dossier par les CFF est en cours.

## ÉTUDES DIVERSES

ALPHA REAL a achevé trois études concernant, la première, l'optimisation de la **sécurité** des champs PV [34], la seconde, l'analyse de la situation des **différentes technologies** PV [35], et la troisième, le projet de **couverture de l'autoroute à Breite (BS)** [37]. Pour la question de sécurité, un prototype de disjoncteur avec asservissement à microprocesseur a été développé, basé sur une carte de contrôle (*Stringbox-Control-Card, SBCC*) qui est soumis à des tests de longue durée. L'autre étude sur les filières de technologie PV montre qu'il n'est pas encore possible de détecter aujourd'hui quelle sera celle appelée à un grand développement. Les **questions écologiques** seraient à même d'influencer les critères de choix, à côté, bien sûr, des problèmes de coûts, en dépendance avec le rendement. Pour le site de Breite, des **modules de grandes surfaces** (1,73 m x 1,94 m) de 4 différentes provenances ont été montés et sont mesurés en continu : les questions de statique, de comportement thermique (simulations et expériences), de délamification et de salissure sont examinées.

KELLER & ZAHN à Lavigny, et le LESO ont poursuivi les mesures pour la validation de la simulation d'**optimisation de la surface du champ PV** [36] : 2 installations PV modulaires font l'objet de la campagne de mesures, l'une à Herden (ZH) et l'autre à l'EPFL [31]. Les mesures ont d'abord été perturbées par le fait que les onduleurs étaient à coupure et non pas à limitation, ce à quoi il a été remédié. Le calcul économique qui découle de cette validation est encore à faire. *METEONORM'95*, la refonte de l'édition de 1985 est en cours par les soins de METEOTEST, Berne [38]. Le contenu provisoire a été établi, les données et algorithmes nécessaires sont rassemblés. La même firme a été chargée de la mise sur pied du stand *The Swiss PV-Initiative* lors de la 11<sup>e</sup> Conférence sur l'énergie solaire PV de Montreux [39] : un système de **présentation en ligne** des performances instantanées de diverses installations PV de Suisse (jusqu'à 20 à la fois) a été réalisé et mis en oeuvre avec

succès ; ce moniteur sert aux démonstrations et pourra être multiplié pour des usages fixes en différents lieux simultanément.

L'Université de Genève [40] a entrepris de développer un **logiciel pour systèmes PV** ; dans une 1<sup>re</sup> phase ce sont la définition des besoins, l'évaluation des divers logiciels déjà disponibles, la consultation des milieux intéressés et l'établissement d'un cahier des charges qui ont été réalisés. Un *workshop* a eu lieu le 8 décembre, qui a conduit à la décision de mise au point du logiciel et de sa future validation sur les données expérimentales existantes. Deux études sont consacrées à des **faisabilités**, l'une, le long du tracé de la N9 en Valais, par ÉNERGIE SOLAIRE, Sierre, [41] qui a conduit au choix de 4 sites méritant l'établissement d'avant-projets, l'autre, dans le Lavaux vaudois, par la communauté de travail KELLER & ZAHN, Lavigny, et TNC, Coire, [42] qui vient de débiter et qui doit en particulier tenir compte de **l'effet d'albédo du lac Léman** ; l'installation prévue se fera par une intégration en plusieurs rubans décalés dans le talus dominant l'autoroute. Enfin, une préétude, faite par COPER, Montreux, a commencé en vue de réaliser une intégration PV sur les **nouvelles marquises de la gare de Morges** [43] ; il s'agit de prévoir l'encapsulation des cellules PV directement dans des vitrages semi-transparents qui équiperont le centre des marquises ; la lumière naturelle transmise sera réglée par l'espacement des cellules.

## TRAVAUX DE COORDINATION

Le groupe TISO continue son rôle d'accompagnement du Programme **PV-CH**. Outre l'évaluation de diverses offres soumises, il maintient le contact avec le CCR à Ispra et le Groupe de travail européen sur le *monitoring* d'installations PV [44]. PMS ENERGIE, Mönchaltorf coordonne l'activité nationale et dirige l'activité internationale d'une partie du projet **PV dans l'espace construit** du Programme Solaire de l'AIE [45]. L'Université de Genève coordonne l'activité suisse dans le projet **Mesures spectrales du rayonnement solaire** du même Programme [46], qui veut une **calibration** internationale.

## INSTALLATIONS P & D [ 47 - 74 ]

L'année 1992 a vu toute une série de projets P&D réalisés. Plusieurs des installations P&D de la Confédération sont déjà en fonction ou en voie de réalisation: 10 kWp à l'Office fédéral de métrologie, à Wabern, [47]; 20 kWp, à la gare CFF de Giubiasco, [48]; 100 kWp sur la N13 (Felsberg/Domat/Ems) [49] (qui a atteint, selon le **certificat de l'ESTI à Ispra, une performance ratio record de 79 %**) ; 100 kWp sur le tracé CFF Tenero/Riazino, [50] (qui est en fonction depuis octobre) ; 30 kWp à la Station aérologique de l'Institut suisse de météorologie de Payerne (projet HYDROSOL) [51] (qui est entièrement planifiée) ; 4 kWp, en façade de la gare CFF de Lausanne [60] ; 24 kWp à la Taubenhalde, à Berne [66] ; 20 kWp sur le magasin de céréales à Brigue [70] ; ainsi que les diverses réalisations déjà mentionnées sur le site de l'EPFL [30, 31, 32]. En 1992 ce sont plus d'une vingtaine de projets P&D en PV qui ont vu le jour [52 à 74], allant de la maison familiale exemplaire, avec une couverture solaire élevée des besoins énergétiques (822 m<sup>2</sup>, avec un  $k$  moyen de 0,22 W/m<sup>2</sup>), conçue par Daniel Kästli en collaboration avec l'architecte Thierry Leserf, Zollikofen, [54, 84], utilisant judicieusement le toit pour produire de la chaleur (55 m<sup>2</sup>) et de l'électricité PV (3 kWp sur 32 m<sup>2</sup>), jusqu'aux projets plus inattendus, tels un agrégat PV de propulsion navale, mis au point par l'ETS - Neuchâtel [69] ou l'éclairage du débarcadère de Clarens, couvert par une mini-installation PV (336 Wp), réalisée par la Commune de Montreux [64], ou l'intégration PV de 13 kWp sur le toit de l'Alp Findels, réalisée par NOK, Baden [57]. À Burgdorf, la firme JENNI couvre 100 % de ses besoins électriques par un champ PV de de 63 kWp sur 520 m<sup>2</sup> ; les 60'000 kWh de courant alternatif annuel y sont produits via un moteur à courant continu entraînant un alternateur [84] ; la ville de Burgdorf rétribue durant 8 ans 1 Fr. par kWh produit grâce au PV sur son territoire, une somme attractive !

## 3. Collaboration internationale

Les projets de l'IMT, du CRPP et du PSI ont largement collaboré avec plusieurs universités allemandes, françaises, hollandaises, anglaises et américaines. La collaboration s'est en partie réalisée dans le programme européen **BRITE-EURAM**. Le projet de l'AFIF se déroule en collaboration avec 7 pays de la CE dans le cadre du programme **JOULE II** (projet **EUROCIS**). Des expertises dans plusieurs projets et des collaborations, en particulier du projet TISO, ont été faites avec le CCR à Ispra (*European Solar Test Installation*). Le projet d'onduleur dispersé d'ALPHA REAL est réalisé en coordination avec le *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung* à Stuttgart, et l'*Institut für Solare Energieversorgungstechnik*, à Kassel. Dans le projet



**PV dans l'espace construit** de l'AIE, plusieurs collaborations se sont établies ou poursuivies lors d'ateliers et des rencontres d'experts : de façon exemplaire, la mise sur pied du *DEMOSITE*, inauguré le 6 octobre, concerne tous les pays participants.

La Conférence PV de la CE (11th E.C. PV Solar Energy Conference & Exhibition), organisée à Montreux du 12 au 16 octobre, et qui a été suivie par plus de 1000 participants de près de 50 pays, a été le point d'orgue de cette *année photovoltaïque* [81] : de multiples contacts ont été établis et des contrats échangés lors de l'exposition regroupant quelque 70 exposants [39] ; les centaines de contributions des conférences et des sessions de *posters* ont donné lieu à une importante publication [82] de 1728 pages ! Quinze visites de Laboratoires et d'installations PV sur site ont été organisées avec succès par ENET pour 270 personnes.

#### 4. Transferts à la pratique

Il faut ici mentionner principalement le lancement tout prochain sur le marché de la **tuile solaire** [7]. Les objets d'**intégration architecturale** de la technologie PV présentés sur le *DEMOSITE* sont maintenant tous susceptibles d'être réalisés ; la plupart sont commercialisés. Une fois de plus, les mesures précises sur les **onduleurs** aussi bien à l'ETS - Burgdorf que dans plusieurs installations sur site ont conduit les fabricants à améliorer leurs produits [10, 47]. L'établissement de la statistique suisse des installations PV a permis de détecter les **systèmes défectueux** et d'y porter remède [23]. Le projet SOLEIV de l'ETS - Sion [25] a permis de mettre au point une **carte d'acquisition de données autonome** qui va équiper plusieurs bâtiments d'une usine du Valais.

#### 5. Perspectives pour 1993

**Cellules** : on vise toujours l'optimisation des cellules tandem et la mise au point de couches intrinsèques plus stables entre autres par l'étude des contaminations résiduelles ; des essais vont aussi être entrepris pour préparer des dépôts de plus grandes dimensions (40 cm x 60 cm) et plus tard pour s'attaquer à d'autres substrats que le verre ; dans les cellules minces, un rendement dépassant 20 % est visé afin d'atteindre sûrement 20 % pour un module ; pour les feuilles de silicium obtenues par échange électrochimique, c'est la trop grande porosité qui doit être encore abaissée ; le projet européen EUROICIS verra la contribution suisse apporter les connaissances nécessaires sur la structure et les propriétés électroniques des couches minces polycristalline de CIS.

**Modules** : les modules réalisés avec diverses nouvelles techniques de lamification doivent subir des tests de vieillissement accélérés pour éprouver leur comportement à long terme ; la tuile solaire devra être mise en oeuvre sous diverses conditions climatiques et testée à plus grande échelle ; des modules semi-transparents seront réalisés sur mesure pour des intégrations tenant compte de l'éclairage naturel (marquises, serres, etc.)

**Onduleurs** : la gamme des onduleurs PV triphasés allant jusqu'à 60 kWp de puissance va pouvoir être testée ; la mise au point de la production d'onduleurs de 80 à 100 kWp devra être achevée ; une nouvelle conception d'onduleurs intégrés aux modules sera étudiée et mise en oeuvre.

**Installations sur site** : au TISO, la banque de données des composants sera encore élargie et approfondie par des mesures *NOCT* ; les mesures en cours au Mt-Soleil seront poursuivies, avec une étape importante consistant en une recalibration de tous les capteurs ; les algorithmes de récoltes des données seront perfectionnés ; un champ expérimental pour des expériences ponctuelles sera ouvert ; la statistique suisse, encore empreinte d'une part d'estimation, sera étendue si possible à l'ensemble des installations PV reliées au réseau.

**Intégration architecturale** : par la réalisation combinées de projets particuliers ayant chacun l'un ou l'autre détail technique nouveau, l'intégration sera améliorée ; les efforts internationaux de coordination et d'échanges d'informations sur les maisons-pilotes seront poursuivis via l'AIE ; sur le *DEMOSITE* le nombre de pavillons sera porté de 8 à 13 ; un bulletin d'information, *DEMOSITE-NEWS*, sera publié périodiquement et diffusé à grande échelle ; le LESO va approfondir la question de l'intégration architecturale de modules PV, en particulier aux toits plats et, tout spécialement, aux marquises de gare.

**Études diverses** : beaucoup de travaux existent sur l'**énergie grise** des installations PV ; après plusieurs études préliminaires (dont il est rendu compte dans [83 et 84]), il est prévu d'entreprendre des études approfondies sur l'aspect écologique des différentes filières PV : à la notion de **temps de remboursement énergétique**, liée à l'énergie grise, s'ajoute maintenant celle de **temps de remboursement écologique**, liée à la **pollution grise**, définie dans [83] ; les contours définitifs de *METEONORM'95* seront précisés ; un logiciel PV convivial correspondant

aux besoins suisses sera développé ; pour ce qui est de l'aspect de la sécurité des installations PV, un projet se propose d'étudier une technique de détection des arcs électriques.

**Travaux de coordination :** la tâche PV dans l'espace construit de l'AIE arrive à mi-parcours : un nouvel atelier dédié aux problèmes de câblage et de connexions aura lieu en Suisse ; 2 réunions d'experts auront lieu en Suède et au Japon ; il en est de même pour la tâche Mesures spectrales du rayonnement solaire.

**Installations P&D, installations PV de la Confédération :** l'installation PV de 100 kWp sur 420 m le long de l'autoroute N2 à Giebenach (BL), exactement sur la frontière des cantons de BL et d'AG, sera réalisée en 1993 (énergie électrique attendue : de 94 à 109 MWh/an) [75] ; la surveillance de l'installation de 100 kWp le long de l'autoroute N13 sera confiée au canton des Grisons [49] ; les deux installations de Giubiasco (20 kWp) [48] et de Riazzino (100 kWp) [50] seront mesurées de façon comparative ; l'installation du projet HYDROSOL de Payerne sera construite et mise en activité [51] ; les CFF vont planifier l'intégration de modules PV aux marquises (réalisation prévue de 20 kWp à la gare d'Aigle [33] et étude de faisabilité pour celle de Morges [43]) ; au LESO 2 autres installations PV seront réalisées à Écublens avec un rôle de promotion [32].

**Autres installations PV P&D :** la Confédération a lancé un programme d'encouragement pour l'installation de modules PV sur les écoles dans toute la Suisse ; 12 réalisations prévues, à but didactique, verront ainsi le jour. Plusieurs projets P&D sont planifiés dont certains avec une intégration architecturale particulièrement réussie.

## 6. Liste des projets

- [ 1 ] A. Shah, IMT / Uni - Neuchâtel: *Cellules solaires en silicium amorphe*. (RA)
- [ 2 ] C. Hollenstein, CRPP / EPF - Lausanne: *Einfluss von plasma-physikal. und plasma-chem. Eigenschaften von VHF Silan-Plasmen auf die Abscheidung von amorphem und mikrokrist. Silizium*. (RA)
- [ 3 ] H. Kiess, PSI - Zürich & Villigen: *Dünne Solarzellen*. (RA)
- [ 4 ] H.R. Grüniger, P.Rys, ETH - Zürich: *Elektrokatalytische Herstellung von Siliziumfolien für Solarzellen*. (RA / NEFF 160.3)
- [ 5 ] H. Zogg, AFIF / ETH - Zürich: *Entwicklung von PV-Solarzellen in Dünnschichttechnik*. (RA/NEFF 378.2)
- [ 6 ] G. Roth, S. Kessler, D. Sutter, GLAS TRÖSCH SOLAR, Ursenbach: *Untersuchungen zu einem Herstellungsverfahren für Solarzellenmodule in Giessharztechnik*. (RA+RF / NEFF 520)
- [ 7 ] A. Hasler, C. Meier, PLASTON, Widnau: *Entwicklung eines Solardachziegels*. (RA+RF)
- [ 8 ] M. Weng, ALUSUISSE-LONZA, Neuhausen: *Entwicklung eines Fassadensystems mit integrierten Solarzellenmodulen*. (RA / NEFF 557)
- [ 9 ] P. Toggeweiler, PMS ENERGIE, Mönchaltorf: *Entwicklung eines flachdach integrierten PV-Systems (SOFREL)*. (RA)
- [10] H.R. Rötliberger, H. Häberlin, HTL - Burgdorf: *Vergleichsmessungen an PV-Wechselrichtern*. (RA)
- [11] V.Crastan, HTL - Biel: *Netzgekoppelter 3-kWp-PV-Wechselrichter Resonanzwandlertechnik mit IGBT - Transistoren*. (RA+RF)
- [12] V.Crastan, HTL - Biel: *Digitales Leistungsmesssystem für Solarwechselrichter*. (RA)
- [13] V.Crastan, HTL - Biel: *DC/DC Wandler für Solar-Wasserstoffanlage/Friedli/Zollbrück*. (RA)
- [14] C. Giovannini, F. Donati, INVERTOMATIC, Riazzino: *Solarwechselrichter mit Netzeinspeisung im 50-kW-Bereich*. (RA / NEFF 419.1)
- [15] U. Bühler, ALPHA REAL, Zürich: *Voruntersuchung für netzverbundene Solarzellenanlagen mit einem dispersen Umrichter-Konzept*. (RA / NEFF 533)
- [16] E.T. Schönholzer, HTL - Buchs: *Störungsfreie PV-Netzeinspeisung mit 3-Phasen-Wechselrichter*. (RA / CERS 1782.1)
- [17] B. Hofer, PSI - Villigen: *Meteostation Laj Alv*. (RA+RF)
- [18] M. Brack, W. Durisch, PSI - Villigen: *Albedoeinfluss auf PV-Anlage in den Alpen*. (RA+RF)
- [19] H. Kägi, GIBB, Bern: *P & D-Anlage der Gewerblich Industriellen Berufsschule Bern*. (RA)
- [20] P. Schaub, O. Guisan, GAP/Uni - Genève: *Étude d'une installation PV de 7,5 kW couplée au réseau des Services Industriels de Genève (SIG)*. (RA+RF) — P. Schaub, A. Mermoud O. Guisan: *Étude de l'installation PV de 2,2 kWp des Transports Publics de Genève (TPG)*. (RF)
- [21] M. Camani, D. Chianese, S. Rezzonico, Dip. del TERRITORIO, Bellinzona, & TISO/STS - Lugano: *Tests di componenti e sistemi per progetti nel campo della tecnica fotovoltaica; TISO — periodo III : 1990-1993*. (RA)

- [22] J.-R. Leidner, Consortium PHALK MONT-SOLEIL c/o EWI, Zürich & ÉTS - St-Imier: *Étude, réalisation et exploitation de la station de mesures de la centrale PV PHALK Mont-Soleil — Programme de recherche de base.* (RA)
- [23] R. Moser, ALPHA REAL, Zürich: *Energiestatistik und Erfolgskontrolle Photovoltaik.* (RA)
- [24] H. Häberlin, M. Nussbaumer, S. Oberli, HTL - Burgdorf: *Ertrag und Zuverlässigkeit Netzgekoppelter PV-Anlagen im Kanton Bern.* (RA)
- [25] M. Maurer, ETS - Sion: *SOLEIV.* (RA)
- [26] C. Meier, H. Prinz, M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *Optimierte Gebäudeintegration von Solarzellen.* (RA)
- [27] M. Posnansky, ARGE ATLANTIS ENERGIE, Bern, & ZETTER, Solothurn: *Integration von PV-Stromgeneratoren in die Gebäudehülle — AZ90.* (RA)
- [28] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, Mönchaltorf: *Ausmessen der Solaranlage Schauenbergstrasse 50 in Zürich zuhanden des IEA-SHCP-T16 Projektes.* (RA)
- [29] C. Roecker, P. Affolter, J.-B. Gay, LESO - PB/EPF - Lausanne: *Site de démonstration d'éléments de construction PV intégrés au bâtiment — Phase I : 1991-1993.* (RA)
- [30] C. Roecker, J.-B. Gay, LESO - PB/EPF - Lausanne: *Installations-pilotes d'intégration architecturale d'éléments PV au bâtiment.* (RA+RF / NEFF 507)
- [31] C. Roecker, J.-B. Gay, LESO - PB/EPF - Lausanne: *Installations-pilotes d'intégration architecturale d'éléments PV au bâtiment — Phase II : Effet de série et optimisation des surfaces.* (RA)
- [32] J. Bonvin, C. Roecker, J.-B. Gay, LESO - PB/EPF - Lausanne: *Installations-pilotes d'intégration architecturale d'éléments PV au bâtiment — Phase II.* (RA)
- [33] R. Rechsteiner, BONNARD & GARDEL, Lausanne: *Marquises au soleil - Projet pilote gare d'Aigle.* (RA)
- [34] U. Bühler, M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *Optimierung der Sicherheit von Solarzellenfeldern.* (RA+RF)
- [35] M. Real, ALPHA REAL, Zürich: *Statusanalyse der Solarzellentechnologien.* (RA+RF)
- [36] P. Affolter, KELLER & ZAHN, Lavigny, & LESO-PB/EPF - Lausanne: *Optimisation de la surface du champ PV — Mesures & validation de la simulation.* (RA)
- [37] C. Meier, ALPHA REAL, Zürich: *Voruntersuchung für PV-Kraftwerk Autobahnüberdeckung "Breite".* (RA+RF)
- [38] S. Kunz, METEOTEST, Bern: *METEONORM Neuauflage — Etappen I + II.* (RA)
- [39] M. Baumgartner, METEOTEST, Bern: *Die schweizerische PV-Initiative : Konzept, Realisierung und Präsentation eines Ausstellungsstandes.* (RA)
- [40] A. Mermoud, GAP/Uni - Genève: *Logiciel pour systèmes PV — Phase I.* (RA)
- [41] J.-P. Rossy, ÉNERGIE SOLAIRE, Sierre: *Potentiel PV et étude de faisabilité le long du tracé de la N9 en Valais.* (RA)
- [42] L. Keller, KELLER & ZAHN, Lavigny, & TNC, Chur: *Faisabilité d'une installation PV le long de l'autoroute N9 dans le Lavaux.* (RA)
- [43] R. Egloff, COPER, Montreux: *Intégration PV sur les nouvelles marquises de la gare CFF de Morges — Pré-étude.* (RA)
- [44] S. Rezzonico, Dip. del TERRITORIO, Bellinzona, & TISO/STS - Lugano: *TISO: Valutazione e sorveglianza di lavori nel settore dei sistemi fotovoltaici.* (RA)
- [45] P. Toggweiler, PMS ENERGIE, Mönchaltorf: *Leitung, Betreuung und Koordination des Vorhabens "Photovoltaik in Gebäuden" mit dem IEA Solar Heating and Cooling Programme.* (RA)
- [46] P. Ineichen, GAP/Uni - Genève: *Coordination suisse du projet de mesures spectrales du rayonnement solaire du Programme SH&C de l'AIE.* (RA)
- [47] E. Anderegg, ALPHA REAL, Zürich: *Messtechnische Auswertung der Solartankstelle Wabern für Elektrobus.* (RA)
- [48] M. Keller, EWI, Zürich: *Solarzellenanlage Giubiasco.* (RA + RF)
- [49] L. Clavadetscher, Th. Bähler, R. Hächler, Th. Nordmann, TNC, Chur: *Messkampagne 100-kWp-Netzverbundanlage N13 — Betrieb und Unterhalt der Anlage.* (RA)
- [50] R. Hächler, Th. Nordmann, TNC, Chur: *100-kW-PV-Netzverbundanlage entlang dem SBB-Trasse Bellinzona-Locarno (Mark II) — Projektierung und Realisierung.* (RA)
- [51] M. Hubbuch, EWI, Zürich: *HYDROSOL.* (RA)
- [52] M. Rauber, INFOENERGIE - Brugg: *50-kW-INFOSOLAR-Solarkraftwerk ISOKW.* (RA)
- [53] R. Gadola, DESERTASOL, Disentis/Mustér: *DESERTASOL, hochalpine PV-Anlage Caischedra.* (RA)
- [54] D. Kästli, KÄSTLI, Zollikofen: *Sonnenenergiehaus Kästli, Zollikofen.* (RA)
- [55] T. Cecon, Th. Nordmann, TNC, Chur: *Energie-Pioniergemeinde Bergün — Machbarkeitsstudie.* (RA)
- [56] R. Bärtschi, EWB, Bern: *PV-Kraftwerk Park & Ride Neufeld.* (RA)

- [57] S. Roth, NOK, Baden: *Solaranlage "Alp Findels"*. (RA)
- [58] Baudirektion Kt. ZUG, Zug: *Pilot-Solardachziegel-Anlage*. (RA)
- [59] M.-A. Bossard, P. Mullener, Com. MONTREUX, S<sup>ce</sup> Dom. & Bât., Montreux: *Installation PV de l'École professionnelle de Montreux, à Clarens*. (RA)
- [60] R. Egloff, COPER, Montreux, & CFF, Arrondissement I, Section des Bâtiments, Lausanne: *Installation PV, Bâtiment 4 en Gare CFF de Lausanne*. (RA)
- [61] M. Maurer, ETS - Sion: *Installation de 3 kWp avec injection dans le réseau, intégrée dans l'architecture et convertisseur EIV*. (RA)
- [62] M. Posnansky, Th. Hostettler, ARGE ATLANTIS ENERGIE, Bern, & SCHAEREN & ZETTER, Solothurn: *P&D-Anlage und Forschungsarbeiten betreffen PV-Schindeldach Rigi*. (RA)
- [63] P. Rudolf, GLAS TRÖSCH SOLAR, Ursenbach: *1,5-kWp-PV-Pilotanlage, Bützberg*. (RA)
- [64] J.-F. Pilet, Com. MONTREUX, Montreux, & SRE, Vevey: *Installation PV sur le débarcadère de Clarens*. (RA+RF)
- [65] H. Knöpfel, Th. Nordmann, TNC, Chur: *PV-Netzverbundanlage Berufsschulhaus*. (RA)
- [66] H. Knöpfel, Th. Nordmann, TNC, Chur: *24-kWp-PV-Netzverbundanlage Marzili/Taubenhalde, Bern — Projektierung, Realisierung, Bau und Begleitmasskampagne*. (RA)
- [67] R. Minder, Kons. PHALK MONT-SOLEIL c/o EWI, Zürich: *500-kWp-Solarzellen-Kraftwerk PHALK Mont-Soleil*. (RA+RF / NEFF 442)
- [68] R. Hächler, Th. Nordmann, TNC, Chur: *PV-Nutzung im Schweiz. Eisenbahnnetz*. (RA+RF / NEFF 486)
- [69] P. Lechaire, J.-Cl. Ferrier, ETS - Neuchâtel: *Agrégat PV de propulsion navale*. (RA/ NEFF 542)
- [70] M. Posnansky, Th. Hostettler, ATLANTIS ENERGIE, Bern: *PV-Anlage des Getreidemagazins*. (RA)
- [71] M. Posnansky, ATLANTIS ENERGIE, Bern: *PV-Fassaden-Kraftwerk*.
- [72] F. Plattner, SOLARUS-Genossenschaft für SONNENENERGIE, Russikon: *6-kWp-Solarkraftwerk Oberstufenschulhaus, Russikon/ZH*.
- [73] M. Sella, Off. Cant. ÉNERGIE, Genève: *Centrale solaire PV de 10 kWp de DEC-Morgines II*.
- [74] P. Toggenreiter, PMS ENERGIE, Mönchaltorf: *3-kWp-PV-Anlage mit Solarziegeln in Mönchaltorf*.
- [75] Th. Nordmann, TNC, Chur: *Bau der 100-kWp-PV-Netzverbundanlage entlang der Autobahn N2 bei Giebenach BL (Mark III)*.
- [76] Th. Nordmann, TNC, Chur: *Machbarkeitsstudie und Projektierungsarbeiten (PV-Standseilbahn Corviglia St. Moritz, Mark IV)*.
- [77] T. Nordmann, TNC, Chur: *Das schweizerische Photovoltaik-Förderungsprogramm*.

(RA) rapport annuel 1992 disponible

(RF) rapport final disponible

## 7. Références

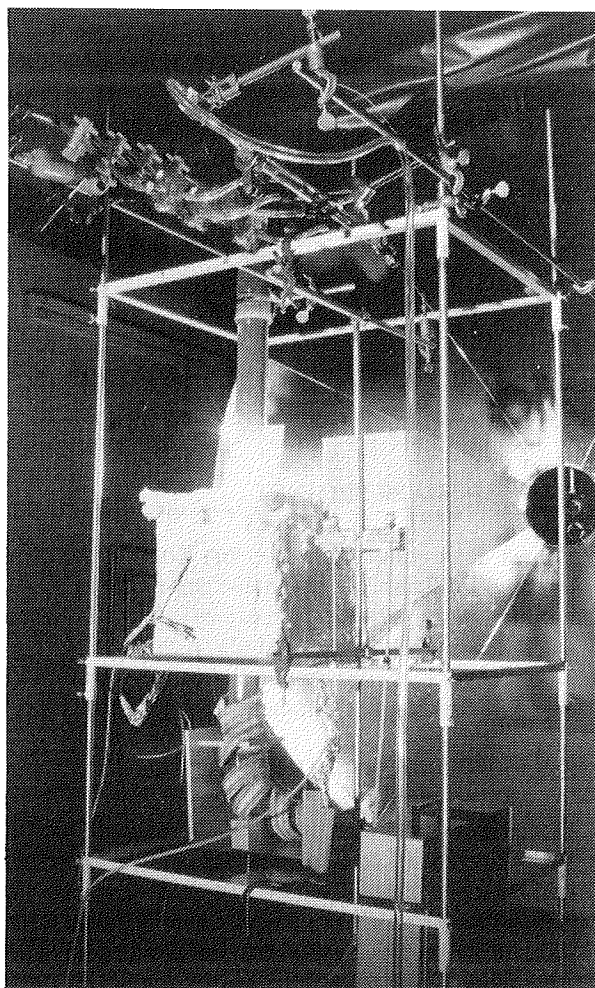
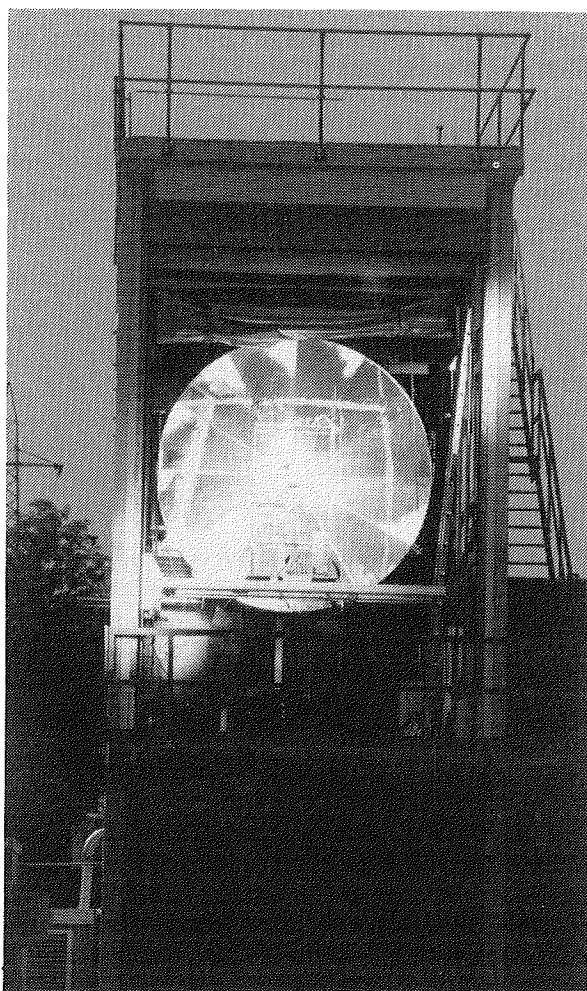
- [78] J. Li, M. Chong, J. Zhu, Y. Li, J. Xu, P. Wang, Z. Shang, Z. Yang, R. Zhu, X. Cao, Inst. of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing: *35 % efficient nonconcentrating novel silicon solar cell*, Appl. Phys. Lett. **60** (18), 4 May 1992
- [79] VSE / UCS — SEV/ASE Bull., **10** (22.05.1992), S. 9-47, Zürich.
- [80] Bull. SSES, **2**/1992 (mars/avril 1992), Bern.
- [81] Systèmes Solaires, **82/83** (sept/oct 1992), Paris.
- [82] Commission of the European Communities: *11th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference (Proceedings)*, Montreux, Switzerland, 12-16 October 1992, Harwood Academic Publ., Chur, 1993.
- [83] R. Frischknecht, P. Hofstetter, I. Knoepfel, P. Suter, ETH-Zürich: *Total pollution including "grey" pollution : life cycle analysis for the assessment of energy options*. pp. 13-32 in : World Energy Council, *15th Congress, Madrid, September 1992*.
- [84] Bull. SSES, **6**/1992, Bern.

# T H E R M O C H E M I E

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Armin Reller

---



20 kW Solar-Konzentrator-Anlage am PSI

Die beiden Abbildungen - aufgenommen während eines Solarexperiments in Villigen - zeigen den Parabolkonzentrator im Überblick (*links*) und den im Fokusbereich positionierten Durchfluss-Pulverwolkenreaktor zur solarthermischen Metalloxidreduktion (*rechts*).

## 1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1992

Die im Programm **Thermochemie** laufenden Projekte haben zum Ziel, Strahlungsenergie zu konzentrieren und mittels geeigneter Prozesse in speicherbares und/oder transportfähiges chemisches Potential umzuwandeln. Die dabei erforderlichen Stoffumwandlungen sollen dabei keine potentiellen Umweltrisiken in sich bergen. Dieser Ansatz erfordert einerseits die Bestimmung der Verteilung, Verfügbarkeit und Intensität von Energiequellen, insbesondere von Sonnenstrahlung, andererseits die Entwicklung, den Bau und die verfahrenstechnische Prüfung unter realen Bedingungen von Konzentratoren und Reaktoren. Darüberhinaus werden in verschiedenen Temperaturbereichen zwischen 200°C und 2000°C physikalische und chemische Prozesse definiert und optimiert, welche für die effiziente Speicherung und/oder Umwandlung der gesammelten Energie attraktiv sind.

Im Bereich der physikalischen Prozesse werden gasförmige (Luft), im kommenden Jahr auch flüssige Medien (Wasser) mittels volumetrischer Receiver oder selektiver Absorber aufgeheizt und anschliessend gespeichert oder als Prozesswärme für chemische Reaktionen weiterverwendet. Im Bereich der chemischen Prozesse wird der Energieträger Wasserstoff mittels zyklischer heterogener Reaktionen oder aber durch sekundäre, katalysierte Reaktionen aus Biomasse erzeugt. Sekundäre katalysierte Prozesse führen dann zu Grundchemikalien bzw. Energieträgern wie Methanol oder Ethanol aus Kohlendioxid und Wasserstoff.

Im Berichtsjahr wurden verschiedene Projekte abgeschlossen, deren Ergebnisse die Grundlage für gezielte anwendungsorientierte Nachfolgeprojekte bilden. Dies beinhaltet auch, dass nicht nur solare Strahlungsenergie als Energiequelle genutzt werden soll, sondern auch andere Energiepotentiale - wie z.B. Prozesswärme aus Abfallverwertung mittels thermochemischer Prozesse - umgewandelt, gespeichert und genutzt werden sollen. Eine Zusammenarbeit mit Industriebetrieben ist in das Programm integriert.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1992

### DAS SUNSHAPE-PROJEKT

Die für den optimalen Betrieb von Konzentratoranlagen notwendigen Messeinrichtungen und Auswertungsprogramme zur Erfassung der Intensitätsverteilung des direkt auf die Erdoberfläche einfallenden Sonnenlichts sowie der Flussdichteverteilung der konzentrierten Solarstrahlung wurden abgeschlossen [1]. Die Ergebnisse bilden die Basis für die Festlegung verfahrenstechnischer Parameter bzw. der optimalen Steuerung und Kontrolle von Hochtemperaturprozessen im Sonnenofen am PSI in Villigen. Die Messanlage kann natürlich auch an anderen Standort zum Einsatz kommen.

### SELEKTIVE ABSORPTIONSSCHICHTEN

Dünne selektiv absorbierende Niobfilme mit dendritischer Oberflächenstruktur wurden unter reproduzierbaren Bedingungen auf verschiedene Substrate aufgebracht [2]. Diese Filme sind bis 800°C stabil und können deshalb in unterschiedlichen Absorbersystemen eingesetzt werden. Die Bestimmung des Absorptionsverhaltens bezüglich Solarstrahlung sowie der thermischen Emission lässt den Schluss zu, dass ein direkter Zusammenhang zwischen dem mittleren Dendritabstand und der Selektivität der Schicht existiert bzw. für die Konstruktion optimaler Absorbersysteme ausgenutzt werden kann. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Im Rahmen eines Nachfolgeprojekts laufen bereits Arbeiten, welche die Entwicklung selektiver Schichten für ein System ABSORBER 2000 (Verbundprojekt mit weiteren BEW-Programmen) für den Einsatz in einem mittleren Temperaturbereich zum Ziel haben.

### UMWANDLUNG UND SPEICHERUNG SOLARER HOCHTEMPERATURWÄRME

Die Wärmespeicherung bei hohen Temperaturen in Schüttspeichern wurde weiter untersucht [3]. Im Vordergrund stehen Anwendungen im Bereich der Kurzzeitspeicherung in solarthermischen Kraftwerken im Temperaturbereich bis 600°C. Es wurden Schüttungen mit sensiblen Speichermaterialien untersucht (Schüttmaterial: Porzellan-Kugeln oder Chromstahl-Kugeln). Der Temperaturverlauf während des Speicherprozesses wurde experimentell und

theoretisch mittels eines Computerprogramms bestimmt. Anhand der erreichten Resultate kann die Auslegung und Optimierung eines Grossspeichers unter Berücksichtigung eines realen Betriebsprofils durchgeführt werden. Diese Arbeit ist von grosser Bedeutung für die Erstellung des geplanten 2,5 MW-Speichers in Almeria, Spanien. Auf dem Gebiet der latenten Wärmespeicher konnten bis anhin keine Experimente mit potentiellen Speichermaterialien durchgeführt werden. Es wurde jedoch ein Latentspeicher-Simulationsprogramm entwickelt und im Berichtsjahr weiter verbessert. Das Projekt **Speicherung solarer Hochtemperaturwärme** wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

## **SOLAR-KONZENTRATOREN, -RECEIVER UND -REAKTOREN**

Im Berichtsjahr wurden am PSI zwei Solarkonzentratoranlagen in Betrieb genommen: einerseits eine an einem neuen Standort installierte Anlage mit räumlich stationärem Brennpunkt (Heliostat mit 52 m<sup>2</sup> Spiegelfläche und sekundärer Parabolkonzentrator mit 5,7 m Durchmesser) sowie eine Anlage mit räumlich nicht-stationärem Brennpunkt (der Sonne nachgeführter 90 m<sup>2</sup> Parabolspiegel von McDONNELL-DOUGLAS) [4] in Betrieb genommen. In diesen Anlagen werden solarbetriebene Gas-Feststoff-Reaktoren eingebaut, in welchen die unten beschriebenen Hochtemperaturprozesse durchgeführt werden sollen.

Zeitgleich mit der Solarkonzentratoren wurden zwei atmosphärisch offene Zyklonen-Reaktoren realisiert, in denen thermochemische Prozesse im konzentrierten Strahlungsenergiefluss kontrolliert durchgeführt werden können. Die wichtigsten Ergebnisse der noch keineswegs optimierten kleinen Zyklon-Reaktors können wie folgt zusammengefasst werden: Bei einem Strahlungsinpust von ca. 3 kW erreichen die Reaktorwände Temperaturen von 1000 - 1200°C. Für eine Modellreaktion, die thermische Zersetzung von CaCO<sub>3</sub> konnte bei einem Kalzinierungsgrad von 53 - 94 % (abhängig von der Aufenthaltsdauer im Reaktor) ein Absorptions-Wirkungsgrad von 43% erzielt werden. Diese Resultate sind sehr vielversprechend und an der verfahrenstechnischen Optimierung potentieller thermochemischer Speicherprozesse soll weiter geforscht werden.

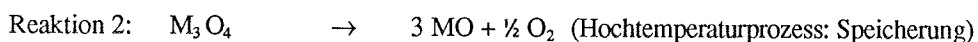
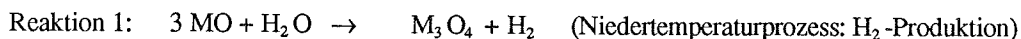
In einem Projekt der Firma ATLANTIS-ENERGIE in Bern wurden der Bau und die technische Prüfung volumetrischer *Receiver*-Systeme abgeschlossen [5]. Aufbau, optimale Energietransfereigenschaften und verfahrenstechnische Aspekte unterschiedlicher *Receiver* wurden ausgearbeitet. Der zur Verfügung stehende 300 kW *Gasreceiver* (Keramik-Gitter-Konzept) wurde mit einer verbesserten Absorberkonfiguration versehen und in der Solaranlage der *Sandia National Laboratories* (USA) eingehend geprüft. Es konnten Temperaturen bis 1000°C hinter dem Absorber gemessen werden. Bei mittleren Ausgangstemperaturen des aufgeheizten Gases um 750°C lag der Wirkungsgrad sehr hoch und erreichte 85% ! Gemäss der durchgeführten Experiment und theoretischen Berechnungen können bei einer Strahlungskonzentration von 900 kW/m<sup>2</sup> noch höhere Gastemperaturen und Wirkungsgrade erreicht werden. Diese Weiterentwicklung wird jedoch nur in Zusammenarbeit und Mitfinanzierung eines Partners aus Industrie oder öffentlicher Institution zur Realisierung kommen.

## **PROZESSE ZUR THERMOCHEMISCHEN ENERGIEUMWANDLUNG UND -SPEICHERUNG**

Um konzentrierte Strahlungsenergie oder Prozesswärme, z.B. aus der Abfallverwertung, in chemisches Potential umwandeln zu können, wurden thermochemische Prozesse auf unterschiedlichen Temperaturniveaus betreffend ihrer Eignung zur Energieumwandlung und Energiespeicherung untersucht. Im Zentrum des Interesses stehen Prozesse zur Herstellung bei der Umsetzung von Abfall-Kohlenstoffverbindungen wie Altholz oder Plastik einerseits, sowie Kohlenstoff-Verbindungen wie Methanol oder Ethanol aus der katalysierten Umsetzung von CO<sub>2</sub> mit Wasserstoff andererseits. Diese Stoffe sind sowohl attraktive Energieträger als auch wichtige Grundchemikalien.

### **a) Thermochemische Herstellung von Wasserstoff**

Im Zusammenarbeit zwischen PSI, Universität Zürich und Universität Hamburg wurden Metalloxidsysteme bezüglich ihres thermochemischen Redoxverhaltens charakterisiert. Diese Systeme können aufgrund thermodynamischer Daten für die Spaltung von Wasser mittels eines mindestens zweistufigen Reaktionszyklus in Frage kommen [6, 7]. Als Beispiel für einen derartigen Zyklus sei genannt:





Als Stoffsysteme wurden reines Eisenoxid, Eisen-Ruthenium-Oxid sowie Eisen-Mangan-Oxid studiert. Diese Phasen können bei hohen Temperaturen (1500-2000°C) thermisch reduziert werden, d.h. entsprechend Reaktion 2 Sauerstoff abspalten, bei tiefen Temperaturen (400-600°C) gemäss Reaktion 1 mit Wasser wieder aufoxidiert werden, d.h. Wasserstoff freisetzen.

Am PSI wurde in einem Durchfluss-Pulverwolkenreaktor die thermische Reduktion von Mangan- und Mangan-Eisen-Oxiden experimentell untersucht. Dabei gelang es bei Reaktionstemperaturen bis ca. 1200°C die Oxide mittels konzentrierter Solarstrahlung (ca. 200 W/cm<sup>2</sup>) in weniger als einer Sekunde zu reduzieren. Die kurze Reaktionszeit ist eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Energieumwandlung. In den Solarexperimenten mit Eisen-Mangan-Oxiden konnte auch der Einfluss des Fremdmetalls auf das Temperaturniveau der Sauerstoffabspaltung verifiziert werden.

An der Universität Zürich konzentrierten sich die Untersuchungen auf den Aufbau einer Wasserspaltungs-Apparatur mit vorgeschaltetem Wasserdampfgenerator und Gasanalytik mittels Massenspektrometrie. Das Eisen-Ruthenium-System konnte als für die Anwendung nicht geeignetes System (Reaktionsverhalten, Ökonomie) ausgeschieden werden. Die zur Zeit vorliegenden Ergebnisse bestätigen, dass der genannte Reaktionszyklus für das reine Eisenoxid- sowie für das Eisen-Mangan-Oxid-System funktioniert. Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die wohl optimale thermochemische Reaktivität von Eisenoxid für eine Anwendung bezüglich Ökonomie und Ökologie äusserst günstig liegt. In einem Nachfolgeprojekt wird nun die Kinetik, Energetik und Mechanistik dieser Prozesse derart optimiert, dass in den zur Verfügung stehenden Solarreaktoren und Wasserspaltungs-Apparaturen Pilotversuche gefahren werden können.

Parallel zu diesen Studien wurde ein Stoffkreislauf ausgearbeitet und experimentell verifiziert, der ausgehend von Methan (Erdgasbestandteil) mittels Redoxprozessen an Eisenoxid zu Synthesegas führt, welches seinerseits für die Herstellung von nützlichen Grundchemikalien bedeutend ist.

#### *b) Methanol-Synthese*

Seit der zweiten Hälfte 1991 wird in Zusammenarbeit mit der Zementindustrie (VILAB, in Reuchenette) [8] ein Projekt bearbeitet, das zum Ziel hat, einerseits katalytisch aktive Schichten zur Herstellung von Methanol aus CO<sub>2</sub> ("Abfall" aus der Zementproduktion) und H<sub>2</sub> zu entwickeln. Andererseits wird die Pyrolyse von Nutzholz nicht mehr verwendbarem Altholz, Altpneus, nicht rezyklierbaren Kunststoffen oder weiteren kontaminierten Brennstoffen bezüglich Synthese von H<sub>2</sub> bearbeitet. Ein Vorteil des Einsatzes dieser Brennstoffe im Zementwerk besteht darin, dass durch die vorgeschaltete Pyrolyse Schwermetalle isoliert werden könnten und danach durch die hohe Flammentemperatur im Brennofen (~ 2000°C) mögliche toxische Kohlenstoffverbindungen vollständig abgebaut werden. Im Berichtsjahr wurde vor allem die effiziente Erzeugung von Wasserstoff mittels Pyrolyse von Holz untersucht. Aktive Katalysatorsysteme wurden mittels neuartiger Abscheidungsverfahren auf unterschiedlichen Trägermaterialien in Form dünner Filme mit hoher Oberfläche aufgebracht.

Die für eine effiziente Methanolsynthese notwendige Entwicklung neuartiger sowie die Optimierung konventioneller Katalysatorsysteme wurde in einem an der ETH Zürich laufenden Projekt im Berichtsjahr abgeschlossen [9]. Die Resultate können nun für eine Anwendung in der genannten Prozesskette der Zementindustrie herangezogen werden. In einem Nachfolgeprojekt wurde nun auch untersucht, inwiefern weitere nützliche Kohlenstoffverbindungen - z.B. durch die katalysierte Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Amine - erhalten werden können. Es ist zu erwarten, dass die Zusammenarbeit zwischen grundlagenwissenschaftlich orientierter und angewandter Forschung ein für die Schweiz und international vielversprechendes Modell für die Entwicklung und Realisierung zukunftsorientierter und umweltverträglicher Technologien im Bereich der Energieproduktion und -nutzung darstellt.

### **3. Nationale und internationale Zusammenarbeit**

Die im Programm **Thermochemie** laufenden Projekte sind im Berichtsjahr soweit koordiniert worden, dass wechselseitige Kontakte nicht nur in Form von Diskussionen stattfinden, sondern in Form direkter experimenteller und organisatorischer Zusammenarbeit. Indem die Programmarbeiten zur Zeit auf sechs Laboratorien (PSI;



Universität Basel; VILAB; Universität Zürich; ETH-Zürich und ATLANTIS-ENERGIE) konzentriert sind, lässt sich diese Koordination auch überblickbar gestalten und weiter ausbauen. Darüberhinaus wurde im Berichtsjahr mit dem Projekt ABSORBER 2000 erstmals eine programmübergreifende Studie (zusammen mit dem Programm **Aktive Solarnutzung & Wärmespeicherung**) in Angriff genommen. Um Überschneidungen betreffend Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet der Methanolsynthese zu vermeiden, wurden schliesslich koordinierende Gespräche mit den verantwortlichen Projektleitern aus Hochschulen und Industrie durchgeführt. Für den kommenden Frühling ist ein Symposium geplant, in dessen Verlauf nicht nur die Aktivitäten des Programms **Thermochemie** präsentiert werden, sondern auch mit geladenen Gästen mögliche oder schon laufende gemeinsame Aktivitäten anzugehen. Dies gilt insbesondere für Arbeiten auf dem Gebiet der CO<sub>2</sub>-Forschung.

Auch die internationale Zusammenarbeit wurde im Berichtsjahr weiter ausgebaut. Einerseits bedingt durch den neuen Arbeitsort des Programmleiters (Universität Hamburg) und andererseits durch verbesserte direkte Kontakte mit ausländischen Forschungsinstitutionen konnten die Aktivitäten des Programms **Thermochemie** optimal in internationale Tätigkeiten eingebettet werden. Das im Herbst 92 durchgeführte *6th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies* in Mojacar (Spanien) war ein idealer Anlass für die entsprechende koordinierende Diskussionen. Als wichtigste Partnersituationen sind zu nennen:

- Universität Hamburg
- Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Köln
- *Plataforma Solar de Almeira*, (Spanien)
- *Sandia National Laboratories*, Albuquerque (USA)
- *Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science*, Rehovot (Israel)

#### 4. Umsetzung der Ergebnisse

Im Berichtsjahr wurde eine teilweise Umstrukturierung und Straffung des Programms **Thermochemie** vorgenommen. Dies beinhaltete vor allem die Koordination von verwandten Projekten, insbesondere die Abstimmung der Aktivitäten im Gebiet der Methanol-Synthese, sowie der vermehrte Miteinbezug von Projekten aus dem Gebiet der angewandten Forschung bzw. von Aktivitäten in Industrieunternehmen. Dadurch konnte das Programm über die vor allem auf Hochschulinstitutionen konzentrierte Grundlagenforschung hinaus in praxisnahe und für Wirtschaft und Industrie interessante Gebiete erweitert werden.

Durch die programmübergreifende Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Entwicklung von Absorbern wurde davon ausgegangen, dass am Ende der Projektdauer ein wettbewerbsfähiges System zur Verfügung stehen soll, dessen Einsatzpotential ebenfalls schon angegeben werden kann.

Die in Zusammenarbeit mit der Zementindustrie erfolgten Arbeiten haben neben den Ergebnissen betreffend pyrolytischem Abbau von Kohlenstoffverbindungen zur Entwicklung eines Verfahrens zur Beschichtung unterschiedlicher Strukturen und Trägermaterialien mit katalytisch aktiven Materialien geführt. Diese Methode kann jedoch auch in anderen industriellen Verfahren kostengünstig eingesetzt werden. Das Einsatzpotential wird zur Zeit abgeklärt.

#### 5. Geplante Forschungsarbeiten für 1993

Die Arbeiten des Projekts ABSORBER 2000 müssen soweit vorangetrieben werden, dass Ende 1993 genügend Ergebnisse vorliegen, potentielle Industriepartner zu informieren und betreffend Zusammenarbeit zu interessieren. Dieses hochgesteckte Ziel sollte mit der breit angelegten, programmübergreifenden Zusammenarbeit erreicht werden können.

Für das Jahr 1993 ist vorgesehen, die grundlagenwissenschaftlichen Arbeiten an den gewählten Metalloxidsystemen für die Herstellung von Wasserstoff bezüglich Einsatz im Solarreaktor zu optimieren. Diese Arbeiten erlauben erste konkrete Vorstellungen betreffend Effizienz der Energieumwandlung bzw. -speicherung des gesamten Reaktionszyklus. Dabei werden die experimentelle Messung der Temperaturverteilung auf Festkörperoberflächen in Abhängigkeit von der Form, der Wärmeleitfähigkeit und der Emissivität des gewählten Materials mit thermographischen Methoden wichtige Parameter liefern.

Der am PSI bereits bestehende Zyklon-Pulverreaktor wird weiterentwickelt und Grundlage für die Planung und Konstruktion eines mittelgrossen Reaktors (einige 10 kW) für Versuche auf dem grossen Konzentrator von McDONNEL-DOUGLAS sein. Die Tests mit dem mittelgrossen Reaktor sollen dann mit denjenigen der Fa. BÜHLER, Uzwil, verglichen werden. Die Ergebnisse bilden schliesslich die Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Baukonzepts eines grossen Solarreaktors (einige 100 kW, Einsatz im Sonnenkraftwerk von Almeria).

Neben der Methanolsynthese werden nun die Grundlagen für die Herstellung von weiteren interessanten Kohlenstoffverbindungen erarbeitet.

Im Frühjahr 1993 wird ein Symposium mit allen am Programm **Thermochemie** Beteiligten sowie eingeladenen Gästen aus Forschung, Politik, Wirtschaft und Industrie zwecks Informationsaustausch, Koordination und Festlegung weiterer Aktivitäten stattfinden. Im Sommer 1993 wird am PSI eine für 1992 vorgesehene Demonstration des Solarreaktors (neue Anlage mit verschiedenen Spiegelsystemen und Reaktoren) für Presse und interessierte Kreise stattfinden.

## 6. Publikationen

Über die geleisteten Arbeiten wurde eine grosse Anzahl von Publikationen in der Fachliteratur veröffentlicht.

## 7. Liste der Projekte

- [1] M. Schubnell, PSI - Villigen: *Messungen der Intensitätsverteilung der Sonnenstrahlung in dem für Konzentratoren wesentlichen Winkelbereich.* (SB)
- [2] P. Oelhafen, J. Eitle, Uni - Basel: *Selektive Schichten in der Hochtemperatursolartechnologie.* (JB, SB)
- [3] W. Durisch, A. Meier, C. Winkler, PSI - Villigen: *Speicherung solarer Hochtemperaturwärme.* (JB, SB)
- [4] A. Imhof, A. Steinfeld, W. Durisch, PSI - Villigen: *Solar-Reaktoren zur chemischen Umwandlung pulverförmiger Stoffe in einem Strahlungsfeld hoher Leistungsdichte.* (SB)
- [5] M. Posnansky, T. Pytkänen, ATLANTIS ENERGIE, Bern: *Grundlagen für die Konzeption und den Bau von Strahlungsreaktoren für thermochemische Prozesse.* (JB)
- [6] P. Kuhn, L. Forss, H.R. Tschudi, PSI - Villigen: *Thermo-/Photochemische Reaktionen zur chemischen Speicherung konzentrierter Solarstrahlung bei hohen Temperaturen.* (JB)
- [7] P. Hug, H.R. Oswald, Uni - Zürich & A. Reller, Uni - Hamburg: *Festkörperchemische und materialwissenschaftliche Untersuchungen des thermochemischen Reaktionsverhaltens von Phasen, die für die chemische Speicherung von Sonnenenergie relevant sind.* (JB)
- [8] P. Brunner, V. Gauché, VILAB, Reuchenette: *Entwicklung katalytisch aktiver Schichten zur Herstellung von Methanol aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> sowie Herstellung von H<sub>2</sub> aus Abfall durch Pyrolyse.* (JB)
- [9] A. Baiker, Ch. Fröhlich, R. Köppel, ETH - Zürich: *Katalytische Synthese von Methanol ausgehend von mineralischen CO<sub>2</sub>-Quellen.* (SB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

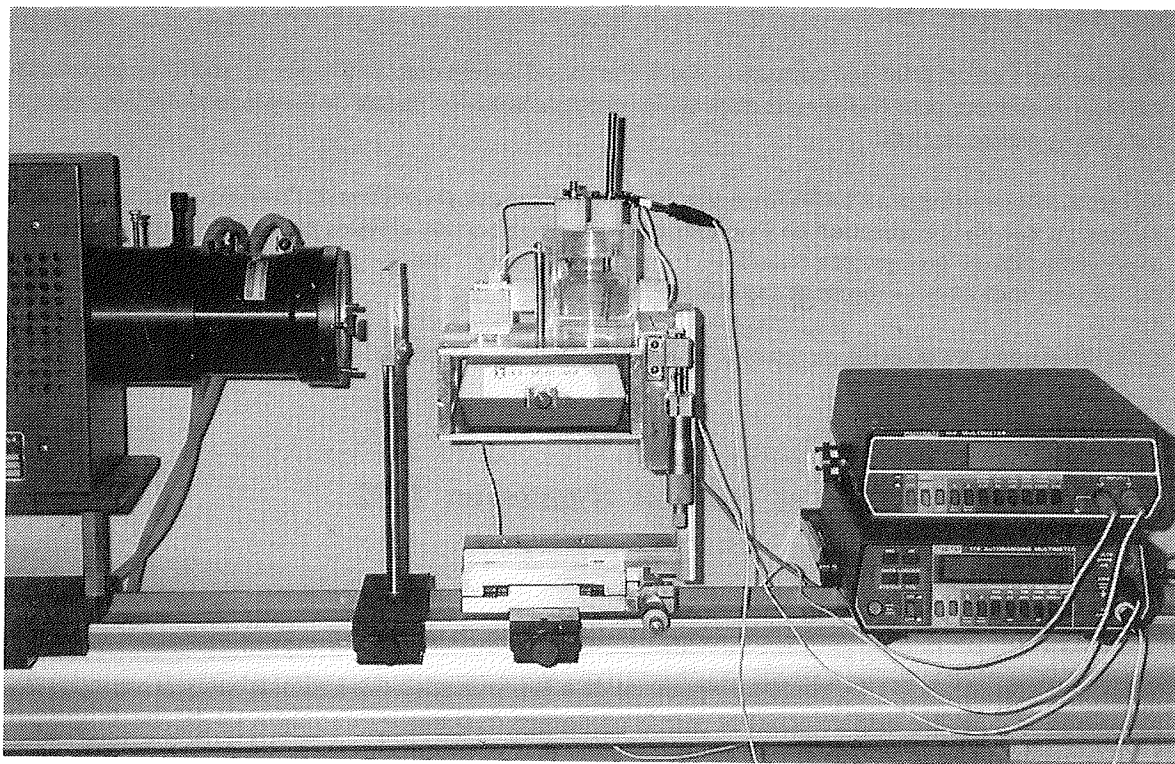
(SB) Schlussbericht vorhanden

# PHOTOCIMIE

**Rapport de synthèse**  
sur les activités 1992 du programme de recherche

**Chef de programme: Jean-Claude Courvoisier**

---



## **Photodécomposition de l'eau**

Expérience réalisant la photodécomposition de l'eau au moyen de la lumière visible en vue du stockage sous forme d'hydrogène de l'énergie solaire.

## 1. Objectifs du programme 1992

L'objectif général du programme **Photochimie** est la recherche d'un moyen de stocker l'énergie solaire sous forme chimique, sous une densité comparable aux hydrocarbures, dont l'utilisation soit compatible avec les exigences de l'environnement, et pour un coût acceptable dans le contexte économique. Ces exigences sont sévères en sorte que l'approche doit se faire par étapes. Dans toute la mesure du possible, les résultats intermédiaires de cette approche doivent être valorisés dans la pratique chaque fois que cela apparaît possible.

L'année 1992 est à cet égard importante. Dans la perspective de l'objectif général du programme, le stockage sous forme chimique de l'énergie solaire, nous avons pu conduire une expérience fondée sur la conception énoncée à fin 1991, visant à démontrer la faisabilité de la décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène en utilisant la lumière visible comme source d'énergie. La conjugaison des compétences complémentaires des groupes des universités de Berne et Genève et de l'EPF-Lausanne a permis de démontrer le bien-fondé de notre conception.

Les progrès accomplis à l'EPFL permettent d'envisager l'industrialisation des cellules photoélectrochimiques développées depuis plusieurs années. Les discussions avec des partenaires industriels intéressés se sont poursuivies activement.

À Genève, l'exploration des voies permettant de réaliser la réduction du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) donne des résultats très prometteurs

À Berne, où l'effort principal porte sur l'étude des ions d'argent dans des cages de zéolithes utilisés comme capteurs de lumière pour réaliser une étape de la décomposition de l'eau ou de la réduction du  $\text{CO}_2$ , des progrès importants ont été réalisés.

Les recherches conduites à l'EPF-Zürich visaient à la maîtrise des paramètres de dépôt des couches de phosphore de zinc en vue de la réalisation de jonctions p-n utilisables comme cellules photovoltaïques. Des difficultés expérimentales ont quelque peu retardé les travaux, mais on a néanmoins pu démontrer la possibilité d'obtenir ces couches sous forme amorphe de façon reproductible.

Dans l'ensemble, les objectifs des travaux pour l'année écoulée ont été atteints.

## 2. Travaux effectués et résultats obtenus en 1992

### RÉDUCTION PHOTOÉLECTROCHIMIQUE DU $\text{CO}_2$ [1]

Au lieu de considérer le  $\text{CO}_2$  comme un polluant dû à la combustion des hydrocarbures, il est intéressant de l'envisager comme une matière première pour la production de composés de valeur. Le groupe de recherche de l'Université de Genève explore la voie électrochimique et photoélectrochimique, l'énergie nécessaire électrique pouvant être d'origine solaire ou nucléaire, le complément étant fourni par la lumière visible. La réduction électrochimique sur des électrodes métalliques, Cu, Ag, Au, est connue. Toutefois la réaction souffre d'un rendement faradique faible (quelques pourcent) et les électrodes perdent leur activité en moins d'une heure. L'équipe de Genève a ouvert cette année de nouvelles perspectives très prometteuses pour la solution de ce problème. D'une part, elle a confirmé la démonstration de l'activation par la lumière de l'argent utilisé comme électrode mise en évidence en 1991 qui triple le rendement obtenu dans des conditions usuelles. D'autre part, elle a développé un traitement de l'électrode de cuivre qui augmente d'un ordre de grandeur le rendement faradique de la réaction. Cela porte la durée d'efficacité de l'électrode de moins d'une heure à plus de 24 heures, la limite supérieure n'ayant pas encore pu être déterminée. La combinaison de l'effet de lumière et du traitement d'activation sera explorée l'année prochaine avec l'étude des moyens permettant de conduire la réaction vers des produits de haute valeur tels que l'éthylène, le méthanol ou l'éthanol.

## RÉDUCTION PHOTOÉLECTROCHIMIQUE DU CO<sub>2</sub> ET PHOTOLYSE DE L'EAU [2, 3]

L'argent joue un rôle important dans plusieurs réactions photochimiques. Le groupe de l'Université de Berne avait mis en évidence les propriétés spécifiques des atomes de cet élément "encagés" dans la zéolithe sous forme ionique. Ils sont capables d'oxyder l'eau en oxygène avec libération d'ions hydrogène. Le but consiste d'une part à maîtriser les paramètres de cette réaction, à l'incorporer dans un système cyclique et à la coupler avec une réaction de réduction du CO<sub>2</sub> ou des ions hydrogènes. La zéolithe substituée par l'argent a en outre la propriété de s'auto-sensibiliser en ce sens que l'effet de la lumière de plus grande longueur d'ondes augmente au fur et à mesure que la réaction avance. Deux progrès importants ont été réalisés cette année. D'une part, on a pu démontrer que des couches monograins de zéolithe peuvent être déposées sur des substrats conducteurs électriquement et qu'elles présentent les mêmes propriétés que la zéolithe disposée dans une liquide; d'autre part, on a mis en évidence la possibilité de réoxyder l'argent après qu'il ait été lui-même réduit en oxydant l'eau en oxygène libre. Ces deux points sont essentiels pour ouvrir la voie à l'exploitation pratique de cette réaction photochimique.

En parallèle avec ces travaux, l'étude théorique au moyen de l'ordinateur des réactions chimiques s'est activement poursuivie et a été mise au service des travaux expérimentaux décrits plus haut. On a ainsi réalisé les premiers calculs de structure de bandes pour un modèle de Ag-zéolithe.

La poursuite de ces travaux, en parallèle avec ceux qui sont menés en collaboration avec Genève et Lausanne et qui sont décrits plus loin doit nous rapprocher du but poursuivi par les chercheurs participant au programme **Photochimie**: le stockage sous forme chimique de l'énergie solaire.

## CELLULES PHOTOÉLECTROCHIMIQUES [4]

Depuis plusieurs années, le groupe de recherche de l'EPFL développe une cellule photovoltaïque photoélectrochimique mettant en jeu une couche d'oxyde de titane activée par un colorant. Le circuit interne de la cellule est fermé sur une contre électrode conventionnelle au moyen d'un électrolyte comportant un couple redox. A fin 1991 le **rendement de la cellule** en laboratoire et sous illumination de la lumière visible correspondant au spectre solaire atteignait 10%. A la fin de cette année, cette valeur a été augmentée pour atteindre **plus de 14%**. Les travaux qui ont permis cette amélioration ont porté sur la structure de la couche de TiO<sub>2</sub>, sur la nature du photoactivateur et sur celle de l'électrolyte. Des progrès substantiels sur le rendement sont encore attendus suite aux travaux qui se poursuivront en 1993. L'industrie a manifesté depuis deux ans un grand intérêt pour ces résultats et des pourparlers sont en cours pour convenir d'un accord entre les partenaires concernés, industrie-EPFL-OFEN visant au développement de produits satisfaisant les exigences du marché.

Cette technologie offre plusieurs avantages de principe par rapport à celle des cellules photovoltaïques conventionnelles (à base de silicium mono- ou polycristallin), en particulier du fait des exigences moindres en termes de pureté et de structure du semi-conducteur. Les possibilités d'exploitation industrielles peuvent en conséquence en être jugées réalistes.

## CELLULES SOLAIRES EN COUCHES MINCES [5]

Le groupe de recherche de l'EPFZ concentre son attention, dans le cadre du programme **Photochimie**, sur l'étude de la possibilité de réaliser des cellules solaires à partir de phosphure de zinc. Ce matériau offre les avantages d'une bande d'énergie interdite (*energy gap*), optimale pour l'absorption du spectre solaire visible et d'une composition chimique exempte de substances dangereuses pour l'environnement en comparaison de l'arséniure de gallium ou des composés de cadmium. Le travail de cette année a permis de maîtriser les paramètres de déposition des couches minces par *sputtering* haute fréquence dans une enceinte pouvant être évacuée jusqu'à 5.10<sup>-10</sup> tor ce qui assure l'absence de contamination de la couche. Alors que le Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> cristallin est sensible à l'oxydation dans l'atmosphère, les couches amorphes déposées à Zürich sont beaucoup plus résistantes. Ces couches, comme celles qui sont produites à l'étranger sont toujours de type n. Les essais avec le phosphure de magnésium (Mg<sub>3</sub>P<sub>2</sub>) ont échoué, ce matériau étant immédiatement oxydé lorsqu'il est mis en contact avec l'atmosphère. Une collaboration est entamée avec l'AFIF, à Zürich, qui possède une grande compétence dans les couches semiconductrices en CuInSe<sub>2</sub>. D'autre part, la collaboration se développe de façon très satisfaisante avec le groupe de l'Université de Neuchâtel, expert dans le dépôt de silicium amorphe et microcristalline qui

pourrait constituer un excellent candidat pour la réalisation d'une hétéro-jonction avec  $\text{Zn}_3\text{P}_2$ . De plus, cette collaboration a permis, grâce à la compétence et à l'équipement disponible à Neuchâtel, de caractériser physiquement plus complètement les couches obtenues à Zürich.

Il est prévu que cette recherche sera poursuivie en 1993 avec pour but de démontrer la possibilité de réaliser une cellule photovoltaïque de performance intéressante.

#### **LA PHOTOÉLECTROLYSE DE L'EAU ET PRODUCTION D'HYDROGÈNE ET D'OXYGÈNE AU MOYEN DE L'ÉNERGIE SOLAIRE [6]**

Une étude de faisabilité a été conduite en 1992 visant à la réalisation de la décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène au moyen de l'énergie solaire. Il s'agit là d'entreprendre une recherche qui devrait mener à la mise au point d'une méthode permettant de réaliser le stockage sous forme chimique de l'énergie solaire. Une conception avait été proposée à fin 1991. Elle met en oeuvre la complémentarité des compétences des groupes de Genève, Lausanne et Berne participant déjà aux travaux de recherches du programme **Photochimie**.

Il s'agit de combiner la réduction des protons en hydrogène libre à partir d'éléments dérivés des électrodes en  $\text{TiO}_2$  photoactivées (EPFL) avec l'oxydation de l'eau en oxygène sur des électrodes de  $\text{WO}_3$  (Uni Genève) ou en zéolithe substituée à l'argent (Uni Berne). Le processus ne met en jeu que deux photons, ce qui constitue une nouveauté.

Chacun des laboratoires a travaillé sur la partie qui le concernait, plusieurs séances de coordination permettant d'assurer que les progrès des partenaires soient cohérents. Ces séances ont d'autre part contribué à l'affinement du concept et à l'élaboration de solutions des problèmes rencontrés. Une expérience combinant les éléments de Genève ( $\text{WO}_3$ ) et de Lausanne ( $\text{TiO}_2$  activé) a été réalisée au début de novembre. On a pu constater que l'eau est en effet décomposée par l'action de deux faisceaux de lumière visible sur le  $\text{TiO}_2$  et  $\text{WO}_3$  respectivement. Les surfaces photosensibles sont encore très faibles ( $< 1\text{cm}^2$ ) et le dégagement de  $\text{O}_2$  et  $\text{H}_2$  modeste, quoique clairement observable. Ces travaux permis de mettre en évidence les points où doit porter l'effort principal en vue d'améliorer le procédé. Durant les deux derniers mois de l'année, des progrès significatifs ont encore été réalisés dans les trois laboratoires en sorte que l'on prévoit d'atteindre un rendement de conversion de lumière visible en  $\text{O}_2$  et  $\text{H}_2$  d'au moins 1% lors de la prochaine expérience prévue pour le début janvier 1993.

On peut conclure de cette première année, consacrée à démontrer la faisabilité du concept, que c'est un succès qui justifie la poursuite de cette voie avec un effort accru. Il faut relever enfin l'excellent climat de collaboration qui a régné durant toute l'année entre les trois groupes. Chacun a apporté au projet le meilleur de ses compétences. Celles-ci se sont avérées parfaitement complémentaires.

#### **DÉTERMINATION DE STRUCTURES [7]**

Il est apparu que dans toute une série de projets de recherche liés aux problèmes relatifs à l'énergie, et plus particulièrement à la conversion de l'énergie solaire, la structure de couches minces joue un rôle important sur les performances des dispositifs étudiés. Cela est notamment le cas pour les travaux relatifs aux zéolithes [2], à l'oxyde de titane [4], au  $\text{Zn}_3\text{P}_2$  [5]. C'est aussi vrai pour les recherches en **Electrochimie**, en **Thermochimie** et pour celles portant sur l' **Hydrogène**. Un tel projet est en cours à l'*Institut für Kristallographie und Petrographie* de l'ETHZ. Il est destiné à mettre en oeuvre les méthodes raffinées de rayons X et de microscopie électronique, et à les développer si nécessaire, pour fournir aux groupes de recherches un instrument efficace permettant de mieux comprendre les résultats obtenus et d'en maîtriser la reproductibilité. Ce projet s'est révélé très utile.

### **3. Collaboration internationale**

A la suite de la participation à la 9<sup>ème</sup> *Conference on Photochemical Transformation and Storage of Solar Energy*, G. Calzaferri a été chargé d'organiser en Suisse la prochaine conférence, en 1994. C'est une reconnaissance internationale pour la recherche en photochimie conduite en Suisse, notamment à l'Université de Berne. Le groupe de l'Université de Genève collabore sur la réduction photoélectrochimique du  $\text{CO}_2$  avec l'Université de Waterloo au Canada et avec l'Université de Lyon en France pour élucider le mécanisme de la

photoactivation des électrodes d'argent. Les contacts du groupe de l'EPFL avec les milieux académiques et industriels dans le monde entier sont très actifs et trop nombreux pour être détaillés ici.

Chacun des groupes participant au programme **Photochimie** cultive un réseau de contacts avec ses homologues respectifs dans le monde scientifique. Il faut encore mentionner que la collaboration entre les groupes en Suisse est de plus en plus active, ce qui contribue à assurer un usage optimal des moyens investis.

#### 4. Transfert à la pratique

Les discussions très soutenues avec l'industrie au sujet des cellules photoélectrochimiques se sont poursuivies tout au long de l'année. Elles n'ont pas abouti encore à un accord de développement de la part des intéressés. Il est vraisemblable que l'on parviendra à des décisions concrètes en 1993. Dans tous les cas, les partenaires concernés ont manifesté un vif intérêt et ont confirmé la viabilité du projet, sans cacher l'effort qui reste à accomplir pour passer des résultats très encourageants obtenus en laboratoire à un produit prêt à être lancé sur le marché. Les travaux de l'Université de Genève devraient susciter de l'intérêt de la part des industries. Il était prématuré d'explorer d'éventuelles possibilités déjà en 1992, car les résultats doivent encore être étendus et leur potentialités dûment explorées. Il est prévu d'envisager cet aspect de la recherche dès le début de 1993.

#### 5. Perspectives 1993

Les recherches menées dans le cadre du programme **Photochimie** seront poursuivies en 1993. Si une participation aux recherches sur les cellules photoélectrochimiques développées à l'EPFL est encore prévue pour l'année à venir, elle devrait aller en décroissant et cesser à fin 1993. Le projet de l'Université de Genève sur la réduction du CO<sub>2</sub> doit se développer afin d'exploiter au mieux la nouveauté des voies ouvertes.

Le projet de l'EPFZ entre en 1993 dans une phase décisive. Il importe de démontrer le bien-fondé de l'objectif poursuivi ou de devoir constater que les difficultés rencontrées sont insurmontables en comparaison des moyens disponibles.

Enfin, le travail sur la photolyse de l'eau qui comporte le volet de l'Université de Berne (zéolithes) et celui de la collaboration entre Berne, Lausanne et Genève sera activement poursuivi, étant entendu qu'il serait modifié ou interrompu dès 1994 si les résultats obtenus en 1993 devaient mettre en évidence des impossibilités ou un défaut majeur de la conception, ce qui ne semble pas être le cas jusqu'ici.

#### 6. Liste de projets

- [1] A. Augustynski, Uni - Genève: *Réduction électrolytique du bioxyde de carbone dans des solutions aqueuses.* (RA)
- [2] G. Calzaferri, Uni - Berne: *Photochemische und photoelectrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie.* (RA)
- [3] G. Calzaferri, K. Hädener, Uni - Berne: *Photochemische und photoelectrochemische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie, quantenchemische Simulation.* (RA)
- [4] M. Grätzel, EPF-Lausanne: *Conversion d'énergie solaire par des piles photoélectrochimiques régénératrices et par des systèmes photocatalytiques.* (RA)

- [5] H. von Känel, ETH - Zürich: *Dünnschicht Solarzellen aus Verbindungshalbleitern*. (RA)
- [6] A. Augustynski, Uni - Genève, G. Calzaferri, Uni - Berne, M. Grätzel, EPF - Lausanne: *La photo-électrolyse de l'eau et production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire*. (RA)
- [7] V. Shklover, ETH - Zürich: *Strukturuntersuchungen an Materialien für die Chemische Speicherung von Energie*. (RA)

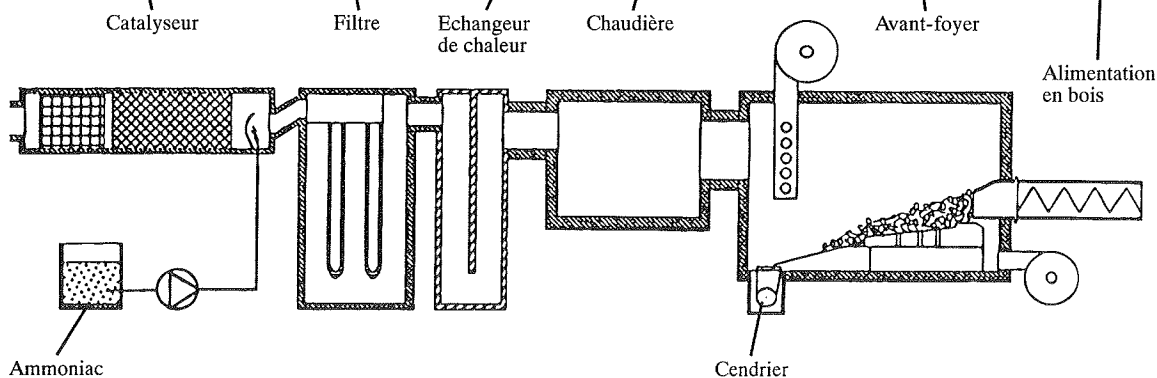
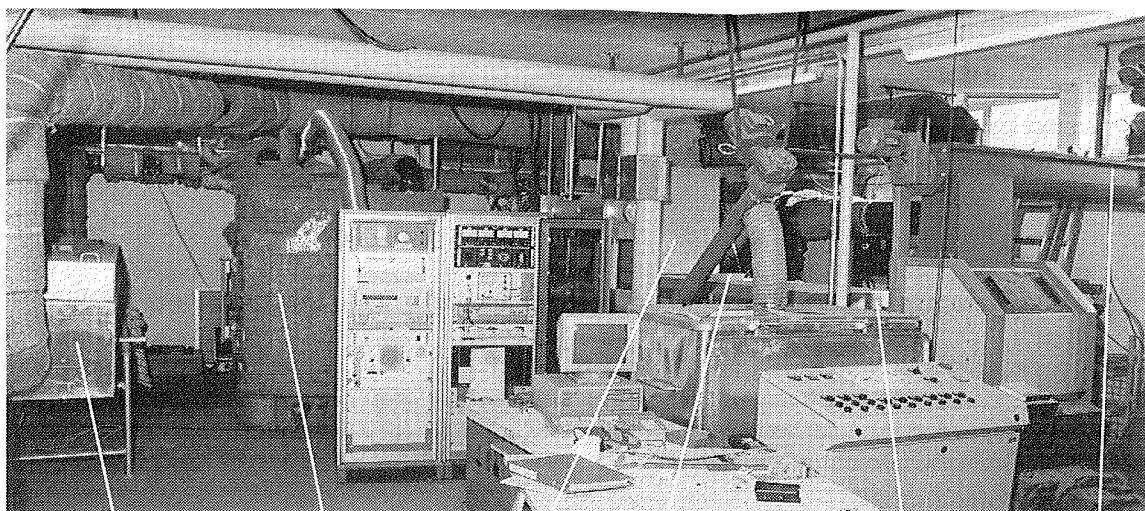
(RA) rapport annuel 1992 disponible



# BIOMASSE

**Rapport de synthèse**  
sur les activités 1992 du programme de recherche

**Chef de programme : Michel Roux**



## Dénitrification par la technique SCR

Dans la chaudière à avant-foyer, installée dans le local d'essais de la firme TIBA, à Bubendorf (BL), les émissions de  $\text{NO}_x$  provenant de la combustion de bois usagé sont réduites de plus de 90% par injection d'ammoniac dans les gaz de fumée selon la technique SCR (*Selective Catalytic Reduction*).

## 1. Objectifs du programme et buts visés pour 1992

Le programme de recherche **Biomasse** vise à mettre en valeur, en vue de produire de l'énergie, les diverses biomasses provenant de la forêt, des déchets de l'agriculture et de l'élevage, de plantes énergétiques, des déchets urbains et des résidus organiques de l'industrie. Il tente aussi d'évaluer les possibilités offertes par la biotechnologie dans la préparation de nouveaux agents et substrats.

Les buts visés en 1992 peuvent se résumer comme suit :

- Restructurer le programme d'après les **origines de la biomasse** et les **techniques de conversion**,
- Améliorer le rendement et la qualité de **combustion des chauffages individuels** et des **chaudières à bois**,
- Trouver une solution économique à l'élimination énergétique du **bois usagé**,
- Mener à terme les travaux sur les **fumiers** et lancer des réalisations pilotes ou industrielles,
- Poursuivre le développement des filières de conversion des **déchets urbains et industriels**,
- Lancer les activités de recherche sur les **plantes énergétiques**,
- Assurer la participation au programme **Bioenergy** de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

## 2. Travaux de recherche effectués et résultats obtenus en 1992

Le programme de recherche Biomasse a été restructuré afin de classer avec une plus grande transparence les nombreux types de biomasse, les différentes filières de transformation et les produits à valeur énergétique ou industrielle qui en résultent.

### RÉCOLTE ET PRÉPARATION DE LA BIOMASSE

#### a) Forêt

Le marché suisse du bois est caractérisé entre autres par un coût élevé de la main d'oeuvre et la prédominance des bois de construction. Le bois d'énergie n'est qu'un sous-produit. Trois projets visent à en augmenter l'offre.

- Dans le projet **mise en valeur du bois d'énergie** [1], une douzaine de chantiers présentant diverses conditions forestières et en équipements ont été analysés. À l'exception d'un cas, la récolte mécanisée s'avère moins coûteuse que l'abattage traditionnel, sans pour autant causer de dégâts aux peuplements. Le problème réside dans la répartition rationnelle et coordonnée des puissants engins entre les différentes exploitations.
- L'interprétation énergétique de l'**OPair92** [2] en un langage accessible aux entreprises qui travaillent le bois (scieries, menuiseries, charpentes) doit proposer des solutions pour valoriser les restes de ces exploitations.
- Les **taillis sous futaie (Mittelwald)** [3] renferment un potentiel important en bois d'énergie. Cinq sites en Suisse ont été retenus pour déterminer leurs caractéristiques et évaluer le coût de leur exploitation.

#### b) Plantes énergétiques

Dans le cadre général du projet **Herbes énergétiques / Bois sur terrain agricole (Energiegras / Feldholz)** [4], cinq projets concernent la production et la récolte de matières premières renouvelables. Ils sont coordonnés par la Station de recherches de Tänikon (FAT). La première phase s'étend de 1992 à 1993.

- Les **herbes énergétiques** [5] retenues ou plantées dans le cadre de ce projet proviennent principalement de prairies naturelles ou artificielles ainsi que d'espèces du type C<sub>4</sub>, telles que les joncs chinois (*Chinaschilf* ou *Miscanthus sinensis*). De petites parcelles de 4 à 36 m<sup>2</sup> ont été préparées à la Station de recherches de Reckenholz (ZH) ainsi qu'à Anwil (BL). Quatre des plantations réalisées par la Communauté d'intérêt *Interessengemeinschaft Bio-Rohstoffe* à des altitudes allant de 270 à 580 m ont aussi été analysées.
- Le projet **Bois agricoles** [6] vise, comme le précédent, à planter de façon extensive des matières premières renouvelables sur des surfaces agricoles. Cinq sites répartis entre les cantons d'Argovie, des Grisons, de Lucerne, de St Gall et de Zürich, situés à des altitudes entre 430 et 1050 m, ont été plantés de mélanges d'arbres et buissons adaptés au terrain. Deux autres sites dans les cantons de Berne et de Fribourg sont en préparation.
- La **gestion régionale de plantations énergétiques** [7] se propose de quantifier le flux des éléments chimiques carbone (C), azote (N) et potassium (K) dans une région typique de 2'500 km<sup>2</sup> de surface sur le Plateau suisse. Ce projet prend en compte aussi bien le sol, la forêt, l'agriculture et l'élevage que l'industrie alimentaire, la production et la consommation d'énergie et le traitement des déchets, y compris les flux dus aux importations et exportations.
- Le projet **Rentabilité économique** [8] cherche à calculer le revenu net par hectare de différentes cultures, parmi lesquelles figurent les plantes énergétiques. Les premiers résultats donnent une idée des versements directs à leur accorder pour les rendre concurrentielles par rapport aux cultures traditionnelles.
- Le lien entre la plantation et la transformation en énergie de plantes énergétiques passe par l'étude critique de la **logistique** [9]. Ce projet évalue les méthodes appropriées de récolte, de transport, de stockage et de préparation de la biomasse ainsi que le recyclage des résidus de la conversion. La transformation en pellets, briquettes, balles ou en sacs ainsi que les équipements disponibles à la ferme seront considérés.
- Une communauté d'intérêt **IG Bio-Rohstoffe**, créée le 30 janvier 1992, regroupe une trentaine de paysans des cantons de Bâle-Campagne et de St Gall ainsi que dans le Fricktal. Ils ont planté environ 9 hectares de *Miscanthus sinensis giganteus*. Lors de l'assemblée constitutive du 22 décembre 1992, cette communauté s'est transformée en une association suisse avec un comité élargi et des objectifs non limités aux plantes C<sub>4</sub>. Elle participe comme observateur aux travaux du projet **Herbes énergétiques / Bois agricoles**.

## CONVERSIONS THERMO-CHIMIQUE ET BIOLOGIQUE

### a) Bois

#### o Gazéification

- Le **gazogène à co-courant de 300 kW** à Curio (TI) [10] a continué d'être l'objet de profondes améliorations visant à en simplifier l'exécution et à diminuer encore le volume de la chambre de gazéification. Il a été doté d'un allumage automatique et d'une nouvelle grille destinée à laisser passer le gaz mais à retenir les très fines particules de charbon de bois. Il fonctionne à l'Ecole communale de Novaggio depuis fin novembre 1992.
- Le **gazogène à co-courant de 500 kW**, issu d'une ancienne construction et installé jusqu'ici à Steinmaur, a prouvé sa fiabilité technique. Cette installation ne pouvant plus être améliorée dans son état actuel, un nouveau prototype sera construit sur un site dans le canton de Soleure. L'objectif final est de produire un gaz apte à être utilisé dans un système à couplage chaleur-force.

#### o Combustion

- La **dénitrification lors de la combustion de bois usagé** [11] [12] a suivi deux approches consistant l'une à injecter de l'ammoniac pur ou en solution aqueuse dans la chambre de combustion (*SNCR = selective non catalytic reduction*), l'autre dans les gaz de fumée (*SCR = selective catalytic reduction*). Toutes deux ont mené

à une réduction des  $\text{NO}_x$  de plus de 90% et à de faibles pertes en ammoniac. Les conditions optimales ont pu être déterminées [13]. La technique SCR est maintenant suffisamment au point pour être proposée à un constructeur de chaudière (voir page de titre). Les bons résultats de la technique SNCR, d'environ 10% moins coûteuse, doivent encore être confirmés dans des conditions réelles.

- Les **six petits chauffages individuels de 10 à 30 kW** et la **chaudière de 30 kW** [14], dotés de chambres de combustion horizontales brevetées, ont été construits et analysés quant à leurs émissions à puissance nominale et partielle et lors de la phase critique d'allumage. Un simple réglage de l'air devrait améliorer les résultats insuffisants mesurés sur les émissions de CO.
- La comparaison des émissions et du rendement des **deux chaudières individuelles à bûches de 12 kW** [15], l'une servant de chauffage central d'étage et l'autre de chauffage d'appoint, arrivent aux mêmes conclusions que le projet [14]. Les émissions de CO peuvent être, dans un premier temps, diminuées de plus de 50% par un allumage correct.

Quatre nouveaux projets ont pu être lancés durant l'année :

- Le **réglage de la chaudière à bûches de 30 kW** [16], mentionnée dans le projet [14], se base sur un contrôle séparé de l'air primaire et secondaire lors de l'allumage afin d'éliminer les pointes de CO observées. Il étudie différents types de réglage : sur l'air, le taux de  $\text{O}_2$  ou la température dans les fumées et celle de la flamme.
- Le **laboratoire pour chauffages à bois** [17] [18] devait, dans sa phase préliminaire, définir le contenu, l'organisation et le soutien en connaissances, équipements et analyses à apporter aux fabricants pour améliorer la qualité de leurs produits. Les priorités ont été définies après consultation avec les associations faitières : optimisation de la géométrie des foyers, service de mesures et de développement pour le programme DIANE et conception d'un banc d'essai pour chauffages jusqu'à une puissance de 50 kW.
- Un **chauffage à air chaud de 60 kW** [19] a été construit en collaboration par deux fabricants et utilise des copeaux ou des bûches. Ce projet teste trois types de foyers et deux exécutions d'échangeur. Les premiers résultats présentent des émissions de CO inférieures à 500 mg/m<sup>3</sup>.
- Une **chaudière de 110 kW avec condensation des fumées** [20] a été transformée pour brûler des copeaux frais. La récupération de la chaleur latente devrait permettre d'en augmenter le rendement de 15%. Divers tests sont en cours sur les systèmes de condensation et la composition du condensat. Les plans d'une installation pilote sont réalisés.

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

##### *o Fumiers solides*

- Le **digesteur pilote de 7 m<sup>3</sup> utiles** [21], en continu et sans brasseur, a aussi fonctionné en mésophile (32°C). Avec respectivement 9 m<sup>3</sup> / jour et 1,8 m<sup>3</sup> gaz / m<sup>3</sup> digesteur, les productions brute et spécifique de biogaz ne diffèrent pas, pour des temps de rétention comparables, de celles obtenues en thermophile (50°C). Les problèmes d'évacuation du fumier digéré ont été résolus. Ce projet est maintenant terminé.
- Le **pilote du digesteur en forme de canal horizontal** [21], contenant 23 m<sup>3</sup> de lisier liquide et de construction simple et peu coûteuse, a été mis en service à fin novembre 1992. Dans ce volume circulent en continu 11 paniers remplis de fumier solide d'une contenance de 1 m<sup>3</sup> chacun. Les essais débiteront en mésophile.
- Le **pilote du digesteur modulaire en discontinu** [22] se compose de quatre cuves de 30 m<sup>3</sup> chacune pour fumier solide et d'une cuve de 10 m<sup>3</sup> pour la recirculation des jus. Tous les circuits et les éléments de l'installation ont fait l'objet d'un protocole de réception. Il est opérationnel depuis mi-novembre 1992.

##### *o Fumiers liquides*

- Le **petit digesteur clé-en-main, en bois** [23], de 40 m<sup>3</sup> et dimensionné pour 30 UGB (unité de gros bétail), peut maintenant être construit à l'échelle pilote. Des démarches ont été menées pour trouver un exploitant agricole

et une entreprise disposés à installer ce digesteur. Son coût de Fr. 75'000.- pour une série de 5 pièces confirme l'estimation faite au début du projet, soit Fr. 2'500.- / UGB; le pilote (unique) coûte Fr. 10'000.- de plus.

c) *Plantes énergétiques*

o *Ester méthylique de colza (Rapsmethylester, RME)*

- Les **essais au banc** à l'EMPA [24] d'un moteur de bus alimenté par trois types de carburant diesel et du RME ont confirmé pour la Suisse les valeurs obtenues par d'autres laboratoires à l'étranger.
- La **campagne d'essais de cinq bus fonctionnant au RME** [25], d'une durée d'un an sur des lignes régulières des Transports publics de Zürich, s'est terminée en août 1992. Quelques problèmes mineurs ont été rencontrés.
- L'étude concernant la **faisabilité technique, économique et écologique d'une installation de production de RME en Suisse** [26] [27] est terminée. Elle arrive à la conclusion qu'il suffirait, pour les besoins suisses, d'une seule installation ayant une capacité de 20'000 t d'huile / an, soit 22 millions de litres de RME. Elle coûterait Fr. 10 millions et produirait du RME au prix de Fr. 0,28 / litre (sans le coût de la matière première). Les utilisateurs sont, par ordre d'importance, l'agriculture, les transports publics (surtout en ville), les entreprises de la construction et certains grands distributeurs (plein de carburant aux pompes centralisées de l'entreprise).

o *Plantes énergétiques*

- Le projet **combustion et gazéification d'herbes énergétiques et de bois agricoles** [28] va probablement conduire à des émissions importantes dues en particulier à leur plus grande teneur en soufre, azote, chlore et cendres. Des analyses poussées ont été effectuées après combustion de pellets et briquettes d'herbes, de foin, de paille et de Miscanthus dans des chaudières de 40 et 140 kW et après gazéification dans une installation de 500 kW.
- Le projet **bilan écologique de diverses formes d'utilisation d'herbes énergétiques et de bois agricoles** [29] a développé une méthode originale. Elle compare les bilans de matières premières lors de leur production, leur combustion, leur gazéification ou leur digestion. Ces bilans se basent sur une production calculée pour 1996.

d) *Déchets urbains*

o *Méthanisation*

- Une des cuves du projet [22] a été utilisée pour la **méthanisation en discontinu de déchets ménagers** [30]. Des essais avec des déchets de jardins, de maraîchers ou de producteurs de fruits et des déchets urbains triés, incorporés à du fumier, ont déjà été réalisés. Des contacts ont été pris avec les communes et les fournisseurs de la région pour livrer par la suite les ordures et déchets nécessaires. Un programme d'essais a été préparé.
- Le système de **séparation des phases liquide et solide par extrusion** d'une biomasse récoltée séparément a pu être réalisé. Ses résultats ne sont pas encore connus.
- L'**installation industrielle de valorisation des déchets ménagers KOMPOGAS** [31] a été mise en service en 1992. Elle a une capacité de 5000 t ordures / an. Les 1'300 m<sup>3</sup> de gaz produits journellement fournissent par couplage chaleur-force 4'400 kWh de chaleur et 2'200 kWh d'électricité. Le digesteur thermophile de 200 m<sup>3</sup> utiles est placé sous terre de sorte que l'emprise au sol du bâtiment de réception des ordures et d'exploitation est minime. La recherche porte encore sur l'amélioration du traitement des eaux usées.

o *Compost*

- Le projet **Energia Verde, compostage en enceinte fermée** [32], d'une contenance de 0.5 m<sup>3</sup>, est terminé. Le rapport final sera disponible au printemps 1993. Une installation pilote de 2000 t compost / an est à l'étude.
- Une pré-étude sur la **récupération d'énergie à partir de compost** [33] est arrivée à la conclusion que seule la chaleur contenue dans l'air vicié, évacué d'une halle de compostage fermée, satisfait à des conditions favorables à son utilisation. Un rapport final est en préparation pour l'été 1993.

e) **Déchets organiques industriels**

- Le projet de **digestion à 2 phases de déchets biogènes solides** [34] a porté sur une nouvelle conception de l'hydrolyse et sur la transformation du filtre anaérobie. Le système d'hydrolyse retenu, économique et énergétiquement performant, consiste à intimement mélanger puis à séparer les phases solide et liquide dans un tambour horizontal perforé, d'un diamètre de 1,40 m, à mouvements rotatifs lents. L'installation revisée et munie d'un système de régulation a été déplacée et reconstruite à Maschwanden (ZH).
- Un projet a été lancé sur la **valorisation énergétique de déchets légèrement altérés chimiquement** [35] [36]. Il traite des déchets de papier, carton, emballages et autres bois usagés. Le flux de ces matières et leur potentiel énergétique, leur composition chimique, les méthodes de valorisation par combustion ou recyclage et le bilan écologique ont été recensés. L'enjeu de l'étude : maintenir ou non un bas prix pour le papier à recycler.

f) **Biotechnologie et hygiène**

o **Nouveaux agents énergétiques**

- La première phase du projet **méthanol à partir de la biomasse (BIOMETH)** [37] vise à déterminer les conditions techniques, économiques et écologiques que devrait remplir une installation de 50 t méthanol / jour. La biomasse considérée provient de vieux papiers et de bois usagés. Quatre domaines d'investigation seront couverts par les 7 entreprises et bureaux d'ingénieurs associés à cette étude sous la direction de l'Institut Paul Scherrer (PSI), à Villigen.
- Une étude concernant une **installation semi-industrielle de production d'éthanol (BIOL)** [38] à partir de déchets lignocellulosiques par hydrolyse rapide est en cours dans le canton de Bâle-Campagne.

o **Nouveaux substrats**

- Un projet traite de l'**optimisation énergétique de la défibrillation du bois par traitement biologique** [39]. Il s'applique à déterminer les types de champignons spécialisés s'attaquant le mieux et le plus rapidement à la lignine. L'objectif est de produire avec faible consommation d'énergie un amendement remplaçant la tourbe.
- Un dernier projet cherche à sélectionner les virus, bactéries ou parasites capables de détruire les **germes humains, animaux et végétaux présents dans la digestion de matières organiques solides** [40]. Les résultats préliminaires montrent que le Parvovirus est le plus résistant et donc utilisable comme indicateur de survie des germes. L'expérimentation a été conduite sur l'installation *KOMPOGAS* à 50 °C [31].

### 3. Collaborations nationale et internationale

Dans le domaine de la forêt, la première version du Guide pour la transcription technique de l'OPair92 a été élaborée avec les institutions faitières de la branche. Tous les projets bois sont réalisés en collaboration avec des fabricants suisses. Les trois membres du groupe d'accompagnement du programme **Biomasse** se sont vu confier des responsabilités soit dans le programme DIANE, soit dans INFOENERGIE ou encore dans le Comité des projets Pilotes + Démonstration de l'OFEN.

Les délégués suisses ont activement participé aux trois projets *Combustion*, *Gasification* et *Anaerobic Digestion* du programme *BIOENERGY* de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Ils ont présenté les résultats suisses aux réunions, conférences, séminaires et visites auxquels ils ont pris part et ramené de nouvelles connaissances. Les rapports sont disponibles auprès du chef de programme. De nombreux chefs de projets se sont aussi rendus dans des pays étrangers pour voir sur place les développements et réalisations concernant leurs activités.

#### 4. Transfert à la pratique

Plusieurs exposés ont été présentés sur le projet **Herbes énergétiques / Bois agricoles**. L'essai de 5 bus diesel au RME a montré les possibilités et limites de ce carburant. La dénitrification de la combustion de bois usagé par le procédé SCR est offerte aux fabricants de chaudières. Les plans détaillés d'un digesteur clé-en-main, en acier, peuvent être remis aux paysans intéressés. L'installation industrielle **KOMPOGAS** est prête à servir de modèle ailleurs en Suisse pour la digestion de déchets ménagers séparés à la source. Huit chefs de projets ont présenté leurs travaux à la Conférence internationale d'Interlaken *Advances in Thermochemical Biomass Conversion* en mai 1992. Un colloque sur les petits chauffages à bois a été organisé dans le cadre du programme DIANE le 22 octobre 1992. Un 2<sup>ème</sup> séminaire sur l'énergie du bois s'est tenu à Zürich le 23 octobre 1992 et a réuni plus de 200 participants. Ces deux dernières manifestations suisses ont fait appel à des experts étrangers.

#### 5. Evaluation 1992 et perspectives pour 1993

Avec 40 projets en cours ou lancés en 1992, dont 1 projet NEFF et 4 installations P+D, le programme de recherche **Biomasse** a atteint, voire dépassé sa taille optimale. À ces activités s'ajoutent encore les projets **Petits chauffages à bois** et **Bois usagés et vieux papiers** du programme DIANE, les réalisations du Groupe d'action renouvelables ENERGIE-2000 et les 22 installations subventionnées en 1992 par le programme Promotion du bois. Un bon départ a pu être assuré au projet **Récolte de bois d'énergie en forêt** et au multi-projet **Plantes énergétiques**. Il s'est avéré quelque fois difficile d'obtenir que tous les mandataires satisfassent aux conditions stipulées dans leur contrat.

En 1993, le développement de **Petits chauffages au bois** devra porter sur le réglage de la combustion. Les **Gazogènes** devront faire l'objet d'applications expérimentales. Les installations pilotes de **Digester de fumier** devront attirer les paysans hésitants en prouvant leur bon fonctionnement. Le projet **Digestion à 2 phases de déchets biogènes solides** devrait pouvoir envisager le stade pilote. Le domaine de la "Biotechnologie" devra suivre de près les deux projets **Alcool**.

#### 6. Liste des projets

- [1] Ph. Steinmann, XYLON, *Le Mont S/Lausanne: Mise en valeur du bois énergie*. (RA)
- [2] Ph. Steinmann, XYLON, *Le Mont S/Lausanne: Guide pratique OPair92*. (RA)
- [3] B. Bally, AMBIO, Zürich: *Auswertung der Mittelwald-Nutzung aus der Sicht der Energieholzproduktion*. (RA)
- [4] J.-L. Hersener, FA - Tänikon: *Energiegras / Feldholz : Projektmanagement*. (RA)
- [5] J. Lehmann & E. Meister, FA - Reckenholz: *Energiegras / Feldholz : Energiegras*. (RA)
- [6] J. Rüegg, FA - Wädenswil: *Energiegras / Feldholz : Feldholz*. (RA)
- [7] P. Baccini, D. Müller & W. Obrist, EAWAG - Dübendorf: *Regionale Bewirtschaftung von Energiegras und Feldholz*. (RA)
- [8] K. Laville-Studer, FA - Tänikon: *Energiegras / Feldholz : Ökonomie*. (RA)
- [9] J.-L. Hersener, FA - Tänikon: *Energiegras / Feldholz : Logistik*. (RA)
- [10] L. Jaccard, ENSOFOR, *Curio: Gazogène à bois, extension*. (RA)
- [11] R. Bühler, ARGE ALTHOLZNUTZUNG, *Maschwanden: Altholzfeuerung mit Entstickung*. (RA)
- [12] M. Baur, VON ROLL, Zürich: *NO<sub>x</sub>-Abscheidung nach dem SNCR-Verfahren mit nachgeschaltetem abwasserfreien Nasswäscher zur Abscheidung des überschüssigen Ammoniaks*. (RF)

- [13] R. Bühler, BÜHLER - IEU - NUSSBAUMER, *Maschwanden: Abgasentstickung bei Holzfeuerungen durch selektive katalytische und selektive nicht-katalytische Reduktion SCR und SNCR* (Projekt Altholzfeuerung, Phase 2). (RF)
- [14] A. Jenni, IEU & C. Chiquet, CHIQUET ENERGIE-TECHNIK, *Liestal: Entwicklung und Praxiserprobung einer schadstoffarmen holzbeschickten Kleinfeuerung*. (RF)
- [15] P. Schweizer, PASOL, *Liestal: Wirkungsgrad- und Emissionsvergleich verschiedener Stückholzheizsysteme*. (RA)
- [16] Th. Nussbaumer, VERENUM, *Zürich: Regelung einer Stückholzfeuerung*. (RA)
- [17] Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, *Langenbruck: Vorprojekt Technikum des Holzfeuers*. (RA)
- [18] Ch. Gaegauf, ÖKOZENTRUM, *Langenbruck: Versuchs- und Entwicklungsstätte für Holzenergie des ÖZ-L VEHOLz* (Vorprojekt). (RF)
- [19] H. P. Schaffner, HÄFLIGER, *Dulliken & H. J. SCHMID, Eschlikon: Warmluftofen mit automatischer Schnitzelfeuerung und Stückholz*. (RA)
- [20] A. Jenni, IEU, *Liestal*, Th. NUSSBAUMER, *Zürich* & F. Steiger, STEIGER UMWELTTECHNIK, *Liestal: Abgaskondensation bei Grünschnitzelfeuerungen*. (RA)
- [21] K. Egger & U. Baserga, INFOENERGIE, FA - Tänikon: *Semikontinuierliche Vergärung von strohhaltigem Mist*. (RA)
- [22] Y. Membrez, EREP, *Aclens: Système modulaire de méthanisation en discontinu*. (RA)
- [23] K. Egger, INFOENERGIE, FA - Tänikon: *Kleine, schlüsselfertige Biogasanlage (Phase II)*. (RA)
- [24] Th. Walter, EMPA - Dübendorf: *Untersuchung des Emissionsverhaltens eines Nutzfahrzeugmotors bei Betrieb mit Rapsölmethylester*. (RF)
- [25] S. Seidenglanz & G. Benz, VBZ, *Zürich: Erfahrungen beim Betrieb von Linienbussen der VBZ mit Rapsmethylester*. (RF)
- [26] R. Minder, EWI, *Zürich* & NOVAMONT, *Milano: Rapsmethylester-Produktionsanlage (Engineering-Studie)*. (RA)
- [27] EWI, *Zürich* & NOVAMONT, *Milano: Produktion von Raps-Methyl-Ester in der Schweiz, Vorstudie*. (RF)
- [28] Th. Nussbaumer & P. Suter, ETH-Zürich: *Verbrennung und Vergasung von Energiegras und Feldholz*. (RA)
- [29] S. Grass & B. Jans, CARBOTEC, *Zürich: Erstellung von Ökobilanzen für verschiedene Nutzungsformen von Energiegras und Feldholz als nachwachsende Energieträger*. (RA)
- [30] Y. Membrez, EREP, *Aclens: Méthanisation en discontinu de déchets ménagers*. (RA)
- [31] W. SCHMID, *Glattbrugg: Zwischenbericht 1992 Kompogas - Prozess* (nicht für Veröffentlichung bestimmt).
- [32] L. Jaccard, ENSOFOR, *Curio: Energia Verde*. (RF)
- [33] W. Edelmann, ARBI, *Maschwanden & PROBAG, Dietikon: Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung bei der Kompostierung* (Vorstudie). (RF)
- [34] W. Edelmann, ARBI, *Maschwanden: Digestion à 2 phases de déchets biogènes solides (Phase II)*. (RA)
- [35] W. Vock, ABFALL & RECYCLING, *Niederlenz: Energetische Verwertung von Biomasse aus leichtbelasteten Abfällen* (Vorprojekt). (RA)
- [36] W. Vock, ABFALL & RECYCLING, *Niederlenz: Energetische Verwertung von Biomasse aus leichtbelasteten Abfällen*". (RF)
- [37] S. Stucki, PSI - Villigen: *Methanol aus Biomasse (BIOMETH)*. (RA)
- [38] ZELLPLAN - München: *Durchführbarkeitsstudie Demonstrationsanlage BIOL Baselland*.
- [39] M. Aragno, Uni - Neuchâtel: *Optimisation énergétique de la défibrillation du bois par un traitement biologique, en vue de la production d'amendements*. (RA)
- [40] A. Metzler & F. Pesaro, Uni - Zürich: *Human-, tier- und pflanzenpathogene Keime in der Feststoffvergärung*. (RA)

(RA) rapport annuel 1992 disponible

(RF) rapport final disponible

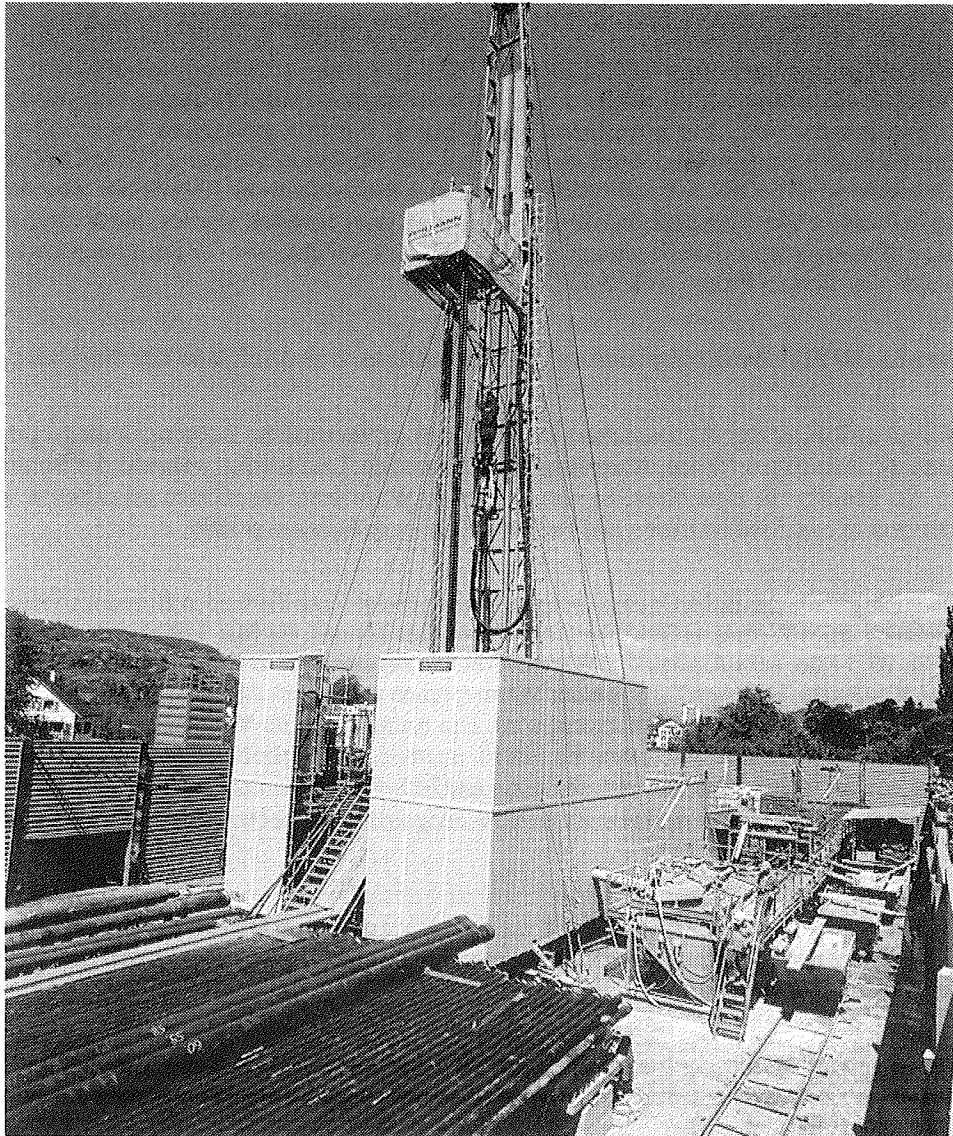


# G E O T H E R M I E

**Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992**

**Programmkoordinator: Martin Brunner**

---



## **Bohrturm**

Zur Erschliessung von warmen Wässern aus Tiefen um 1500 m werden in der Schweiz über 30 m hohe Bohrtürme eingesetzt, welche mit Lärmschutzwänden umgeben sind.

## 1. Programmziele

Die Aktivitäten in Geothermie und unterirdischer Speicherung werden in unserem Land bundesseitig von der KGS (Eidg. Kommission für Geothermie und unterirdische Speicherung) angeregt, koordiniert und auf ihre praktische Bedeutung abgeschätzt. Das Hauptziel dieses Jahr war, die Grundlagen zu schaffen für die Initialisierung eines Forschungsprogrammes **Geothermie**. Die Forschungsaktivitäten der saisonalen Wärmespeicherung werden enger an das Forschungsprogramm **Aktive Solarnutzung und Wärmespeicherung** gebunden. Dabei konnte man sich auf die Vorleistungen der Förderprogramme GEOTHERMIE 2000 und PROMOSTOCK abstützen.

## 2. Arbeiten und Ergebnisse 1992

Im Rahmen des Förderprogrammes GEOTHERMIE 2000 [1] wurden an 2 *Brainstormings* unter Fachleuten die Themen **Nutzung von warmen Tiefenwässern** und **Erdwärmesonden mit verwandten innovativen Technologien** analysiert und insgesamt 25 Förderprojekte identifiziert. Für ihre praktische Umsetzung soll der Weg öffentlicher Ausschreibungen begangen werden. Ziel des Förderprogrammes PROMOSTOCK (saisonale Wärme-Speicherung) ist es, bis zum Jahr 2000 in unserem Land mindestens 10 grössere saisonale Untergrundspeicher zu realisieren. Die Hälfte davon soll mit Wärmepumpen gekoppelt werden, die übrigen mit Sonnenkollektoren ohne Wärmepumpen. Die Erfahrungen an bestehenden Anlagen und der Forschungsbedarf an künftigen Anlagen werden im Bericht Promostock 1992 [2] vorgestellt.

Die Arbeiten für das Forschungsprogramm auf den beiden Gebieten sind auf Ende Jahr eingeleitet worden.

Seit 1987 sind aufgrund der *Risikodeckung des Bundes* 6 geothermische Bohrungen niedergebracht worden. Davon waren die Bohrungen **Riehen**, **Kreuzlingen** und **Bassersdorf** ein Erfolg, während die Bohrungen **Reinach**, **Bulle** und **St. Moritz** für eine Nutzung ungenügende Warmwasserzuflüsse erbrachten. Für 3 weitere Bohrprojekte wurde eine Risikodeckung und ein Förderbeitrag in Aussicht gestellt.

Eingehende geologisch-technische Untersuchungen haben gezeigt, dass die beiden Bohrungen **Riehen** (Doublette) für die Beheizung eines Wohnquartiers herangezogen werden können. Im Mai 1992 hat der Einwohnerrat einem Kredit von Fr. 22,5 Mio. zum Ausbau des Wärmeverbunds zugestimmt. In der unterirdischen Grundlastzentrale werden zwei Aggregate, bestehend aus je einer Wärmepumpe und einem Blockheizkraftwerk, aufgebaut, wobei der Strom zum Antrieb der Pumpen gebraucht wird. Die Anlage wird im Vollausbau auf 36 GWh/a ausgelegt, wovon der Anteil der Geothermie etwa die Hälfte ausmacht. Verglichen mit Einzelheizungen wird der Heizölbedarf von 84 % auf 16 % gesenkt, die SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen um 3/4 und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um die Hälfte verringert. Das Wärmeverteilnetz ist zu 80% ausgebaut, der geothermische Teil der Anlage wird im Winter 1993/94 in Betrieb gehen.

Gemäss einer Studie von ELEKTROWATT ist die Nutzung der Bohrung **Kreuzlingen** mittels einer Gaswärmepumpe zur Beheizung öffentlicher Gebäude sinnvoll. Das Projekt soll der Bevölkerung zur Abstimmung unterbreitet werden.

Die auf 550 m geplante Bohrung **Bassersdorf** war auf Jahresende voll im Gang. Ziel ist die Erkundung der Oberen Meeresmolasse, welcher bereits im 3 km westlich gelegenen Kloten Warmwasser zur Beheizung von 70 Wohnungen entnommen wird.

Im November wurde mit der Herrichtung des Bohrplatzes SE **Genf** begonnen. Die eigentlichen Bohrarbeiten bis in eine Tiefe von 2400 m werden voraussichtlich anfangs März 1993 beginnen.

Seit 1989 ist das geothermische Potential des Kantons St. Gallen untersucht worden. Als günstig für eine Nutzung erwies sich der Raum **Sargans** und westlich davon das **Seeztal (Mels, Walenstadt)**. Wegen geringer Abnehmerdichte ist es schwierig, eine Trägerschaft zur Finanzierung einer 1000 m tiefen Bohrung zu gründen.

Im Rhonetal treten an verschiedenen Stellen heisse Quellen zutage (**Lavey, Leukerbad, Brigerbad**). Im Rahmen des Forschungsvorhabens **GEOTHERMOVAL** werden die hydrogeologischen und thermischen Verhältnisse im Kanton Wallis eingehend untersucht. Im laufenden Jahr wurden einige Bohrungen mittlerer Tiefe niedergebracht und tiefere Bohrungen (**Saillon, Sion, St-Maurice**) vorbereitet. Im **Simplontunnel** austretendes Warmwasser könnte zur Beheizung des geplanten Bahnhofneubaus Brig herangezogen werden.

In den letzten Jahren hat sich die Aufmerksamkeit vermehrt den mit **Wärmepumpen gekoppelten Erdwärmesonden für Niedertemperaturheizung** zugewendet. Gegenwärtig sind mehr als 4000 Anlagen im Betrieb. Bund und Kantone haben in einigen repräsentativen Anlagen Temperaturmessungen durchgeführt, um über Temperaturveränderungen im Untergrund und ihre Lebensdauer mehr Aufschluss zu erhalten. Neuerdings werden auch Messungen in Pfahlgründungen, sog. Energiepfählen durchgeführt. An der unterirdischen Speicheranlage **SPEOS** haben schweizerische, deutsche und holländische Forschergruppen Massnahmen getestet, um die Verstopfung der Drains beim Aufladen zu vermeiden. Die Aufladung wurde durch Einleitung von  $\text{CO}_2$  wesentlich erleichtert und die Durchlässigkeit verbessert. Während dem 10. Zyklus wurden 877 MWh Wärme mit Temperaturen zwischen 70 und 80°C eingeleitet. Ein Teil der Wärme dient der Beheizung der Sportanlagen von **Dorigny**.

### 3. Internationale Zusammenarbeit

Die im Oktober durchgeführte geothermische Tagung in Erding/München hat gezeigt, dass ein Daten- und Erfahrungsaustausch im europäischen Raum dringend notwendig ist. Bei der Thematik (*Hot Dry Rock*) ist der Anschluss der Schweiz an das **JOULE II**-Programm der EG bereits gewährleistet.

### 4. Umsetzung

Die Erdwärmennutzung ist in der technischen Fachwelt, bei den Behörden und Energiekonsumenten immer noch relativ wenig bekannt. Die Information der Öffentlichkeit ist daher zu verstärken und die nötigen Fachleute sind auszubilden. Die Schweizerische Vereinigung für Geothermie führte im September 1992 eine gutbesuchte Tagung über Bau und Betrieb von Erdwärmesonden durch und gibt zweimal jährlich ein breitgestreutes Bulletin heraus.

### 5. Perspektiven für 1993

Nach mehrjährigen geologischen Vorarbeiten werden 1993 die Geothermiebohrungen **Genf** und **Saillon** abgeteuft, welchen sowohl eine Risikodeckung als auch ein Förderbeitrag zugesprochen wurden. Sie werden bundesseitig von speziellen Expertengruppen begleitet. Daneben werden gemäss den Prioritäten die Forschungs- und Förderprogramme in **Geothermie** und **Speicherung** abgewickelt, wobei eine klare Abgrenzung der Zuständigkeiten notwendig ist.

### 6. Liste der Veröffentlichungen

- [1] *Förderprogramm "Geothermie 2000"*, H.L. Gorhan, EWI, Zürich, Bundesamt für Energiewirtschaft
- [2] *Förderprogramm "Promostock"*, J.-C. Hadorn, Lausanne, Bundesamt für Energiewirtschaft

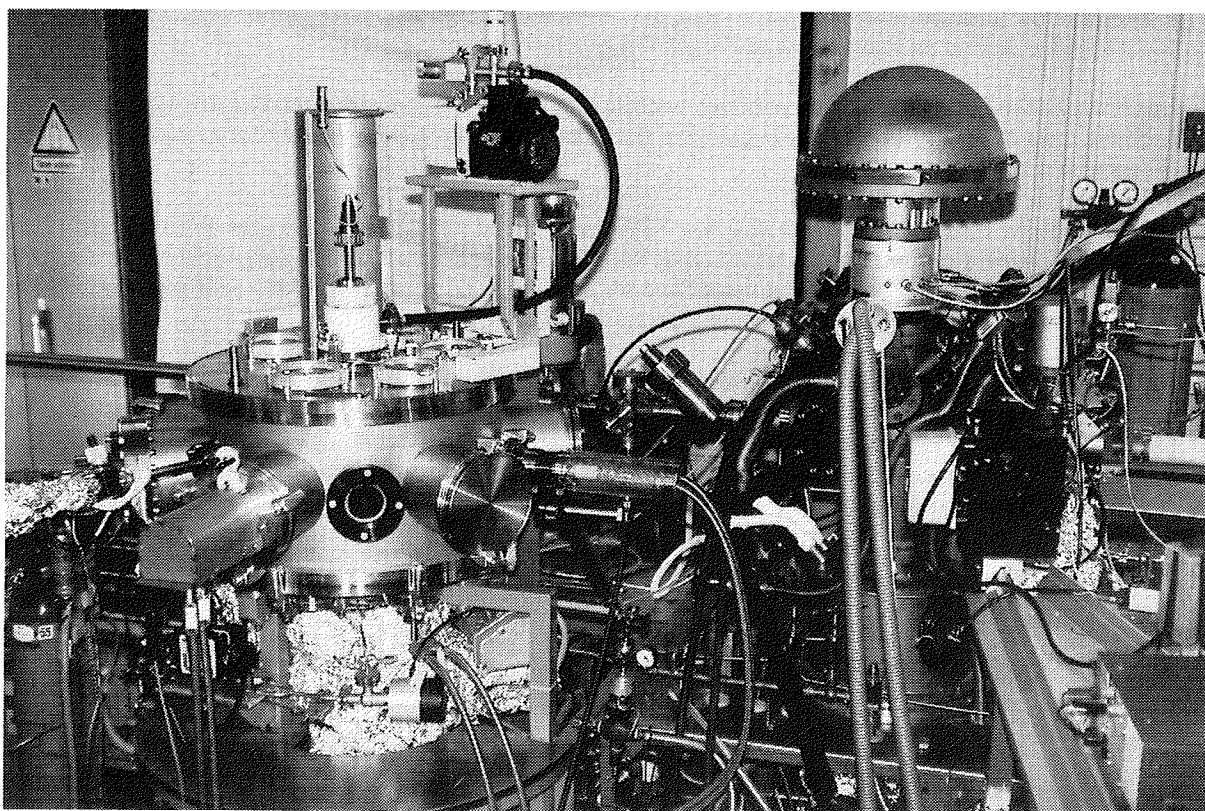


# KONTROLLIERTE KERNFUSION

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1991

Programmleiter: Paul-E. Zinsli

---



## Wandbeschichtungsmaterialien für Fusionreaktor

Plasmakammer (*links* im Bild) zur Herstellung und Untersuchung von Tokamak-Wandbeschichtungsmaterialien am Institut für Physik der Universität Basel. Die Schichtanalyse erfolgt durch die direkt angekoppelte Photoelektronenspektroskopie (ESCA, *rechts* im Bild)

## 1. Übersicht

Die **Fusionsforschung** wird weiterhin und verstärkt in wenigen grossen, zunehmend weltweit koordinierten internationalen Zusammenarbeitsprogrammen durchgeführt. Das Schwergewicht dieser weltumspannenden Zusammenarbeit liegt heute auf dem Programm **ITER EDA** (*International Thermonuclear Experimental Reactor - Engineering Design Phase*), einer Zusammenarbeit zwischen Europa, Japan, USA und Russland, in welcher die Schweiz über ihre Beteiligung am EG-Fusionsprogramm teilnimmt.

Der Vertrag zum ITER-EDA, einer sechsjährigen Forschungs- Entwicklungs- und Planungsphase, an deren Ende die detaillierten Unterlagen für den Bau dieser experimentellen Anlage vorliegen sollen, wurde im Juli 1992 unterzeichnet. Diese Zusammenarbeit in drei sogenannten Ko-Zentren in Garching bei München, San Diego und Naka in Japan konnte damit konkret beginnen. Die internationalen Teams werden nun zusammengestellt; Europa wird ca. 50 Fachleute in das *Joint Central Team* entsenden. Die führende Rolle der europäischen Fusionsforschung wurde durch die Wahl vom bisherigen Direktor des *Joint European Torus JET* in Culham, zum ITER-Direktor unterstrichen.

Im Rahmen ITER werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf die Partner verteilt. Jeder Partner soll jedoch über die gesamte Information verfügen, um - falls notwendig - in eigener Verantwortung eine dem ITER entsprechende Anlage im Rahmen seines Programms erstellen zu können.

Das europäische Fusionsprogramm wird nun noch stärker auf die ITER-Aktivitäten ausgerichtet werden, wobei auch die Industrie - im Rahmen der begrenzten finanziellen Möglichkeiten des EG-Programms - noch stärker einbezogen wird.

Die europäische Flaggschiff-Anlage **JET** war 1992 weitgehend auf den umfassenden Weiterausbau für die nächste Experimentier-Phase, der letzten Etappe vor dem Tritiumbetrieb 1995/96, ausgerichtet. Für diese Phase wird im Reaktortorus selbst ein gepumpter Divertor eingebaut. Dies erfordert einen sehr grossen Umbau der Anlage mit einer Stilllegung von JET während ca. 1,5 Jahren bis Ende 1993.

Die **schweizerischen Arbeiten** sind weiterhin voll in das europäische Programm integriert und leiden mit ihm unter den einschneidenden Budgetrestriktionen in den EG-Programmmitteln für die Fusionsforschung. Diese Restriktionen hatten 1992 eine Reduktion der EG-Beitragssätze an die nationalen Forschungsprogramme der Assoziationen zur Folge, welche in der Schweiz insbesondere durch Anstrengungen innerhalb des Schulratbereichs ausgeglichen werden mussten.

## 2. Forschungsarbeiten in der Schweiz

Die Arbeiten in der Schweiz konzentrierten sich noch stärker als bisher auf das CRPP / ETH-Lausanne, unterstützt im Bereich der Beschichtungen der Reaktor-Innenwand durch das Institut für Physik der Universität Basel, während die Technologieaktivitäten des Paul Scherrer Instituts (PSI) in Villigen zurückgingen.

Die Finanzierung dieser Forschungsarbeiten erfolgte zum überwiegenden Teil aus Institutskrediten und dem Rückfluss der Mittel, welche die Schweiz im Rahmen des Assoziationsvertrags über kontrollierten Kernfusion und Plasmaphysik an EURATOM zahlt, sowie aus Mitteln des Schweiz. Nationalfonds.

Das **Fusionsforschungsprogramm** BBW/BEW unterstützt punktuell ergänzende Arbeiten. Am CRPP stand das Jahr im Zeichen des Aufbaus des **neuen Tokamaks TCV** (*Tokamak à configuration variable*), der mit Vorzugsunterstützung durch EURATOM aufgebaut und in November 1992 eingeweiht wurde. Im Jahr 1993 sind hier die ersten Resultate zu erwarten. Zur vollen Nutzung notwendig ist nun der Einbau einer Plasma-Zusatzheizung (*Electron Cyclotron Resonance Heating*), für welche die Vorarbeiten weitgehend abgeschlossen sind. Auch für sie ist bei EG Vorzugsunterstützung beantragt worden. Die Entwicklung eines quasi-optischen Gyrotrons liegt

auf der Linie einer Weiterentwicklung dieser Heizmethode. Für die weiteren Arbeiten des CRPP verweisen wir auf dessen Jahresbericht.

An der Universität Basel wurden die Arbeiten zur Verbesserung der **Eigenschaften der Reaktorinnenwand** eines Fusionsreaktors weitergeführt. Es geht insbesondere darum, die Strahlungsverluste, die durch Freisetzung von Material aus der Innenwand bei Wechselwirkung mit dem Plasma entstehen, zu minimieren, was durch Materialien niedriger Kernladungszahl geschehen kann. Diese Arbeiten werden auch als schweizerischer Beitrag in die IEA-Zusammenarbeit TEXTOR, einer Fusionsanlage in der KfA Jülich, in der die Plasma-Wand-Wechselwirkung studiert wird, eingebracht.

Am PSI wurden einerseits, wegen der Auslastung des Beschleunigers durch andere Anwendungen in einem geringeren Ausmass als vorgesehen, Materialproben auf **Bestrahlungseffekte** hin untersucht und andererseits die **Supraleiter-Testanlage SULTAN III** fertiggestellt. SULTAN ist heute eine für das europäische Fusionsprogramm einzigartige Anlage zum Test von Supraleitern unter höchsten Feldern, welche bereits 1992 von französischer Seite genutzt wurde.

### 3. Ziele und Ergebnisse der direkt finanzierten Projekte

#### **HERSTELLUNG UND CHARAKTERISIERUNG DÜNNER SCHICHTEN UND ANDERER MATERIALIEN FÜR FUSIONSREAKTOREN**

Die Universität Basel führte Arbeiten im Bereich der Bor-Kohlenstoff-Schichten, neuartiger Siliziumkarbid-Schichten und heute in völliges Neuland vorstossender Lithiumkarbid-Schichten durch. Die Schichten wurden unter verschiedenen Bedingungen und mit unterschiedlichen Methoden hergestellt und im Detail untersucht. Diese Detailuntersuchungen zur Struktur und zum Aufbau der Schichten sollen ihre Eignung für die effektive Anwendung, vorerst im Labor und dann in Forschungsanlagen wie TEXTOR oder TCV prüfen. Während die Bor-Kohlenstoff-Beschichtung nun eine weltweit etablierte Methode ist, wurden die Siliziumkarbid-Schichten erstmals im TEXTOR-Innern mit einigen günstigen Resultaten für die Plasma-Parameter abgeschieden, während die Anwendung von Lithiumkarbid noch im Stadium der Grundlagenstudien steht. Diese Arbeiten werden weitergeführt.

#### **CONSTRUCTION DE GYROTRONS DE HAUTE PUISSANCE DESTINÉS AU CHAUFFAGE DES PLASMAS THERMONUCLÉAIRES**

Der erste Teil dieser Arbeiten wurde im Juli 1992 abgeschlossen. Es ging um eine Verbesserung der Methoden zur Überwachung der Qualität des Elektronenstrahls, welche für den Betrieb eines Gyrotrons entscheidend ist. Drei Methoden wurden weiterentwickelt, nachdem sich die Methode der Thomson-Streuung als ungeeignet erwiesen hatte. Parallel dazu wurde die Dämpfung der verschiedenen Moden, die im Gyrotron angeregt werden, untersucht. Das Ziel ist es, die volle Leistung des Gyrotrons in einem oder mehreren für die Plasmaheizung geeigneten Moden zu konzentrieren.

Diese Arbeiten werden in einer nächsten Projektphase weitergeführt.

#### **SULTAN III**

Der Vertrag mit dem EURATOM - Fusionstechnologieprogramm, Bereich Magnete, erlaubte dem PSI die Anschaffung von zwei Magnetspulen (9 und 12 TESLA) zur Fertigstellung der SULTAN III -Anlage. Die Anlage konnte Ende Mai 1992 endgültig gekühlt und Mitte Juni bei Feldstärken von über 12 TESLA an den Spulen in Betrieb genommen werden. Die ersten Messungen an NET - Leitern aus NbTi voller Grösse, welche von CEA-Cadarache geliefert wurden, konnten im Juni beginnen. Weitere Tests sind in Vorbereitung. Das BBW / BEW - Projekt ist abgeschlossen.

## 4. Geplante Arbeiten 1993

Die experimentellen Untersuchungen am TCV werden 1993 aufgenommen. Gleichzeitig soll die Zusatzheizung in den nächsten 4 Jahren schrittweise aufgebaut werden. Parallel dazu wird eine breite Palette von Forschungsarbeiten durchgeführt. Für das BBW / BEW - Programm gehen die Arbeiten in der Entwicklung eines quasi-optischen Gyrotrons weiter.

Am PSI werden sowohl die Anlage PIREX wie SULTAN für weitere Experimente im Rahmen des EURATOM-Programms genutzt. Ein grösserer Weiterausbau ist gegenwärtig nicht vorgesehen. Offen ist, ob die Gesamtleitung auch im Fusionstechnologiebereich an das CRPP übergeht.

Die Universität Basel wird die aufgenommenen Arbeiten weiterführen.

## 5. Liste der Projekte

- [1] P. Oelhafen, Uni - Basel: *Herstellung und Charakterisierung dünner Schichten und anderer Materialien für Fusionsreaktoren.* (JB)
- [2] M.Q. Tran, F. Troyon, CRPP / EPF - Lausanne: *Construction de gyrotrons de haute puissance destinés au chauffage des plasmas thermonucléaires.* (SB)
- [3] G. Vecsey, PSI - Villigen: *SULTAN III* (EURATOM-Fusionstechnologieprogramm / Bereich Magnete). (JB, SB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden

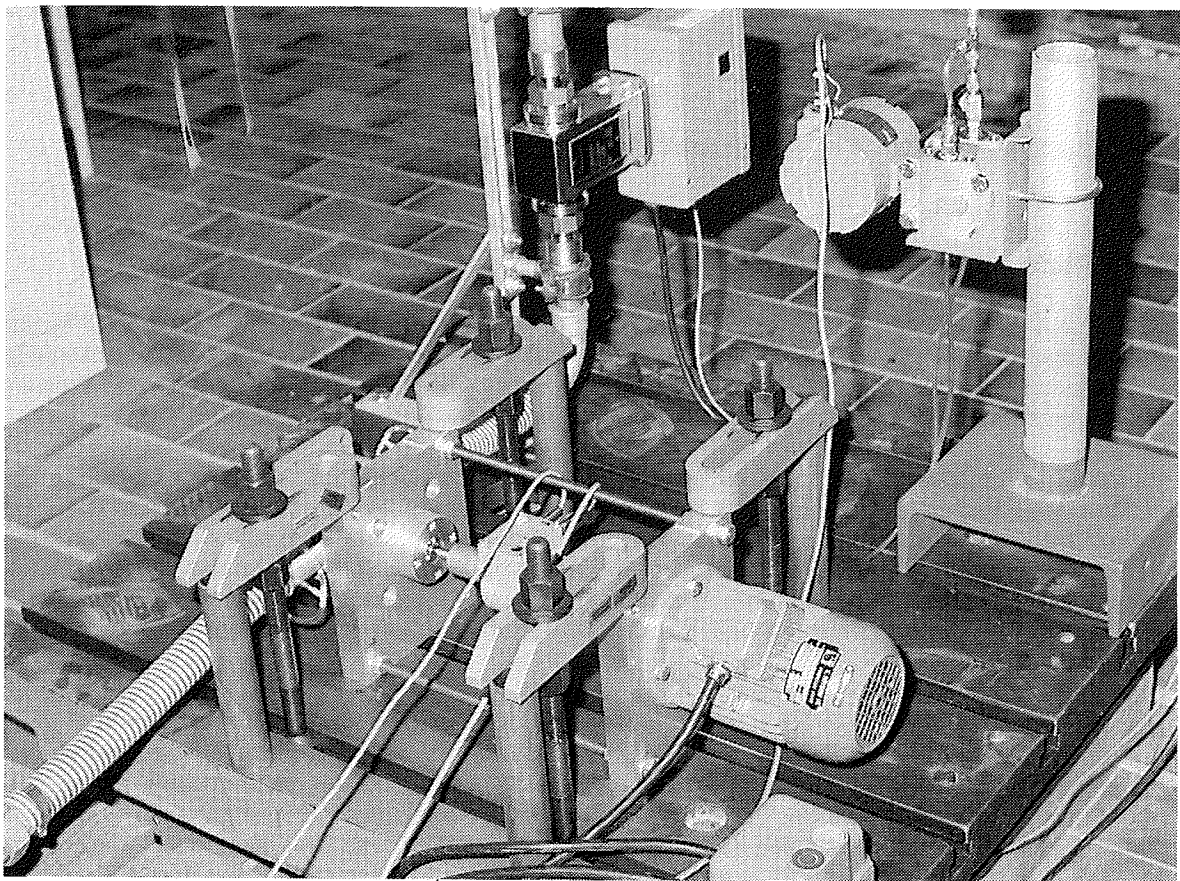


# ELEKTRIZITÄT

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Roland Brüniger

---



## Umwälzpumpen auf dem Prüfstand

Mit dem Prüfstand der ETH-Zürich zur Messung der hydraulischen Leistung von Kleinpumpen werden der Durchfluss (magnetisch-induktiv), der Förderdruck (kapazitiv), das Drehmoment (DMS-Messwelle) und die Drehzahl (induktiv) bestimmt.

## 1. Programmübersicht und anvisierte Ziele für 1992

Das Forschungsprogramm **Elektrizität** befasst sich mit der Erzeugung, Speicherung, Übertragung, Verteilung und rationellen Nutzung von elektrischer Energie, sowie mit Projekten von interdisziplinärem Charakter wie z.B. die Bewertung der Gesundheitsgefährdung durch starke elektromagnetische Quellen. Die Aktivitäten sollen dazu beitragen, dass die Wasserkraftnutzung erhöht wird, dass durch diverse Speichertechnologien und optimierte Verteilnetze die nachgefragte Energie effizient und in befriedigender Qualität beim Verbraucher angeboten werden kann und dass schlussendlich die kostbare elektrische Energie möglichst rationell verwendet wird.

Die wesentlichen Bestrebungen für das Jahr 1992 bestanden, neben dem Betreuen der laufenden Projekte, in die Abklärung der Interessen, in den Gebieten Thermoionik / Thermoelektrik und effizienter Einsatz von elektrischen Antrieben, in der Umsetzung von Erkenntnissen aus dem *Stand by*-Projekt, sowie in der Definition von Arbeiten in den Bereichen *Demand Side Management* und Supraleitertechnologie.

Bedingt durch den interdisziplinären Charakter des Programms sowie durch die Tatsache, dass zur Zeit andere Programme in dem Gebiet laufen (ENERGIE 2000, DIANE, RAVEL, BEW - Förderungsprogramme, etc.), bestand auch die Aufgabe der Koordination und Abstimmung der Aktivitäten.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1992

### ELEKTRIZITÄTS - ERZEUGUNG

Eine wesentliche Aufgabe im Bereich **Kleinwasserkraftwerke** besteht zur Zeit in der Erneuerung und Reaktivierung bestehender Anlagen und den damit verbundenen verfahrens- und genehmigungstechnischen, ökologischen und ökonomischen Problemstellungen. Genau diese Thematik ist ein Hauptgegenstand des DIANE-Programms, weshalb eine enge Zusammenarbeit mit der DIANE-Programtleitung etabliert wurde.

An den schweizerischen Hochschulen werden verschiedene Projekte durchgeführt, welche die Grundlage für eine **Optimierung** (Ausbau / Renovation) bestehender **Wasserkraftwerke** bilden. So werden in einem Projekt noch offene Fragen der akustischen Durchflussmessung genauer untersucht. Damit soll eine exakte Bestimmung der Primärenergie ermöglicht werden. Ferner werden Arbeiten durchgeführt, welche eine Übersicht über den heutigen Wissensstand von Saugrohren bei Flusskraftwerken vermitteln. Saugrohre, Turbine und deren gegenseitiges Abstimmen können nämlich wesentliches zur Leistungssteigerung von Niederdruckanlagen beitragen.

Erneuerbare Energien stellen in der Schweiz ein förderungswürdiges Potential zur Erzeugung von elektrischer Energie dar. Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Ingenieurschule Wallis wird eine **neue Umrichter-technologie** für erneuerbare Energiequellen am Beispiel von Kleinwasserkraftwerken genauer untersucht. Im Mittelpunkt des Projekts stehen Umrichter und Regelung, die in einem grossen Eingangsspannungsbereich einen hohen Wirkungsgrad aufweisen und kostengünstig sein sollen. Der neue Umrichter kann beim Ersatz von Druckreduzierventilen in Trinkwasserversorgungen durch ein Trinkwasserkraftwerk sowie bei kleinen Wasserkraftwerken mit hohen Durchflussschwankungen Vorteile, resp. Wirkungsgradverbesserungen bringen. Parallel dazu wird der Einsatz des Umrichters bei einer Photovoltaik- und einer Windanlage untersucht.

Im Anschluss an eine Literaturstudie über das Gebiet **Thermoelektrik und Thermionik** wurde Ende letzten Jahres gesamtschweizerisch eine Interessensabklärung bei über 60 Adressaten (Forschungsinstitute und Industrien) gestartet. Die Auswertung dieser Umfrage ergab, dass, obwohl von verschiedenen Seiten ein grundsätzliches Interesse an der Thematik bekundet wurde, diese Technologien noch vor zahlreichen ungelösten Problemen stehen. Diese könnten nur mittels intensiver und umfangreicher Grundlagenforschungen angegangen werden. Als wesentliche Kernpunkte werden ungelöste Materialprobleme und der zum heutigen Zeitpunkt äusserst schlechte Wirkungsgrade genannt. Ferner werden auf die teilweise intensiven, diesbezüglichen Forschungsanstrengungen im Ausland ohne greifbare Erfolge hingewiesen. Die Umfrage hat ferner ergeben, dass man diesen Technologien mehrheitlich keine allzugrossen Zukunftschancen bei terrestrischen Anwendungen einräumt. Schliesslich hat sich

auch gezeigt, dass in der Schweiz auf diesem Gebiet zur Zeit praktisch keine Forschungsanstrengungen unternommen werden und in naher Zukunft auch keine vorgesehen sind. Der Projektvorschlag, ein **netzunabhängiges, programmierbares, thermoelektrisches Heizkörperventil** zu realisieren, wird allenfalls in einer Studie auf die technische Machbarkeit überprüft. Die weitere, weltweite Entwicklung wird im Auge behalten. Generell werden hingegen aufgrund der Umfrage zur Zeit keine grösseren, diesbezüglichen Aktivitäten gefördert.

## **ELEKTRIZITÄTS - SPEICHERUNG**

Weltweit laufen verschiedene Aktivitäten zur Untersuchung der Supraleitertechnologie als mögliches Speichermedium für die Spitzenlastversorgung. Auch in der Schweiz wurde anfangs 1992 ein durch das PSI und die ABB gemeinsam vorgeschlagenes Projekt mit dem Ziel begonnen, eine Demonstrationsanlage für einen **supraleitenden magnetischen Energiespeicher (SMES)** zu realisieren. Aus verschiedenen Gründen, unter anderem auch weil eine aussagekräftige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung fehlte, wurde das Projekt kurze Zeit später angepasst [1]. Exemplarisch wurde vorerst aufgrund einer Stichleitung im SBB-Netz mittels einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die grundsätzliche "kommerzielle Konkurrenzfähigkeit" gegenüber alternativen Lösungen überprüft. Berechnungen zeigten, dass durch ein SMES die Sicherstellung der geforderten Wirk- und Blindleistung auf dem betrachteten Streckenabschnitt gewährt werden kann. Dem gegenübergestellt wurden verschiedene andere technische Lösungen (vollstatischer Frequenzumformer, Übertragungsleitung zum Einspeisepunkt inkl. Unterwerk, Kabel zum Einspeisepunkt inkl. Unterwerk, Diesel- oder Gasmotorkraftwerk, Gasturbinenkraftwerk), die alle ebenfalls davon ausgehen, dass am oberen Ende der betrachteten Stichleitung ein zusätzlicher Einspeisepunkt zur Bereitstellung der geforderten Wirk- und Blindleistung in den Fahrdrat realisiert wird.

Die Berechnungen haben zwar gezeigt, dass für den betrachteten Fall der vollstatische Frequenzumformer die wirtschaftlichste Lösung darstellt. Es war hingegen interessant festzustellen, dass die Freileitung mit Unterwerk etwa vergleichbare Kosten wie die SMES-Lösung verursacht. Die Diesel-, Gasmotoren- und Gasturbinenkraftwerke erwiesen sich als günstiger. Aufgrund der hohen zu erwartenden Investitionskosten für ein SMES ist man zum Schluss gekommen, dass in absehbarer Zeit kein wirtschaftlicher Einsatz möglich sein wird. Da damit die Marktbedürfnisse zumindest momentan nicht ausgewiesen werden konnten, wurde auf eine Fortführung des Projekts verzichtet.

Die befristete **Lebensdauer der Bleibatterien** stellt einen wesentlichen Grund für die hohen Wartungs- und Unterhaltskosten bei Elektrofahrzeugen dar. In einem neu gestarteten Forschungsprojekt wird versucht, mittels einem neuartigen Ladeverfahren die Lebensdauer von Bleibatterien wesentlich zu verlängern.

## **ELEKTRIZITÄTS - ÜBERTRAGUNG & - VERTEILUNG**

Das Forschungsprojekt **Führung des Verteilnetzes und der Entwicklung eines Lastbestimmungsmodells** [2] soll den Elektrizitätsgesellschaften ein Modell zu Planungszwecken und für Aufgaben der Netzbetriebsführung im Verteilnetz liefern. Das Lastbestimmungsmodell ersetzt dabei die im Verteilnetz aus Kostengründen nicht durchführbaren Messungen der Lasten an den einzelnen Transformatoren.

Basierend auf der im letzten Jahr erarbeiteten Wissenserweiterung über die Gegebenheiten im Verteilnetz, standen 1992 vertiefte Messungen (inkl. deren Auswertung) sowie die Weiterentwicklung des Lastbestimmungsmodells im Vordergrund. Der erste Modellansatz mit den Lastfaktoren und die Auswertung mit den realen Messdatensätzen zeigte auf, dass eine vertiefte Analyse der gemessenen Lastverläufe notwendig ist. Im speziellen sind dabei die Filterung von Einflussgrössen wie Rundsteuerung der Boiler und Heizungen, der Einfluss der Jahreszeiten, der Einfluss des Wetters und die Kochgewohnheiten der Bevölkerung zu erwähnen. Das erweiterte Wissen bezüglich dem Lastverhalten bei Filterung der Einflussgrössen führte zum Ansatz, dass die deterministisch bestimmbaren Einflussgrössen aus den Tagesverläufen herauszufiltern sind und eine Grundkurve übrig bleibt, die einen allgemeingültigen Charakter für die Verbraucherkategorien Haushalt, Gewerbe und Industrie aufweist. Diese auf zwei Arten gefundene Grundkurve stellt die Basis für das Lastbestimmungsmodell dar. Im Moment liegen allgemein gültige Grundkurven für Haushaltslasten vor, die überlagert mit den örtlich vorhandenen Einflussgrössen wie Rundsteuerung sowie den aktuellen jahreszeitlichen Verhältnissen zur Bestimmung der Tagesverlaufskurven des Verteiltransformators verwendet werden können. In einem nächsten Schritt wird versucht, die Grundkurven für die Klein- und Gewerbebetriebe zu erarbeiten.

## ELEKTRIZITÄTS - VERWENDUNG & RATIONELLE NUTZUNG

### a) Kraft / elektrische Motoren

Die Studienarbeit **Grundlagen für Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte bei elektrischen Antrieben** [3] konnte Ende Jahr abgeschlossen werden. Ebenfalls wurden die für dieses Projekt in Auftrag gegebenen Arbeiten zur **Aufbereitung von statistischem Datenmaterial** in der "antriebsintensiven" **Zementindustrie** [4] und **Textilindustrie** [5] beendet.

Aufgrund der Erkenntnisse lassen sich die folgenden strategischen Schwerpunkte ableiten:

- Entwicklung und Verbesserung von effizienten, billigen und einfach einsetzbaren Systemen zur Drehzahlregelung. Im Mittelpunkt steht der Integralmotor, bei dem die Steuerung mit Frequenzumrichter im Motor eingebaut ist.
- Einfach anwendbare Hilfsmittel, die den Anwender in der Auslegung des Antriebssystems im mittleren Leistungsbereich unterstützen (Auswahl von Motorentyp und Hersteller, Dimensionierung, Wahl der Methode zur Drehzahlregelung).

Aufbauend auf dieser Strategiewichtung sind nun in einem nächsten Schritt gemeinsam mit der beteiligten Industrie und mit den Hochschulen konkrete Projekte auszuarbeiten. Dazu ist vorgesehen, neben dem breiten Versand des Berichts, ein Fachseminar/Workshop mit den interessierten Kreisen zu organisieren.

Im Projekt **Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad** [6] wird angestrebt, gemeinsam mit der schweizerischen Industrie, den heutigen Gesamtwirkungsgrad von ca. 10% bei Kleinumwälzpumpen für Heizanlagen zu verdoppeln. In einem ersten Schritt wurden die Ursachen der schlechten Wirkungsgrade kleiner Spaltrohrpumpen analysiert. Durch Messungen und Berechnungen konnten die Energieflüsse quantitativ beschrieben und die Motoren-Parameter in einem Computermodell bearbeitet werden. Eine Auswertung von Pumpenkennlinien des Marktangebotes gab zudem Aufschlüsse bezüglich der Streuung des Wirkungsgrades ähnlicher Pumpen sowie Hinweise zu technischen Eigenschaften energetisch guter, resp. schlechter Pumpen. Ebenfalls wurden die hydraulischen Anforderungen an Kleinpumpen in modernen Heizanlagen analysiert und definiert. Als ein vielversprechender Weg zu besseren Gesamtwirkungsgraden werden aufgrund der Analysen die Entwicklungsmöglichkeiten von Synchron-, bzw. bürstenlosen Permanentmagnet-Motoren weiterbearbeitet.

Im Projekt *Alimentation électrique des Trolleybus, fonctionnement en parallèle des sous-stations, courants vagabonds, économie d'énergie* [7] wurde in Berechnungen nachgewiesen, dass die Verminderung des Spannungsabfalls durch parallele Einbindung der Unterstationen die Verluste wesentlich vermindert werden kann. Erste Versuche bei den Transportbetrieben in Fribourg haben dies bestätigt. Im folgenden wird versucht, die durch das parallele Anschalten der Unterstationen entstehenden "vagabundierenden Ströme" zu identifizieren und zu quantifizieren.

### b) Bürogeräte / Unterhaltungselektronikgeräte

Im Projekt **Energieverluste bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten** [8] wurden - neben einer Abschätzung der *Stand by*-Verluste mittels umfangreichen Marktabklärungen [9] sowie technische Untersuchungen - klare Aussagen über die technischen und bedienungsfreundlichen Möglichkeiten einer Verlustvermeidung oder Verlustverminderung erarbeitet. Der Schlussbericht mit einem ausführlichen separaten Anhang ist verfügbar. Er beinhaltet eine Vielzahl von Anregungen, Vorschläge und Ideen für die Reduzierung der Energieverluste. Zudem werden klare Aussagen bezüglich dem vermehrten Ein- und Ausschalten und den Auswirkungen auf die Lebensdauer von Geräten aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen [10], [11], [12], [13] gemacht.

Viele der formulierten Ideen und Umsetzungsansätze sind bereits im Verlaufe des Projekts an potenzielle Nutzer weitergegeben worden: das BEW konnte z.B. die PTT dafür gewinnen, im Rahmen von ENERGIE 2000 den Einsatz von Fax-Zusatzgeräten (Abschalten des Faxgerätes bei Nichtgebrauch) für PTT-eigene Geräte zu überprüfen, und falls möglich auch einzusetzen.

Um die laufenden Umsetzungsarbeiten sinnvoll zu koordinieren, und auch um die internationalen Anstrengungen in der Schweiz publik zu machen, ist beabsichtigt, im Frühling ein Diskussionsforum mit internationaler Beteiligung zu organisieren.

#### c) *Verbrauchserfassung*

In Fortsetzung des abgeschlossenen Projekts **Computerunterstützte Elektrizitätsverbrauchsanalyse** wurde ein breit angelegtes und von verschiedenen Energiefachstellen unterstütztes Projekt **Methodik der Elektrizitätssparanalyse** [14] gestartet. Es hat als Hauptziel die Erarbeitung einer klar strukturierten Methode für die Durchführung von Elektrizitätssparanalysen. Die Umsetzung der Methodik erfolgt durch universell einsetzbare Analyse- und Planungshilfsmittel auf PC-Basis. Für einfache Objekte soll die Methodik auch manuell ausgeführt werden können.

In Ergänzung dazu war ursprünglich beabsichtigt, eine neue Messmethode zu entwickeln, welche aufgrund von speziellen Netzzuständen (transiente Netzschwankungen, Oberwellen, Einschaltspitzen, Blindleistungen, etc.) Rückschlüsse auf die Verbrauchsstrukturen zulässt. Da leider bis zum heutigen Zeitpunkt kein Industriepartner gefunden werden konnte, wird die Idee im Moment nicht weiterverfolgt.

#### d) *Demand Side Management*

Der Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE) hat sich im Rahmen einer Arbeitsgruppe der Thematik **Demand Side Management (DSM)** angenommen und erste Grundsatzpapiere [17] dazu ausgearbeitet. Im Frühling 1993 ist vorgesehen, auf die in der Schweiz vorhandenen Hemmnisse für die praktische Umsetzung des DSM einzugehen und daraus konkrete Projekte abzuleiten. Gleichzeitig starten im Rahmen der Internationalen Energie-Agentur (IEA) verschiedene Aktivitäten. Eine schweizerische Beteiligung ist beabsichtigt.

Im Rahmen des ESPRIT EG-Forschungsprojekts **Integrated Domestic Energy Management** mit schweizerischer Beteiligung werden technische Schnittstellen und deren Funktionalität zwischen dem Elektrizitätsversorgungsunternehmen und dem Energiebezüger, im speziellen dem Haushaltbezüger, systematisch untersucht.

### INTERDISZIPLINÄRE PROJEKTE

#### a) *Leistungselektronik*

Leistungselektronische Systeme sind unabdingbar bei Erzeugung und Benutzung elektrischer Energie, ihrer Aufbereitung, Verteilung und Umwandlung. Eine Minimierung der Schaltverluste stellt dabei eine wichtige Forderung dar. Das am 1. Januar 1992 gestartete Schwerpunktprogramm LESIT des Schweizerischen Schulrats will einen entscheidenden Beitrag zur akademischen und industriellen Spitzenstellung der Schweiz auf dem Gebiet der Leistungselektronik ermöglichen. Es dürfte selbstverständlich sein, dass dabei der Verlustverminderung grosses Gewicht beigemessen wird. Über den aktuellen Stand der Arbeiten wurde anlässlich einer LESIT-Tagung im Dezember 1992 [18] informiert.

Im Rahmen des Projekts **Hocheffizienter Netzstromrichter in Hybrid-Struktur** [15] wurde ein Netzstromrichter untersucht, der aus zwei selbstgeführten U-Wechselrichtern besteht. Der Hauptstromrichter ist ein grosser, langsamgetakteter und der zweite ein kleinerer, schnellgetakteter Wechselrichter. Der kleine Stromrichter spielt dabei die Rolle eines Aktivfilters für die Stromverzerrungen des Hauptwechselrichters. Nach einer Dimensionierungsphase wurde das Konzept an zwei konkreten Anwendungsfällen auf seine Eignung hin untersucht, nämlich für das 500 kW-Solarkraftwerk "PHALK Mont Soleil" und für eine Umrichterlokomotive. Beim Solarkraftwerk zeigte sich, dass neben der Verbesserung des Netzstromspektrums zusätzlich ein leicht erhöhter Jahresenergieertrag erzielt werden kann, da im untersten Teillastbereich der Filterstromrichter noch betrieben werden kann. Bei der grossen Umrichterlokomotive können die Verluste in den netzseitigen Stromkreisen gesenkt werden und zwar in der Grössenordnung von 2-4% der Nennleistung der Lokomotive.

### **b) Supraleitertechnologie**

Im Energiebereich bietet die Supraleitertechnologie u.a. Anwendungen bei Motoren / Generatoren, Transformatoren, Kabel, Strombegrenzern. Der jeweilige Forschungsstand ist sehr unterschiedlich.

Im Zusammenhang mit der Entdeckung der Hochtemperatursupraleitung sind erneut viele Anwendungen vorgeschlagen worden. Um sich auf diesem Gebiet international auf dem laufenden zu halten, nimmt die Schweiz an den IEA-Aktivitäten *Assessing the Impacts of High Temperatur Superconductivity on the Electric Power Sector* [16] teil.

Neben einer grossen Anzahl von Grundlagen-Forschungsarbeiten sowie neben dem bereits erwähnten SMES-Projekt laufen in der Schweiz verschiedene Aktivitäten, welche die Supraleitung in der Energietechnik zu nutzen versuchen. So beschäftigt sich das Forschungszentrum Baden-Dättwil der ABB seit einigen Jahren mit der Erforschung eines **induktiven Strombegrenzers unter Verwendung von keramischen Hochtemperatur Supraleitern**. Auch die schweizerische Kabelindustrie unternimmt direkte und indirekte Anstrengungen, um auf dem Gebiet der Supraleiterkabel Grundlagenkenntnisse zu erlangen.

### **c) Elektromagnetische Felder**

Die weltweiten Aktivitäten auf dem Gebiet **Elektromagnetische Felder und deren Einfluss auf den menschlichen Körper** werden ständig verfolgt. Insbesondere in den Vereinigten Staaten laufen umfangreiche Forschungsanstrengungen. Neben vereinzeltten Arbeiten in der Schweiz ist besonders eine durch das BUWAL ins Leben gerufene Arbeitsgruppe zu erwähnen, welche sich dieser Thematik genauer angenommen hat. Im Frühling 1993 werden deren Ergebnisse in einem Bericht veröffentlicht.

## **3. Nationale und internationale Zusammenarbeit**

National wird generell angestrebt, die Industrie bei öffentlich finanzierten Forschungsvorhaben miteinzubeziehen. Zudem soll ein reger Erfahrungsaustausch zwischen der Industrie und den Forschungsanstalten erreicht werden.

International ist beabsichtigt, weiterhin an den IEA-Aktivitäten im **Hochtemperatursupraleitungsbereich** teilzunehmen. Ebenfalls wird - wie bereits erwähnt - eine Beteiligung an den IEA-Aktivitäten im Bereich *Demand Side Management* angestrebt.

Durch die Teilnahme des Programmleiters an der IEA-Konferenz *New Electricity 21* in Tokio konnten diverse Kontakte zu diversen Forschungsinstituten in Japan (*CRIEPI, TEPCO, The Tokyo Institute of Technology*, u.a.) geknüpft werden [19].

Schliesslich wurde die Teilnahme eines schweizerischen Vertreters an der Tagung *Energy Efficient Office Technologies* in den USA unterstützt. Damit konnte mit einem grossen internationalen Personenkreis Kontakt geknüpft und zudem ein reger Erfahrungsaustausch gepflegt werden [20].

## **4. Umsetzung der Ergebnisse, P & D - Projekte**

Der Umsetzung der Projektergebnisse in die Praxis wird spezielle Aufmerksamkeit geschenkt. Die Umsetzungsziele werden schon bei der Projektformulierung miteinbezogen und im Projektbescrieb soweit möglich festgehalten. Die projektspezifischen Umsetzungsaktivitäten sind in den vorgennanten Projektbeschreibungen bereits erwähnt worden.

Speziell zu bemerken sind die Unterstützungen im Bereich der Kleinwasserkraftwerks-Projekte (Pilot- und Demonstrationsanlagen) sowie der RAVEL-Aktivitäten (rationelle Elektrizitäts-Nutzung).

Schliesslich sind die verschiedenen Forschungsergebnisse der Projekte **Stand by-Verluste bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten** und **Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad** an diejenigen Stellen vermittelt worden, welche mit der Erarbeitung von Zielwerten und Deklarationsvorschriften im Rahmen des Energienutzungsbeschlusses beschäftigt sind.

## 5. Bewertung 1992 und Ausblick für 1993

Obwohl ursprünglich beabsichtigt war, im Bereich der **Fuzzy-Logic-Technik** verstärkt aktiv zu werden, wurde Mitte Jahr davon Abstand genommen. Ursprünglich war eigentlich vorgesehen, einen entsprechenden Workshop durchzuführen. Da aber in der Zwischenzeit eine eigentliche "Fuzzy-Logic-Euphorie" die Schweiz erfasst hat und bereits eine eindruckliche Anzahl Kurse und Workshops angeboten werden und zudem keine Forschungsprojekte konkretisiert werden konnten, wurde die Idee vorerst fallen gelassen. Die entsprechenden Aktivitäten werden aber weiterhin verfolgt.

Die Definition von Forschungsgebieten im Bereich **Supraleitertechnologie** konnte aus diversen Gründen nicht abgeschlossen werden. 1993 werden die diesbezüglichen Abklärungen weitergeführt. Ferner wird angestrebt, die Forschungsstossrichtung im Bereich **effizienter Einsatz von elektrischen Antrieben** endgültig zu definieren und davon ausgehend konkrete Projekte zu initiieren. Zudem sollen die Aktivitäten im Bereich **Demand Side Management** weitergeführt und verstärkt gesamtschweizerisch ausgerichtet werden. Schliesslich wird ein wesentlicher Teil der geplanten Aktivitäten weiterhin in Betreuen und fortführen der laufenden Projekte, sowie in der Sicherstellung des programmüberschreitenden Informationsflusses liegen.

## 6. Liste der Projekte

- [1] E. Halder, ABB, Baden: *Wirtschaftlichkeitsanalyse SMES*. (SB)
- [2] D. Brunner, ETH - Zürich & G. Schnyder, R. Wettlin, AMSTEIN + WALTHERT, Zürich: *Führung des Verteilnetzes und Lastbestimmungsmodell*. (JB)
- [3] A. Neyer, AMSTEIN + WALTHERT, Zürich: *Grundlagen für Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte bei elektrischen Antrieben*. (SB)
- [4] U. Fischli, TUFFLI & PARTNER, Glarus: *Aufbereitung von Datenmaterial bezüglich dem elektromotorischen Verbrauch in der Zementindustrie*. (SB)
- [5] W. Hässig, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Aufbereitung von Datenmaterial zur Erarbeitung des gesamtschweizerischen Einsparpotentials bezüglich dem elektromotorischen Verbrauch in der Textilindustrie*. (SB)
- [6] J. Nipkow, ARENA, Zürich: *Kleinumwälzpumpen mit hohem Wirkungsgrad*. (JB)
- [7] U. Cavalli, ELEC-ENGINEERING, Nyon: *Alimentation électrique des Trolleybus, fonctionnement en parallèle des sous-stations, courants vagabonds, économie d'énergie*. (JB)
- [8] U. Graune, H. Prechtel, EWI, Zürich: *Die heimlichen Stromfresser, Standbyverluste von Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten*. (SB)
- [9] B. Schaltegger, MEYER & SCHALTEGGER, St. Gallen: *Marktabklärung, Expertenbefragung von Büro- und Unterhaltungselektronikgeräte -Herstellern und -Importeuren*. (SB)
- [10] L. Miteff, A. Birolini, ETH - Zürich: *Stand by-Leistungsaufnahme-Reduzierung und ihre Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Videorekorders HR-FC*. (SB)

- [11] L. Miteff, A. Birolini, ETH - Zürich: *Stand by-Leistungsaufnahme-Reduzierung und ihre Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Telefaxgeräts Panafax UF-150.* (SB)
- [12] L. Miteff, A. Birolini, ETH - Zürich: *Auswirkung der Ein/Ausschalthäufigkeit auf die Zuverlässigkeit von PC-Monitoren.* (SB)
- [13] L. Miteff, A. Birolini, ETH - Zürich: *Senkung des Stand by-Leistungsverbrauchs eines Fotokopierers und daraus resultierende Konsequenzen für seine Zuverlässigkeit.* (SB)
- [14] J. Weilenmann, Hp. Eicher, EICHER & PAULI, Liestal: *Methodik der Elektrizitätssparanalysen.* (JB)
- [15] M. Meyer, ETH - Zürich: *Hocheffizienter Netzstromrichter in Hybrid-Struktur.* (SB)
- [16] G. Vescey, PSI - Villigen: *Assessing the Impacts of High Temperatur Superconductivity on the Electric Power Sector.* (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden  
 (SB) Schlussbericht vorhanden

## 7. Referenzen

- [17] *Das Konzept des Nachfrage-Managements und Analyse des Ist-Zustand* (1. und 2. Teilbericht der VSE Arbeitsgruppe DSM)
- [18] *LESIT-Informationstagung* vom 2.12.1992, (Foliensatz )
- [19] R. Brüniger, Ottenbach: *Reisebericht der Japanstudienreise* vom Mai 1992.
- [20] B. Aebischer, ETH - Zürich: *Ein kurzer Bericht über die Teilnahme an der Tagung.*

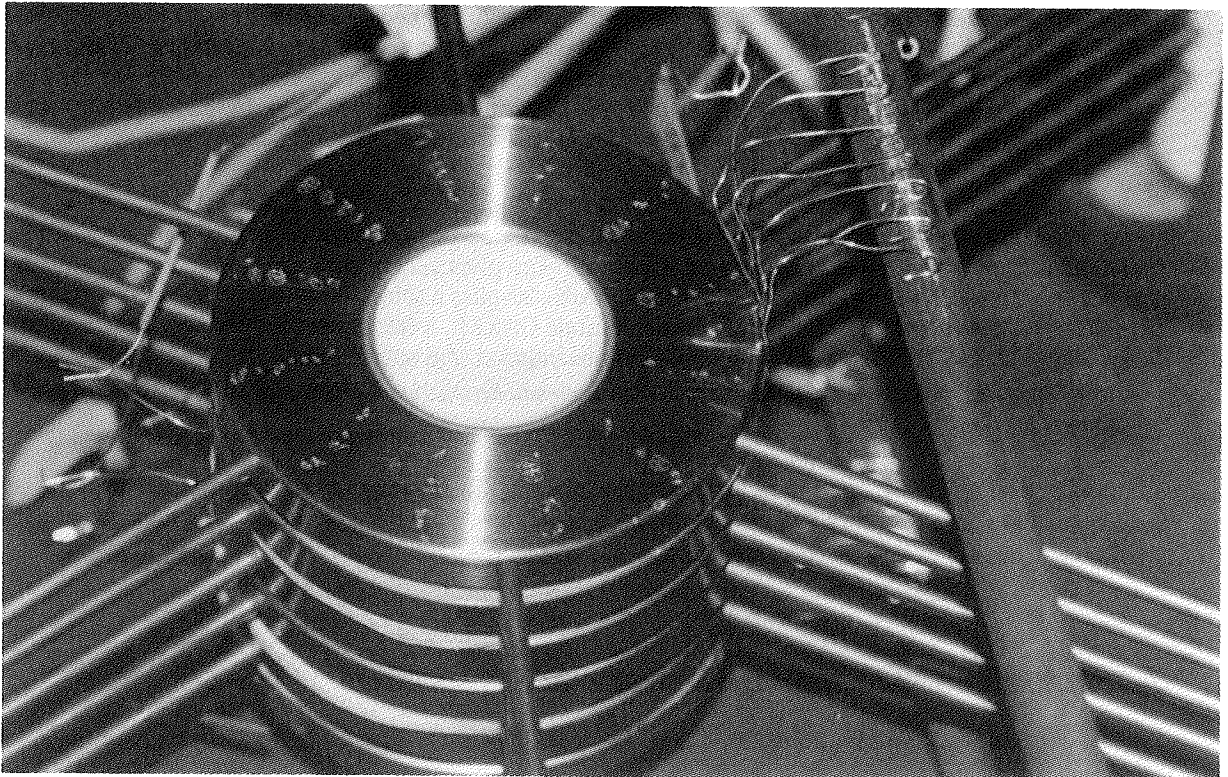


# PILES À COMBUSTIBLE

Rapport de synthèse  
sur les activités 1992 du programme de recherche

Chef de programme : Léo Dubal

---



## Pile à combustible sur banc d'essai

Le premier *stack* de la pile HEXIS (*Heat Exchanger Integrated Stack*) de SULZER-Innotec, à Winterthur, a produit 4 W pendant plus de 200 heures.

## 1. Introduction

Une pile à combustible fonctionne comme une pile électrique classique, si ce n'est que l'apport continu de gaz combustible et d'air empêche la pile de se décharger. Un élément de pile à combustible comporte deux électrodes poreuses, positive côté air et négative côté combustible gazeux, séparées par un électrolyte, conducteur ionique mais isolant électronique, étanche aux gaz. Le tout constitue une structure modulaire, dite *PEN*. L'empilement de *PEN* en batterie permet d'obtenir la tension d'utilisation souhaitée.

Le programme de recherche **Piles à combustible** a été lancé en 1988. Il vise la maîtrise de la conversion électrochimique - dépourvue d'émission de  $\text{NO}_x$  - du gaz naturel et, depuis juillet 1992, également du méthanol en électricité. Les applications sont, respectivement, les installations chaleur-force décentralisées et les véhicules électriques.

Pour l'utilisation du gaz naturel, le choix du matériel pour l'électrolyte s'est porté sur une membrane céramique, de la zircon stabilisée à l'oxyde d'yttrium. À partir de  $900^\circ\text{C}$ , cet oxyde réfractaire conduit les ions oxygène suffisamment bien. Cette température élevée a le grand avantage de produire des rejets de chaleur de haute qualité qui permettent, en particulier, le reformage in-situ du méthane.

Pour l'utilisation du méthanol (un combustible liquide qui se laisse reformer à plus basse température que le méthane et qui peut être distribué comme l'essence actuelle), l'électrolyte est une membrane polymère. La nécessité d'humidifier cette membrane de façon continue conduit à une opération à moins de  $100^\circ\text{C}$ , avec le désavantage qu'à ces températures, l'emploi de catalyseurs en métaux nobles est indispensable. Pourtant, si les performances des piles polymères alimentées directement en méthanol pouvaient être améliorées sans charge abusive de catalyseurs, on disposerait alors d'une alternative attrayante aux batteries très lourdes de l'électromobile. Bien que très théorique, une alternative au méthanol serait l'hydrogène cryogénique.

Le programme de projets Pilotes et Démonstration de la Confédération **Piles à combustible** a démarré cette année. Par l'introduction précoce de cette technologie, il vise l'acquisition de savoir-faire dans la gestion d'installations avancées chaleur-force au gaz naturel. Les piles céramiques avec reformage interne du gaz naturel n'étant pas encore disponibles sur le marché, seules les piles à acide phosphorique avec reformage externe se prêtent à la démonstration. Le premier projet, intitulé GAZEL, a été proposé par les Services industriels de Genève: une pile ONSI de  $0,2 \text{ MW}_{\text{el}}$  a été livrée mi-novembre et sera opérationnelle dès le début 1993. Le projet a pu bénéficier de l'expérience du CISE et de l'AEM (*Azienda Energetica Municipale*) de Milan qui dispose d'une installation de  $1,3 \text{ MW}$  [11].

Mentionnons ici qu'ATEL, dans le cadre de son programme d'installations de démonstration Niedergösgen, a fait l'acquisition de deux unités de piles polymères BALLARD de  $3,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ . Ces piles fonctionnent de manière satisfaisante, mais elles doivent être alimentées en hydrogène très pur.

## 2. Objectifs 1992, accomplissements & perspectives

Côté piles céramiques, il s'agissait en 1992:

- pour le projet **Modélisation & évaluation** que la Suisse avait lancé sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie, de mener jusqu'au bout la première phase de la collaboration internationale et d'organiser une seconde phase: *les rapports finaux des sept activités ont été édités ainsi que les proceedings du workshop 1992; le plan de travail de la phase II a été approuvé et la tâche d'Agent exécutif a pu être transférée à un de nos partenaires. La Suisse participera aux activités et conduira celle sur le développement d'outils pour le diagnostic des stacks.*

- pour le projet **HEXISTM** (*Heat EXchanger Integrated Stack*) de SULZER-Innotec, à Winterthur, de développer une solution pour le système d'interconnexion et des drains de courant permettant la mise en opération d'une batterie et de conforter la validité du concept: *un stack de 5 PEN de  $7 \text{ cm } \varnothing$  a fonctionné pendant plus de 200*

heures. La puissance spécifique moyenne du stack a été de 18% de celle d'une PEN testée individuellement; d'ici juin 1993, il s'agira donc de développer les alternatives aux drains de courants actuels et d'améliorer la distribution du gaz. Il est à relever ici que le concept HEXIS qui a été présenté à la Conférence Internationale sur les piles à combustible, en février 1992 à Makuhari, au Japon, s'est révélé être le seul innovatif.

- pour le projet **Réalisation de PEN HEXIS - compatibles**, de dépasser le seuil des 150 mW/cm<sup>2</sup>, à 900 °C. Bien que la puissance visée n'ait pas encore été atteinte, la compatibilité a pu être démontrée. Une PEN de calibration de petite dimension avec catalyseur de métaux nobles a fourni, elle, 500 mW/cm<sup>2</sup>. Ces résultats permettent d'attendre, pour fin 1993, des PEN "HEXIS-compatibles" donnant plus de 250 mW/cm<sup>2</sup>, pendant au moins 200 heures.

Côté piles polymères, suite au lancement tardif de la collaboration internationale sous l'égide de l'AIE, les projets viennent de commencer et les objectifs sont fixés pour l'été 1993. Il s'agit de développer :

- une **membrane par greffe radiative** - comme alternative "bon marché" aux membranes Nafion<sup>TM</sup> (DUPONT DE NEMOURS) et DOW - permettant d'obtenir 350 mW/cm<sup>2</sup> (avec H<sub>2</sub> /Air à 2-4 bar, T < 100°C) sur une PEN de 6 cm Ø et une structure performante pour la plaque bipolaire. Les performances actuelles: 175 mW/cm<sup>2</sup> (avec H<sub>2</sub>- O<sub>2</sub> 1 bar, T=60°C).

- une **anode à oxydation directe** en polypyrrole contenant < 250 µgr/cm<sup>2</sup> de métaux nobles, permettant d'obtenir (avec méthanol + eau / Air à 1 bar, T < 85°C) 50 mW/cm<sup>2</sup>. Les performances actuelles (avec 1 M méthanol): une électrode de graphite qui ne supporte un courant que de 100 nA/cm<sup>2</sup>, supporte après traitement 14 mA/cm<sup>2</sup>.

### 3. Mise en oeuvre et collaboration internationale

Dès le lancement du programme en avril 1988, une intense activité de recherche a pu être mise sur pied, au niveau national et international, grâce au dynamisme du groupe de travail, qui comprend les représentants des organisations concernées. Le projet HEXIS visant à la réalisation d'un modèle fonctionnel de pile au gaz naturel de 1 kW d'ici fin 1993, joue un rôle pilote: chaque activité se doit d'être "HEXIS-compatible" ou risque d'être interrompue (telle celle décrite sous 4.b).

Sous l'égide de l'Agence Internationale de l'Energie, AIE, la Suisse a lancé un projet de collaboration dans la recherche sur les piles céramiques qu'elle a conduit d'avril 1990 jusqu'à fin 1992. L'OFEN avait mandaté comme Agent exécutif un chercheur de l'EPF-Lausanne [1], qui a su, avec toute la diplomatie nécessaire, tirer parti du vaste potentiel de cette collaboration entre huit pays et la faire fructifier. Pour des raisons d'efficacité, la collaboration internationale s'est limitée jusqu'à présent à des activités de recherche à caractère générique. Malgré les difficultés, l'Agent exécutif est parvenu à éditer dans les délais les rapports finaux [15-18] des sept activités (SOFC Micromodelling, SOFC Data, Stack Design Tool, Recommended Practices for Electrical/Electrochemical Characterisation of SOFC Components & Cells, Mechanical/Thermomechanical Characterisation of SOFC Materials & Components, SOFC Powder Characterisation & SOFC Stack Evaluation) que comportait la Phase I de ce projet. Le relai, pour la Phase II, a été pris par l'Allemagne. Afin de faire bénéficier ce partenaire de son expérience, l'Agent exécutif a associé son successeur allemand à la préparation du 4ème workshop AIE sur les SOFC [14].

Dans le domaine des piles polymères, après trois ans de tergiversation, la collaboration internationale commence à fonctionner. Elle est d'autant plus importante que l'industrie suisse ne s'est pas encore engagée dans ce secteur et que l'activité en Suisse ne couvre que certains aspects: procédés de fabrication innovatifs pour la membrane et l'anode, structures pour les plaques bipolaires, modélisation des interfaces et techniques de caractérisation. Une coordination de la recherche sous l'égide de l'AIE est donc ici pratiquement indispensable.

## 4. Travaux effectués et résultats obtenus en 1992

### PILES CÉRAMIQUES

#### a) *Micromodélisation*

Le workshop AIE de cette année sur les piles céramiques a été axé sur le thème des "Barrières fondamentales aux performances des piles" [14]. Pour éviter le dépôt de carbone, il a été suggéré de développer une anode en céramique pour remplacer le cermet YSZ-nickel classique. Le laboratoire danois RISØ a réussi à fabriquer par voie humide (électrolyte coulé, électrodes peintes) et avec des produits standards des PEN de 10 cm<sup>2</sup> délivrant 900 mW/cm<sup>2</sup> à 1000°C. Il a cependant été précisé que seules deux collaboratrices parviennent à ce résultat, démontrant par là la complexité des conditions de fabrication. Les travaux exploratoires de l'EPFL [3] sur l'effet catalytique du manganèse ont montré quantitativement le rôle-clé joué par la zone d'interface de quelques micromètres entre électrode et électrolyte. Pour obtenir dans cette zone un contact intime, une attaque contrôlée à l'acide fluorhydrique (HF) s'est révélée essentielle. Ces travaux devraient être poursuivis en 1993 dans la perspective de fabriquer des PEN HEXIS-compatibles à haut rendement à partir d'électrolytes pré-frittés. Notons que les techniques de caractérisation et de préparation des surfaces développées dans le cadre du travail de thèse sur la modélisation expérimentale de la réduction de l'oxygène à l'interface d'une cathode et d'un électrolyte céramique ont été le catalyseur de ces développements. À Zürich, à l'EPFZ, la ségrégation des impuretés en phase vitreuse a été étudiée. Elle met en lumière l'importance que peut revêtir la morsure à l'HF de l'électrolyte avant l'application des électrodes.

#### b) *Modélisation numérique*

Les résultats de l'activité de modélisation numérique visant à développer un outil de travail pour les *stack designers* ont été consignés dans le rapport final [18]. L'effort nécessaire pour qu'un tel outil puisse aller au devant des besoins du projet HEXIS apparaît cependant disproportionné avec les avantages escomptés. Nos engagements internationaux ayant été remplis, nous avons donc mis fin à ces activités.

#### c) *Projet HEXIS*

Les progrès du projet HEXIS enregistrés jusqu'ici sont très encourageants [5, 12] et conforte l'objectif de SULZER-Innotec de réaliser d'ici fin 1993 un modèle fonctionnel de 1 kW. Non seulement des solutions de type "classiques" ont été trouvées pour faire face aux *milestones* fixés, mais encore des options innovatrices ont déjà été explorées pour le développement de drains de courant aussi bien du côté anode que cathode, qu'il s'agira dans la première moitié 1993 de tenter de mener à maturité. Fin 1992, un *stack* à cinq étages (voir page de titre) a pu être construit et a fonctionné pendant plus de 200 heures avec des PEN fournies par CERAMATEC, à Salt Lake City (USA). Les *Recommended practices* pour l'évaluation de la performance des *stacks* [17] se sont montrées très utiles. Les cinq PEN du *stack* n'ont certes fourni qu'une puissance équivalente à celle d'une seule PEN testée individuellement. Le saut qualitatif est ailleurs: la tension d'utilisation, résultant du montage en série, a largement suffi à l'entraînement d'un *CD-player* ! Malgré la faible puissance délivrée au cours de cette première expérience, le fait même que celle-ci ait pu avoir lieu démontre, à notre avis, le bien-fondé de l'"approche système" poursuivie par SULZER-Innotec. L'analyse détaillée de cette expérience a permis d'identifier les domaines où l'effort de recherche doit être porté : le système d'interconnexion des PEN et le choix de l'emplacement de l'arrivée du gaz, pour éviter que des défauts d'étanchéité ne produisent des points chauds à proximité de céramiques fonctionnelles. Dans ces conditions, il convenait de reporter à l'année prochaine la construction prévue pour 1992 d'un *stack* de cinq PEN de 12 cm Ø. En effet, lors des tests individuels, les PEN de grand diamètre fournies par CERAMATEC ont donné entière satisfaction.

#### d) *Procédés de fabrication*

##### ◦ *Coulage de bande*

Le travail de thèse sur les cathodes à conduction mixte à l'EPF-Zürich a abouti à la mise au point d'une couche double (10µm: 70m% InO<sub>1,5</sub>-ZrO<sub>2</sub> et 35µm 90m%InO<sub>1,5</sub>-ZrO<sub>2</sub>) à bonne adhérence sur l'électrolyte zircone

(avec impression d'une rugosité à l'état "vert" et morsure à l'HF à l'état fritté) et bonne conductivité électronique et ionique. Il reste à compléter la PEN d'une anode pour tester ses performances.

À l'EMPA-Dübendorf, des premiers essais de frittage de bandes vertes en forme de disque HEXIS-compatible ont été couronnés de succès. Cette production permettra de disposer d'un nombre d'échantillons suffisant pour leur caractérisation thermo-mécanique.

◦ *Projection sous vide au chalumeau à plasma (VPS, Vacuum Plasma Spray)*

A l'aide du procédé VPS, MEDICOAT, à Niederrohrdorf, est parvenue [7] à réaliser des PEN autoportantes "HEXIS-compatibles", dont une a été testée sur le banc d'essai chez SULZER-Innotec. Ces PEN sont fabriquées à partir d'un disque de feutre métallique découpé au laser qui est recouvert par VPS d'électrodes et de collecteurs de courant et électrolyte, sans interruption du vide. Les tests sur le banc d'essai de l'EPFL d'échantillons de PEN VPS, de 3cm Ø fabriqués à partir d'une poudre de zircon standard ont des performances électrochimiques qui plafonnent à 95 mW/cm<sup>2</sup> [2]. L'EMPA a mis en évidence que les impuretés, par leur distribution dans la couche d'électrolyte présentaient un "risque" aussi bien au niveau structurel qu'électrochimique[8]. Des essais avec une poudre de plus haute pureté sont en cours pour augmenter la puissance obtenue et ralentir la dégradation.

◦ *Cathode par évaporation cathodique (EBE, Electron Beam Evaporation)*

BATTELLE-Genève, sur la base du savoir-faire acquis il y a une quinzaine d'années en matière de cathode, tente de réaliser par EBE des dépôts de couches catalytiques et de cathode à conduction mixte de (In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>0.96</sub>(SnO<sub>2</sub>)<sub>0.04</sub> sur des électrolytes commerciaux pré-frittés. L'objectif minimum de 200 mW/cm<sup>2</sup> (à 900°C, avec anode de platine) a pu être atteint, en l'absence de couches catalytiques, avec une cathode de 10 à 70 µm d'épaisseur de structure dendritique de faible résistivité électronique (10<sup>-2</sup> Ω.cm à température ambiante). La comparaison entre trois couches catalytiques différentes est prévue.

e) *Caractérisation électrochimique des structures PEN*

Les deux bancs d'essai de l'EPFL [2], ont permis - tout en exerçant les *Recommended practices* pour l'évaluation électrochimique des piles [17] - de caractériser les performances électrochimiques de nombreux échantillons. Pour conforter la validité des méthodes de mesures, une PEN à haute puissance spécifique - 500 mW/cm<sup>2</sup> à 920°C - a été réalisée à l'aide de métaux nobles, comme référence. Autour de 900°C, la puissance maximum fournie varie de 0,5% par degré K, ce qui souligne l'importance de la mesure précise de la température pour caractériser une PEN. Notons encore qu'une PEN avec une cathode classique à partir d'un *slurry* LSM (La,SrMnO<sub>3</sub>), un électrolyte commercial (de résistivité élevée: 80 Ω.cm), et une anode de nickel, a atteint, sans dégradation pendant 25 heures, 130 mW/cm<sup>2</sup> à 932°C.

f) *Caractérisation structurelle*

L'EMPA et l'Institut de céramique de l'EPF-Lausanne ont effectué diverses analyses structurelles d'électrolytes [8]. Des échantillons de forme standard ont servi à exercer les *Recommended practices* pour l'évaluation thermomécanique des électrolytes [17]. En 1993, la méthodologie devra être adaptée pour permettre la caractérisation thermomécanique de PEN HEXIS-compatibles. Par ailleurs, la qualité des échantillons devrait s'améliorer au point que les dégradations lentes, dues au vieillissement, deviennent observables.

## PILES POLYMÈRES

a) *Procédé de fabrication des membranes*

L'Institut Paul-Scherrer, à Villigen mène depuis 3 ans des travaux de recherche sur les membranes polymères. En l'absence d'un partenaire industriel motivé, leur application aux piles polymères attendait d'être coordonnée au niveau international. La collaboration sous l'égide de l'AIE ayant finalement démarré, les objectifs ont pu être fixés. La Suisse assumera le rôle de *Lead-country* pour les activités concernant les membranes.

Afin de parvenir à trouver une alternative à la membrane classique de Nafion dont le prix ne cesse d'augmenter, l'idée suivie est d'effectuer une greffe de styrène sur un film de FEP (Fluoro-Ethylène-Propylène) à l'aide de

radiations (d'une bombe au  $\text{Co}^{60}$ ), suivie d'une sulfonation. L'électrolyte greffée du PSI, une fois montée entre deux électrodes commerciales donne cependant de moins bons résultats que le Nafion. Pour diminuer les surtensions qui sont générées aux interfaces, le groupe du PSI a eu l'idée innovante d'imprégner les électrodes avec du Nafion en solution. La puissance obtenue à ce stade des travaux pour une PEN de 6 cm Ø alimentée avec de l'hydrogène et de l'oxygène à 60°C est de 175 mW/cm<sup>2</sup> [9].

#### **b) Caractérisation électrochimique des structures PEN**

Le banc d'essai du PSI est versatile et devrait permettre d'effectuer toutes les caractérisations nécessaires au succès des recherches prévues [9].

#### **c) Procédé de fabrication des anodes à conversion directe**

Les Universités de Genève et Neuchâtel ont conjugué leur savoir-faire pour tenter de développer une anode à oxydation directe en polypyrrole contenant, en dispersion extrêmement fine, un mélange ruthénium-platine. Avec moins de 250 µgr/cm<sup>2</sup> de métaux nobles, le but est d'obtenir une PEN de 6 cm Ø, alimentée avec un mélange méthanol / eau à 70-85°C, délivrant 50 mW/cm<sup>2</sup>. Le groupe Genève-Neuchâtel voit ses chances de succès dans l'amélioration, *après traitement*, d'un facteur de plus de 10'000 de l'intensité du courant que supporte une électrode de graphite baignant dans une solution acqueuse avec 1 M méthanol (et d'acide sulfurique pour simuler l'acidité de la membrane) sans dégradation manifeste [10]. L'objectif, pour avril 1993, est une électrode de 2 cm<sup>2</sup> montrant une dégradation de moins de 5% de ses performances après 200 heures d'opération à une puissance de 50 mW/cm<sup>2</sup>.

## **5. Activités nouvelles pour 1993**

#### **a) Outils de diagnostic des stacks en opération**

La Phase II du projet AIE comporte une activité que la Suisse a proposée et qui, jusqu'à maintenant, n'a pas encore fait l'objet de travaux de recherche. Il s'agit du développement d'*outil pour le diagnostic des stacks en opération*. Sont actuellement considérés les outils suivants: thermométrie par résistance de films minces, détecteur de pannes thermo-optique, jauge pour la pression partielle d'oxygène, senseurs à gaz pour les gaz brûlés, détecteur de pannes acoustique, et spectroscopie d'impédance in-situ et post-mortem. Dès 1993, l'EPFL coordonnera les activités au niveau AIE et développera de nouveaux senseurs. SULZER évaluera la commodité de ces outils et l'EMPA effectuera l'analyse structurelle post-mortem pour conforter les diagnostics posés par l'EPFL grâce à ces outils. L'EMPA participera aussi au développement de senseurs des gaz émis et aux détecteurs acoustiques de fissures des matériaux, et l'EPFZ au détecteur de pannes thermo-optique.

#### **b) Opération au gaz naturel**

En 1993, SULZER explorera un préreformage du gaz naturel pour son *stack* de 1 kW. Bien que l'intérêt de la pile céramique réside dans sa température d'opération compatible avec le reformage du gaz naturel, l'anode - comme ceci a été relevé lors du workshop AIE à Lausanne - n'est toujours pas optimisée pour la combustion du CO sans dépôt de carbone. Le développement d'alternatives à l'option *classique* du cermet Nickel-YSZ (par exemple une céramique) doit donc être mis en chantier sans délai.

## **6. Information**

Une vue d'ensemble du programme a fait l'objet d'un article [13]. Bien que la fonction principale du groupe de travail du programme **Piles à combustible** soit la confrontation fertile d'expertise et de savoir-faire pour l'avancement accéléré des travaux, il joue incontestablement aussi un rôle de diffusion rapide et continu de

l'information des milieux concernés. Le groupe de travail fonctionne depuis bientôt 5 ans. Il est ouvert à toute personne prête à partager son expertise dans un climat de confiance mutuelle.

## 7. Liste des projets en cours en 1992

- [1] A. McEvoy, ICPII / EPF - Lausanne: *IEA SOFC Task (Operating Agent report)*. (RA)
- [2] R. Thampi, ICPII / EPF - Lausanne: *SOFC Test Bed Facilities*. (RA)
- [3] J. Van herle, ICPII / EPF - Lausanne: *Réduction de l'oxygène à l'interface PE*. (RA)
- [4] K. Sasaki, NMW / EPF - Zürich: *Mixed-conducting Cathode Materials for SOFC*. (RA)
- [5] R. Diethelm, SULZER, Winterthur: *SULZER-HEXIS SOFC SYSTEM*. (RA)
- [6] J.P. Issartel, BATTELLE, Genève: *Cathode EBE à conduction mixte*. (RA)
- [7] H. Gruner, MEDICOAT, Niederrohrdorf: *VPS-PEN Strukturen*. (RA)
- [8] P. Debély, EMPA - Dübendorf: *Caractérisation de la stabilité structurelle des PEN*. (RA)
- [9] G. Scherer, PSI - Villigen: *Material- und Strukturaspekte von Membran-Brennstoffzellen*. (RA)
- [10] J. Augustynski, Uni - Genève: *Anodes PEFC pour l'oxydation directe du méthanol*. (RA)
- [11] Nguyen D.L., SI - Genève: *Rapport de stage*. (RF)

(RA) rapport annuel 1992 disponible

(RF) rapport final disponible

## 8. Références

- [12] *Status of the SULZER HEXIS SOFC, Stack & System Development*, R. Diethelm & K. Honegger, Proceedings of the 3rd Int. Symp. on SOFC, May 16-21, 1993, Honolulu (USA).
- [13] *Cette invention venue trop tôt: la pile à combustible*, L. Dubal, Cahiers de l'électricité, 18 (1992), 18-22.
- [14] *Proceedings of the IEA SOFC Workshop*, Aug. 6 - 7, 1992, EPF-Lausanne, OFEN 1992.
- [15] *FACTS & FIGURES*, IEA SOFC Task Report, Berne, Avril 1992.
- [16] *SOFC MICROMODELISATION*, IEA SOFC Task Report, Berne, May 1992.
- [17] *RECOMMENDED PRACTICES FOR SOFC PRODUCTS & SYSTEMS EVALUATION (exploratory phase)*, IEA SOFC Task Report, Berne, August 1992.
- [18] *STACK DESIGN TOOL*, IEA SOFC Task Report, Berne, Novembre 1992.



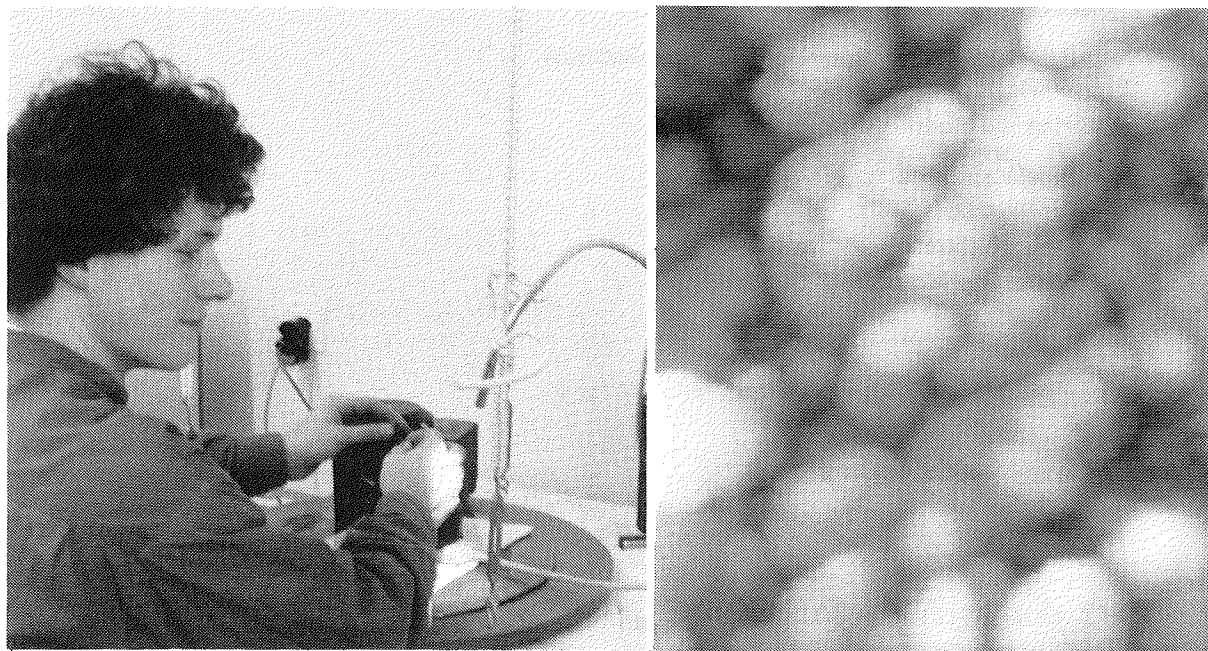


# E L E K T R O C H E M I E

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Otto Haas

---



## Rastertunnelmikroskopie (STM) für leitende Polymere

*Links* : Das schwingungsfrei aufgehängte Rastertunnelmikroskop der Universität Bern beim Einführen der Spitze ins Präparat. *Recht* : STM-Aufnahme von Polyanilin, aufgenommen in 0.5 M  $\text{HClO}_4$  während der Polymerisation zeigt wie das Filmwachstum direkt in der Elektrolytlösung verfolgt werden kann.

## 1. Programmübersicht und anvisierte Zielpunkte für 1992

Im vergangenen Jahr wurde das neu überarbeitete Programm **Elektrochemie** begutachtet und genehmigt. Aufbauend auf den nun zur Verfügung stehenden kompetenten Forschergruppen soll die Forschung auf dem Gebiet der elektrochemischen Energiespeicherung und -umwandlung weiter bearbeitet, die Arbeiten noch stärker koordiniert, auf die neu definierten Schwerpunkte abgestimmt und gestrafft werden. Bereits wurden Projekte gestrichen und die Projekte über leitende Polymere auf kationentauschenden Polymere mit einer theoretischen Ladungsdichte von wenigstens 200 Ah/kg eingeschränkt. Für die elektrochemische Energiespeicherung sind diese Polymere von besonderem Interesse. Statt auf Vorschläge zu reagieren, sollen zukünftig vermehrt mit Auftragsforschung die Arbeiten an geeignete Arbeitsgruppen verteilt werden. Das Programm erhält durch zwei neu aufgenommene P+D-artige Projekte (Nickel/Metallhydrid-Batterie, bipolarer-Bleiakku) mit Industriebeteiligung auch einen besseren Praxisbezug.

Die Forschungsschwerpunkte des Programms für 1992-1995 wurden wie folgt festgelegt:

### **Batterien mit hoher Energiedichte**

- Metall/Luft-Batterien
- Ionentransfer-Batterien

### **Polyelektrolyte**

- Polyelektrolyte für Brennstoffzellen und Batterien

### **Engineering und Modelling**

- Bipolarzellenbau
- Bipolarzelle
- Dünnschichtzelle
- poröse Gaselektroden

### **Elektrokatalyse**

- Sauerstoffreduktion
- Sauerstoffentwicklung
- Wasserstoffentwicklung

## 2. 1992 durchgeführte Arbeiten

### **BATTERIEN MIT HOHER ENERGIEDICHTE**

#### **a) Metall / Luft - Batterien**

Die **Aluminium/Luft-Batterie** konnte im vergangenen Jahr zusammen mit der Firma ALUSUISSE in Neuhausen patentiert werden [23]. Demnächst wird auch eine Dissertation [21] über die bipolare Al/Luft-Batterie abgeschlossen. Am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen wurde im vergangenen Jahr aber vorwiegend auf dem Gebiet der Zn/Luft-Batterie geforscht. Diese Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit den *Lawrence Berkeley Laboratory* durchgeführt. Da diese Zelle elektrisch wiederaufladbar ist, mussten sogenannte bifunktionelle Sauerstoffelektroden entwickelt werden. Erfreulicherweise konnten dabei bereits Elektroden hergestellt werden, die weit mehr als 50 Zyklen überstanden haben und sich erst nach mehreren hundert Stunden langsam verschlechterten. Da das Herstellungsverfahren dieser Elektroden sicher noch nicht optimiert ist, können hier noch wesentliche Verbesserungen in der Lebensdauer erwartet werden. Bei den Arbeiten mit der Zinkelektrode

wird gegenwärtig versucht, Elektrolyt-Zusammensetzungen zu finden, die es erlauben, Zink in einer porösen Elektrode oder einer Pastenelektrode direkt in unlösliches ZnO zu überführen. Damit könnten Zellen mit hohem Energiegehalt gebaut werden.

#### **b) Magnesiumtransfer - Batterie**

Bei der Entwicklung einer Magnesium-Insertions-Elektrode [14] konnte gezeigt werden, dass Magnesiumionen in verschiedenen Metalloxide und -sulfide elektrochemisch eingebaut werden können. In den meisten Fällen war jedoch der Einbau nicht reversibel und die elektrochemische Umsetzung relativ gering ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ : 5 Ah/kg,  $\text{RuO}_2$ : 35 Ah/kg,  $\text{ZrS}_2$ : 55 Ah/kg,  $\text{TiS}_2$ : 110 Ah/kg). Auch die elektrochemischen Potentiale der Einlagerung waren im allgemeinen etwas negativ. Reversible  $\text{Mg}^{2+}$ -Einlagerungen sowie eine relativ hohe elektrochemische Umsetzung wurde am käuflichen  $\text{V}_2\text{O}_5$  beobachtet. *Ex situ* Röntgenuntersuchungen der reduzierten und der oxidierten Elektrodenmassen haben eindeutig bestätigt, dass  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen im Laufe der Redoxzyklen ein- und ausgelagert werden. Dabei konnten Ladungsdichten bis zu 230 Ah/kg erreicht und mehr als 50 Zyklen durchgeführt werden. Die Einlagerung von Magnesium in  $\text{V}_2\text{O}_5$  ist auch in nichtwässrigen Elektrolyten möglich. Damit ist erfreulicherweise ein wichtiger Schritt in Richtung wiederaufladbare Magnesiumtransfer-Batterie gelungen. Es werden nun auch noch die Möglichkeiten der Einlagerung von Magnesiumionen in kationentauschende leitende Polymere untersucht.

Der zweite wichtige Schritt ist die elektrochemische Magnesiumabscheidung und Auflösung [18]. Mit mehreren nichtwässrigen Elektrolytsystemen konnte Magnesium elektrochemisch zu  $\text{Mg}^{2+}$  oxidiert (aufgelöst) werden. Damit wäre zumindest der Bau einer primären Batterie prinzipiell möglich. Die Umkehrung des Prozesses (elektrochemische Abscheidung von Magnesium), welche die Voraussetzung für den Bau einer wiederaufladbaren Batterie ist, konnte bis jetzt aber nicht befriedigend durchgeführt werden. Aus der Literatur sind zwar einige Elektrolytsysteme bekannt, welche eine elektrochemische Abscheidung von Magnesium zulassen. In diesen Systemen liegt Magnesium jedoch in Form von Hydriden oder magnesiumorganischen Verbindungen (Grignardverbindungen) vor. Da diese Verbindungen bei der elektrochemischen Auflösung im gleichen Elektrolyten nicht entstehen, kommen sie deshalb nicht in Frage. Untersuchungen mit neuen Elektrolytsystemen werden zeigen, ob diese etwas harte Nuss noch geknackt werden kann.

#### **c) Nickel / Metallhydrid - Batterien**

In diesem Projekt [15] sollen, ausgehend von Erfahrungen mit Nickel/Metallhydrid-Knopfzellen, Elemente mit Kapazitäten von 5-20 Ah gebaut werden. Dazu wurde eine Pilotanlage zur Pastierung der negativen und positiven Elektroden entwickelt und die hergestellten Elemente auf die Zyklenfestigkeit getestet. Es konnten im Schnellladungs- und -entladungs-Betrieb bereits über 1200 Zyklen erreicht werden. Das Projekt wird unterstützt von den in Fribourg [16] laufenden Forschungsarbeiten zur Entwicklung von kostengünstigeren und korrosionsstabileren Legierungen mit grosser Ladungsdichte. Mit Multikomponenten-Legierungen auf der Basis von billigen Mischmetallen und teilweiser Substitution von Ni durch Si, Al und Mn konnten korrosionsstabile Elektroden mit einer Kapazität von 250 Ah/kg hergestellt werden. In diesem Projekt werden auch Arbeiten zur Aufklärung des Selbstentlademechanismus an der Metallhydrid-Elektrode durchgeführt. Ab 1993 werden auch am PSI zusätzliche Arbeiten über den Selbstentlademechanismus an der Nickeloxidelektrode durchgeführt [17].

#### **d) Elektroaktive Polymere**

Die Arbeiten zur Untersuchung des Polyanilins konnten weitgehend abgeschlossen werden [2, 3, 6]. Es konnten 1992 mehrere wissenschaftliche Publikationen über das elektrochemische Verhalten [3], die Struktur und deren Beeinflussung bei der Herstellung [2, 6] veröffentlicht werden. Besonders aufschlussreich waren die Arbeiten über die verfügbare Ladungsdichte (90-130 Ah/kg in wässrigen Medien und bis zu 180 Ah/kg in nichtwässrigen Elektrolyten) und die Abklärung des Elektronentransfermechanismus inklusive des Ionentauschprozesses (Protonen- und Anionentransfer in wässriger Lösung, Anionentransfer in nichtwässrigen Elektrolyten). Darüber wurde bereits im letzten Jahresbericht ausführlich berichtet. Mit der Publikation dieser Resultate konnte nun auch international ein wichtiger Beitrag zum besseren Verständnis von Polyanilin geleistet werden. Leider ist die Ladungsdichte von Polyanilin für Traktionsbatterien eher an der unteren Grenze. Für diese Anwendung sind vor allem Polymere interessant, die eine Ladungsdichte von mehr als 200 Ah/kg haben, wobei auch die Ladungsdichte pro Volumen im selben Bereich sein sollte, was beim Polyanilin bei weitem nicht der Fall ist. Im

Unterschied zu den gängigen metalloxidelektroden ( $\text{PbO}_2$ ,  $\text{NiOOH}$ ) welche Polyanilin eventuell ersetzen könnten, kann bei den leitenden Polymeren und den Redoxpolymeren die gespeicherte Ladung jedoch praktisch vollständig genutzt werden, was den Nachteil der niedrigen Ladungsdichte teilweise wettmacht. Zum Erreichen hoher Energiedichten wäre es vorteilhaft, wenn Ionentransfer-Batterien gebaut würden (bei diesen Batterien werden die an einer Elektrode gebildeten Ionen in der Gegenelektrode wieder eingebaut). In diesem Zusammenhang sind besonders Kationeninsertions-Elektroden mit stark positivem Potential oder Anioneninsertions-Elektroden mit stark negativem Potential von Interesse. Bis jetzt konnte gezeigt werden, dass in Nafion eingebautes Diquat [1], Polypyrrol in DMSU [4], sulfoniertes Polyanilin [3] und elektrochemisch aktivierte vitrifizierte Kohle [3] im Prinzip die Funktion einer Kationeninsertions-Elektrode ausüben können. Dies sind alles interessante Teilerfolge. Die erwünschte Ladungsdichte ( $>200 \text{ Ah/kg}$ ) wurde bis jetzt aber nur von dünnen Schichten elektrochemisch aktivierter Kohle (*Glassy Carbon*) erreicht. Hier müssten aber noch dickere Schichten aktiviert werden können. Im Zusammenhang mit den Arbeiten über Kationen- und Anioneninsertions-Elektroden wurden auch ausgedehnte Literaturrecherchen durchgeführt [7, 19]. Dem BATTELLE Institut in Genf wurde eine Literaturrecherche und Analyse über schwefelhaltige Polymere in Auftrag gegeben [8]. Über elektroaktive Polymere wurde in den letzten Jahren ausserordentlich viel publiziert, weshalb Literaturrecherchen ein Dauerthema sind. Am PSI wird zur Zeit auch an einem Übersichtsartikel auf diesem Gebiet gearbeitet. Erfreulich ist vor allem, dass die Ausrüstung nun vorhanden ist, um Polymere sehr rasch elektrochemisch und morphologisch zu untersuchen (siehe dazu Titelseite). Diese Untersuchungen sind auch möglich, wenn von einem Polymer erst sehr dünne Schichten hergestellt werden können. Dabei funktioniert die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Projekten [1, 2, 3, 4, 7, 23] sehr gut. Im Hinblick auf die Verwendung von elektroaktiven Polymeren in Dünnschichtzellen ist ein Code zur Modellierung solcher Zellen in Ausarbeitung [13].

Neben den Arbeiten über Polyanilin wurden auch aufschlussreiche mechanistische Untersuchungen mit Poly-1-hydroxyphenazin [1, 4] durchgeführt. An der Universität Fribourg [7] wurde zudem versucht, aus Viologen ein Polymer herzustellen. Der Polymerisationsgrad des erhaltenen Polymers ist aber noch zu klein, um daraus redoxaktive Filme herzustellen.

## POLYELEKTROLYTE

Die Forschung auf dem Gebiet der Polyelektrolyte ist für Brennstoffzellen und Batterien von Interesse. Für Brennstoffzellen sind am PSI durch eine Strahlenpfropftechnik aus perfluorierten Polymerfolien protonenleitende Membrane mit sehr guter Ionenleitfähigkeit hergestellt worden. Der erste Teil dieser Arbeit [9] wurde 1992 abgeschlossen. Die Membranen wurden in Einzelzellen auf das Leistungsverhalten und auf die Lebensdauer getestet. Die Zellen ergaben über mehr als 1000 Betriebsstunden befriedigende Resultate und erreichten Leistungsdichten von  $175 \text{ mW/cm}^2$ , verglichen mit  $225 \text{ mW/cm}^2$  [10] für eine Nafion-Membran. In letzter Zeit wurden in Zusammenarbeit mit der *University of North Carolina* auch Arbeiten mit Polyethylenglykol begonnen [19]. Dabei wurden Leitfähigkeitsmessungen mit verschiedenen, im Polymer gelösten Salzen durchgeführt. Es soll mit diesen Arbeiten unter anderem abgeklärt werden, ob sich dieses System als Elektrolyt in Magnesiumtransfer-Batterien eignen würde.

## MODELLIERUNG

Für das richtige Verständnis und für die Optimierung der im Programm **Elektrochemie** untersuchten elektrochemischen Systeme ist die numerische Modellierung von grosser Bedeutung. An der EPF-Lausanne [11, 12], der Uni-Fribourg [13] und am PSI werden Computercodes zur Modellierung elektrochemischer Systeme entwickelt. Mit diesem Programm wird die Stromverteilung bei der Abscheidung und Auflösung von Metallen in Zellen mit beliebiger Elektrodenanordnung [11], die Simulation einer bipolaren Elektrolysezelle [12] und die Simulation von Dünnschichtzellen mit elektroaktiven Polymeren [13] modelliert. Die Arbeiten über die Metallabscheidung und über die bipolare Elektrolysezellen sind recht weit fortgeschritten, und es wurden auch schon mehrere Publikationen darüber veröffentlicht. Die Modellierung der Polymer-Dünnschichtzelle wurde erst vor einem halben Jahr begonnen, nachdem die Simulation von Einzelelektroden bereits im letzten Jahr abgeschlossen und publiziert wurde. Es bestehen gute Aussichten, dass die Arbeiten zur Modellierung der bipolaren Elektrolysezelle im Rahmen des Programms **Wasserstoff** zur Unterstützung der Entwicklung von Druck-Elektrolyseuren weiter verwendet werden können. Auch die Simulation der Metallabscheidung wird wertvolle Beiträge im Zusammenhang mit dem Projekt Zn/Luft-Batterie [20] leisten können.

### 3. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit ergibt sich automatisch über die verschiedenen Projekte innerhalb des Programms. Es ergeben sich aber auch immer wieder Kontakte zu andern Programmen, die eine gewisse thematische Überlappung mit dem Programm **Elektrochemie** haben, z.B. Programm **Wasserstoff**, **Brennstoffzellen**, **Thermochemie**, **Photovoltaik**, **Elektrizität**, **Rationelle Energie Nutzung im Verkehr**.

International sind folgende Kontakte erwähnenswert: Zur Entwicklung einer effizienten porösen Sauerstoffelektrode und der Zn/Luft-Batterie besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem *Lawrence Berkeley Laboratory*. Es wurden auch gemeinsame Arbeiten über Polyethylenglykol mit der *University of North Carolina* durchgeführt. Die europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der elektrochemischen Energiespeicherung wird ferner durch die Beteiligung an der *Working Party on Electrochemistry* der *Federation of European Chemical Societies* zu fördern versucht. Es besteht auch ein guter persönlicher Kontakt mit regem Informationsaustausch zu den Programmleitern des *Technology Base Research Project* des elektrochemischen Forschungsprogramms, welches vom *U.S. Department of Energy* unterstützt wird. Da relativ viele der in den Projekten eingestellten Post-Doktoranden aus dem Ausland rekrutiert werden, ergeben sich auch dadurch neue Kontakte zu ausländischen Instituten.

### 4. Transfer in die Praxis

Die Resultate wurden in Form von Publikationen, durch die Organisation von drei Workshops und einem gemeinsamen Patent mit der Industrie verwertet. Am 20. August 1992 wurde am PSI das 8. Minisymposium "Elektrochemische Energiespeicherung" durchgeführt, über welches auch in der CHIMIA berichtet wurde. Die Aufnahme der beiden P&D-artigen Projekte (Nickel/Metallhydrid und bipolarer Bleiakku) mit Industriebeteiligung werden in Zukunft eine direktere Umsetzung der Resultate gewährleisten. 1992 ist ein PSI-Mitarbeiter zur Firma LECLANCHÉ übergetreten. Er arbeitet auch dort an einem BEW-Projekt (Nickel/Metallhydrid-Batterie), womit ein Know-How-Transfer in die Industrie und somit in die Praxis stattgefunden hat.

### 5. Ausblick für die nächsten drei Jahre

Bei den **Metall/Luft-Batterien** sollen die wiederaufladbaren Zn/Luft-Batterien eingehend untersucht werden. Es können dabei viele Resultate der vorher untersuchten Al/Luft-Batterien weiter verwertet werden. Im Unterschied zu den Al/Luft-Batterien können Zn/Luft-Batterien elektrisch wieder aufgeladen werden. Bei diesen Forschungsarbeiten soll die Zusammenarbeit des PSI mit der EPFL und dem *Lawrence Berkeley Laboratory* fortgesetzt werden. In Form von Diplomarbeiten werden auch an der HTL-Burgdorf gewisse Beiträge geleistet. Die Arbeiten am PSI [20] konzentrieren sich zur Zeit auf die Herstellung von bifunktionellen Sauerstoffelektroden (Elektroden, welche Sauerstoff reduzieren und entwickeln können) und auf die Untersuchung der Zn-Elektrode in alkalischen Elektrolyten. Es werden Elektrolyte untersucht, die eine Direktumwandlung von Zn in unlösliches ZnO erlauben. Dadurch können wesentlich höhere Energiedichten erreicht werden als bei der Umwandlung in lösliches Zinkat. Wir hoffen, dass an der EPFL ergänzende Untersuchungen mit bipolaren Zn/Luft-Batterien und deren Modellierung demnächst begonnen werden und damit die Voraussetzungen für den Bau von grösseren Zellen geschaffen werden können.

Die Arbeiten auf dem Gebiet der **Ionentransfer-Batterien** konzentrieren sich auf die Mg- und Na-Ionentransfer-Batterien [14] und die **Nickel/Metallhydrid-Batterie** [15], die im Prinzip eine Hydroxidionentransfer-Batterie ist. In einem kleineren Projekt wird zur Zeit an der Universität Fribourg auch noch die Möglichkeiten einer Bromidionentransfer-Batterie getestet [7]. Für die Ionentransferbatterie werden am PSI Kationen-Insertionselektroden auf der Basis von Metalloxiden und Polymeren entwickelt, und an der Universität Fribourg [18] die elektrochemische Metall-Abscheidung und -Auflösung in aprotischen Elektrolyten studiert. Die zukünftigen Arbeiten auf dem Gebiet der leitenden Polymere an der Universität Bern, der EPFL, dem BATTELLE und dem

PSI sollen sich, wie oben erwähnt, in Zukunft auf kationentauschende Polymere mit hoher Ladungsdichte konzentrieren.

Die **Nickel/Metallhydrid-Batterie** wird vorwiegend bei der Firma LECLANCHÉ entwickelt. Das Vorhaben ist jedoch wissenschaftlich unterstützt von der Universität Fribourg und dem PSI. In Fribourg [16] werden neue Metallhydrid-Elektroden entwickelt und die Selbstentladung dieser Elektrode untersucht, während am PSI [17] der Selbstentlademechanismus an der Nickeloxielektrode studiert werden soll. Die Arbeiten zum bipolaren Bleiakku sind zur Zeit auf eine Studie beschränkt, die am BATTELLE [22] durchgeführt werden soll. Die Studie beinhaltet die Abklärung der Einsatzmöglichkeiten des **bipolaren Bleiakкумуляtors** und den Bau einer kleinen Versuchszelle, in der bipolare Pb/PbO<sub>2</sub>-Elektroden getestet werden sollen. Das Projekt wird nach dieser Studie weiterverfolgt, falls sich die schweizerische Batterie-Industrie an den weiteren Entwicklungsarbeiten beteiligen wird.

Die **Polyelektrolytforschung** beschränkt sich zur Zeit auf Untersuchungen von strahlengepfropften und sulfonierten FEP-Folien sowie Untersuchungen an Polyethylenoxid und Polyimiden. Diese Untersuchungen werden am PSI [10,19] und an der Universität Fribourg [7] durchgeführt. Die Arbeiten zum **Zellengineering und Modelling** wurden bereits im Zusammenhang mit den anderen Vorhaben erwähnt. Diese Arbeiten werden gemeinsam von der EPFL [11,12], der Uni-Fribourg und dem PSI [13] durchgeführt. Im Rahmen des Projektes Zn/Luft-Batterie und der Untersuchung des Selbstentlade-Mechanismus an der Nickelelektrode sind auch Arbeiten auf dem Gebiet der **Katalysenforschung** nötig, welche zur Zeit vorwiegend am PSI [20] durchgeführt werden.

Da die Kontinuität der Forschungsarbeiten an den Hochschulen im allgemeinen nicht gegeben ist (die meisten Forschungsarbeiten werden von nicht permanent beschäftigten Doktoranden und Postdoktoranden durchgeführt), spielt das **Paul Scherrer Institut** im Programm **Elektrochemie** eine **zentrale Rolle**. Hier sollen die Resultate auch weiterverwendet werden, wenn ein Projekt an der Hochschule abgebrochen wird. Es ist deshalb wichtig, dass das PSI an den einzelnen Schwerpunktthemen mit eigenen Projekten beteiligt ist.

## 6. Liste der 1992 gelaufenen Projekte

- [1] E. Schmidt, Uni - Bern: *Elektrochemische Impedanz-Spektroskopien an stromleitenden und Redox-Polymeren.* (JB)
- [2] H. Siegenthaler, Uni-Bern: *In-situ Rastertunnelmikroskopie an nichtmetallischen Elektrodensubstraten.* (JB)
- [3] O. Haas, R. Kötz, PSI - Villigen: *Charakterisierung von leitenden Polymeren und Redoxpolymeren,* (NF 20.5424.87). (JB)
- [4] H. Kiess, PSI - Zürich: *Simultanuntersuchungen der optischen Absorption und der Voltammogramme von leitenden Polymeren und Redoxpolymeren.* (SB)
- [5] W. Bührer, ETH - Zürich: *Ionen-Beweglichkeit in Festkörpern und Super-Ionenleitfähigkeit: Neutronen-Streu-Untersuchungen zum mikroskopischen Verständnis,* (NEFF 478).
- [6] M. Grätzel, EPF - Lausanne: *Conductive polymers for rechargeable batteries.* (JB)
- [7] C.W. Schläpfer, Uni - Fribourg: *Anwendung von Polymeren in elektrochemischen Zellen.* (JB)
- [8] K. Müller, BATTELLE, Genève: *Literaturrecherche und Analyse über schwefelhaltige Polymere und Polymere mit kleiner Äquivalentmasse.* (JB)
- [9] G.G. Scherer, PSI - Villigen: *Neuartige Membranen für saure Brennstoffzellen und Wasserelektrolyseure.* (JB)
- [10] G.G. Scherer, PSI - Villigen: *Material- und Strukturaspekte von Membran-Brennstoffzellen.* (JB)
- [11] D. Landolt, EPF - Lausanne: *Modellierung von elektrochemischen Systemen angewandt auf die Abscheidung und Auflösung von Metallen.* (JB)

- [12] H. Froidevaux, Uni - Lausanne: *Modélisation d'un réacteur électrochimique et vérification expérimentale.* (JB)
- [13] C. Daul, Uni - Fribourg & E. Deiss, PSI - Villigen: *Simulation einer Dünnschichtzelle bestehend aus zwei Polymerelektroden.* (JB)
- [14] P. Novák, PSI - Villigen: *Einlagerung von  $Mg^{2+}$  aus nichtwässrigen Medien in Metalloxide.* (JB)
- [15] J. Desilvestro, P. Ruetschi, LECLANCHÉ, Yverdon: *Nickel-Hydrid-Akkumulator.* (JB)
- [16] L. Schlapbach, Uni - Fribourg: *Metallhydride als Elektroden in Batterien.* (JB)
- [17] R. Kötzt, PSI - Villigen: *Selbstentladung von Nickel/Metallhydrid-Batterien.* (JB)
- [18] F.P. Emmenegger, Uni - Fribourg: *Elektrochemische Abscheidung von Magnesium aus Raumtemperatur-Schmelzen.* (JB)
- [19] O. Haas, PSI - Villigen: *Programmleitung Elektrochemie.* (JB)
- [20] S. Müller, PSI - Villigen: *Wiederaufladbare Zn/Luft-Batterie (PSI-Projekt).* (JB)
- [21] M. Rota, PSI - Villigen & EPF-Lausanne: *Bipolare Al/Luft-Batterie* (Dissertation). (SB)
- [22] R. Schmitt, BATTELLE, Genf: *Bipolare Batterien.* (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden  
 (SB) Schlussbericht vorhanden

## 7. Referenzen

- [23] O. Haas, S. Müller, F. Holzer, J. Desilvestro, PSI - Villigen: *Aluminium/Luft-Batterie*, Patentschrift CH 679 438 A5, BGE Bern, 14. Febr. 1992.



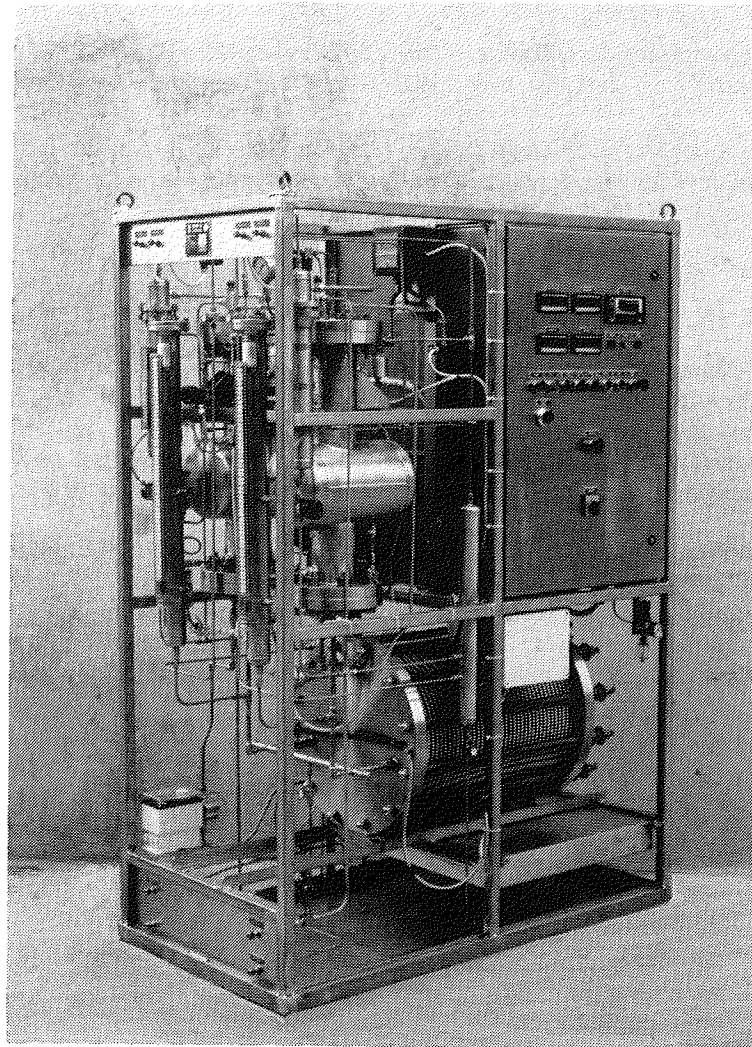


# WASSERSTOFF

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: Thomas H. Schucan

---



## Elektrolyse-Anlage

Die fortgeschrittene Versuchsanlage zur Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser unter Einsatz von elektrischer Energie ist von der Firma METKON in Mendrisio gebaut worden. Darin werden bis zu 2 Normkubikmeter Wasserstoff pro Stunde bei einem Druck von 30 bar erzeugt.

## 1. Anvisierte Zielpunkte für 1992

Der Wasserstoff verdankt seine prominente Rolle in der Diskussion über Energieversorgungssysteme der Zukunft vor allem der Tatsache, dass er ein chemischer Sekundärenergieträger ist, welcher einerseits aus praktisch allen bekannten Primärenergieträgern herstellbar und andererseits für eine grosse Vielfalt von Anwendungen nutzbar ist. Die *Herstellung*, die *Nutzung* (inkl. Transport) und als Bindeglied die *Speicherung* sind deshalb die drei Hauptgebiete für die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Wasserstofftechnologie. Davon ausgehend wurden für das Energieforschungsprogramm **Wasserstoff** die folgenden drei Schwerpunkte gesetzt:

- Die Entwicklung von **Druck-Elektrolyseuren** bis zur Demonstrationsreife.
- Die Weiterentwicklung der drei verschiedenen **Speichermethoden** (Bindung in festen metallischen oder in flüssigen organischen Hydriden, oder Speicherung als tiefgekühlter Flüssigwasserstoff).
- Die Weiterentwicklung von **Gesamtsystemen** (d.h. von Systemen, in welchen Erzeugung, Speicherung und Nutzung aufeinander abgestimmt sind) in Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschulen unter Berücksichtigung der für die Schweiz spezifischen Erfordernisse.

Summarisch wurden für 1992 folgende Ziele für die drei Schwerpunktsbereiche gesetzt:

Im Bereich **Druck-Elektrolysen** sollten die 1989 bzw. 1990 begonnenen Projektarbeiten zur Entwicklung von Elektrolyseuren (d.h. Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom), bei welchen der Wasserstoff unter einem Druck von 30 bar (oder höher) bzw. auf einem höheren Temperatur-Niveau (100 bis 150°C) erzeugt wird, abgeschlossen werden. Von beiden Verbesserungen wird eine deutliche Erhöhung der energetischen Gesamteffizienz und eine Vereinfachung der Gesamtsysteme erwartet.

Im Bereich **Speichermethoden** steht die Untersuchung der Möglichkeit einer Metall-Hydrid-Elektrode im Vordergrund. Eine solche Elektrode bildet die Grundlage für die Konstruktion einer wiederaufladbaren Nickel-Hydrid-Batterie. Diese wiederum kann die heute wegen ihrer Giftigkeit unter Beschuss geratenen Nickel-Cadmium-Batterien ersetzen. Die zu diesem Thema aufgenommenen Projektarbeiten sollten ein Zwischenziel erreichen, mit welchem industrielle Partner zur Mitwirkung motiviert werden können.

Zwei Projekte zur Speicherung von **Wasserstoff in festen metallischen Hydriden** (mit dem Ziel, einen höheren volumenbezogenen Wasserstoffgehalt zu erreichen) bzw. **in der Form von tiefgekühlter Flüssigkeit** (mit dem Ziel, den beträchtlichen, für die Verflüssigung benötigten Energieaufwand besser auszunützen oder zu vermindern) sollten weitergeführt bzw. zum Abschluss gebracht werden, um auch auf diesen beiden Gebieten den Anschluss an die internationalen Aktivitäten zu gewährleisten.

Das Konzept der Speicherung von Wasserstoff in der Form von flüssigen organischen Hydriden (**Methylzyklohexan-Toluol-Zyklus MTH**) ist weitgehend in der Schweiz entwickelt worden. Es ist gegenüber den anderen Methoden vor allem für die Langzeit-Speicherung geeignet. Die Weiterentwicklung der entsprechenden Speichertechnik im engeren Sinne war innerhalb dieses Schwerpunktsbereichs vorgesehen.

Das Ziel für das Programm 1992 im Bereich **Gesamtsysteme** bestand in der Weiterführung der Arbeiten am 1990 begonnenen, vom Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen gemeinsam mit der Firma DAIMLER-BENZ, in Deutschland initiierten Projekt **HYPASSE** (*HYdrogen Powered Automobiles using Seasonal and weekly Surplus of Electricity*). Darin sollen zwei verschiedene Speicherkonzepte und die damit verbundene Nutzung weiterentwickelt und realisiert werden in einem gemeinsamen, energiewirtschaftlich sinnvollen Umfeld.

## 2. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1992

Im Berichtsjahr wurden mehrere Projekte abgeschlossen. Neue Vorschläge wurden vorbereitet und nach Diskussion im Expertenkreis mehrheitlich positiv beurteilt und zur Durchführung empfohlen. Die wichtigsten der 1992 durchgeführten Arbeiten und die erreichten Resultate werden in den folgenden Abschnitten nach Schwerpunkten geordnet zusammengestellt.

### ERZEUGUNG VON WASSERSTOFF

Von der Firma METKON in Mendrisio wurde untersucht [1], wie die von ihr entwickelten und patentierten ALYZER-Elektrolyse-Zellen mechanisch verstärkt werden müssen, damit sie Wasserstoff bei einem Druck von 30 bar erzeugen können. Die im Vorjahr durchgeführten Messungen wurden zusammengestellt und mit der Beschreibung des zum Abschluss des Projektes gebauten vollständigen Zellmoduls (mit einer elektrischen Leistung von 5 kW) und dessen erfolgreicher Erprobung in Langzeitversuchen (3 bis 15 Tage) bei 80° C und 30 bar in einem ausführlichen Schlussbericht dokumentiert. In einem zweiten Projekt [2] wurde die Untersuchung verschiedener Zellmaterialien im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit bei höheren Temperaturen (100 bis 150°C) weitergeführt und zum Abschluss gebracht. Nachdem im Vorjahr in umfangreichen Mess-Serien die in bezug auf die mechanische und die elektrische Widerstandsfähigkeit am besten für diese Anwendungen geeigneten Materialien für die Zellrahmen (Polysulphon PSU mit 5-10% Glasgehalt) und die Diaphragmata (PSU-Membran oder Raton) gefunden worden waren, wurde dieses Projekt im Berichtsjahr durch den Bau einer Pilotanlage (mit einer Leistung von 20 kW) abgeschlossen. Die Anlage wurde während drei Tagen bei Temperaturen zwischen 100 und 140°C kurz in Betrieb genommen. Dabei wurde die für die Verbesserung der Effizienz wuchtige Reduktion der Zellspannung mit steigender Temperatur den Erwartungen entsprechend nachgewiesen.

Im Rahmen des weiter unten erwähnten Demonstrationsprojektes der ATEL, Niedergösgen, wird für die Elektrolyse die von BBC 1987 gebaute erste Anlage in MEMBREL-Technik eingesetzt. Nach dem sie 1991 im Rahmen eines vom KWF unterstützten Forschungsprogramms vom PSI revidiert und wieder installiert und in Betrieb genommen wurde, konnte im Sommer 1992 der regelmässige Betrieb aufgenommen werden. Gleichzeitig erfolgt damit die wissenschaftliche Analyse des zeitlichen Verhaltens der 120 Zellen durch das PSI.

Einige Projekte, die sich mit der direkten Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mit Hilfe von Sonnenlicht (mit photochemischen, photokatalytischen oder photobiologischen Methoden) befassen, sind in den begleitenden Forschungsprogrammen **Photochemie** und **Elektrochemie** enthalten.

### SPEICHER-TECHNOLOGIEN

Im Berichtsjahr wurden die Untersuchungen zur Verminderung der an Metallhydridelektroden auftretenden Korrosion abgeschlossen [4]. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Prototypen von korrosionsbeständigen metallhydridelektroden für reversible Batterien zu entwickeln. Dazu wurde die Korrosionsbeständigkeit der hydridbildenden Legierung mit oberflächenanalytischen Methoden in Vakuum und mit elektrochemischen methoden im KOH-Elektrolyten untersucht. Zudem wurden verschiedene Möglichkeiten des Kompaktierens des Metallhydridpulvers getestet. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden zur Weiterentwicklung der Legierung eingesetzt, und es gelang so, korrosionsbeständigere Legierungen mit nur noch 2,5% Kapazitätsverlust pro 100 Zyklen herzustellen.

In einem weiteren Projekt [5] wurden 9 weitere neue Metallhydrid-Verbindungen gefunden und hergestellt, die jeweils aus drei oder vier verschiedenen Elementen zusammengesetzt sind. Solche Verbindungen zeichnen sich vor allem aus durch ihre relativ hohe Wasserstoffdichte (doppelt so hoch wie bei flüssigem Wasserstoff und 9 mal höher als bei gasförmiger Druckspeicherung unter den üblichen 200 bar). Ihre Kristallstruktur wurde mit röntgenkristallographischen Methoden bestimmt. Ziel dieser Untersuchungen an zahlreichen neuen Verbindungen ist es, durch Erkennung, Verständnis und Kombination ihrer Eigenschaften eine Verbindung zu finden, welche sich sowohl durch einen akzeptablen Preis als auch durch eine geringe thermische Stabilität auszeichnet.

Wenn in einem System zur energetischen Nutzung von Wasserstoff die Speicherung in Form von Flüssigwasserstoff erfolgt, wird die energetische Gesamteffizienz massgeblich durch den für die Verflüssigung

einzusetzenden Energieaufwand beeinflusst (ca. 30-40 % des Energie-Inhalts werden für diesen Zweck zusätzlich benötigt). Detaillierte Erforschung des damit verbundenen Mechanismus der Ortho-Para-Umwandlung ist deshalb von besonderem Interesse. Die Bestätigung der früher erhaltenen Laborresultate mit verschiedenen Katalysatoren durch Messungen an einer im industriellen Betrieb stehenden Wasserstoff-Verflüssigungsanlage (in Kanada) wurde abgeschlossen [6]. Wegen Firmen-Restrukturierung wird der entsprechende Schlussbericht erst 1993 vorgelegt werden.

In bezug auf das vor allem in der Schweiz entwickelte Speicherkonzept (flüssige organische Hydride) wurden weitere Messungen mit Palladium-Silber-Membranen durchgeführt [7]. Sie haben in einigen Fällen zu einer deutlichen Verbesserung (im besten Falle von 40 % auf 85 % bei 340°C, einem Druck von 15 bar und wirtschaftlich sinnvollem Durchsatz (LSHV 3/h) der Wasserstoff-Ausbeute geführt. Parallel dazu wurde ein isothermer Membran-Reaktor für dieselbe Reaktion unter ähnlichen Bedingungen modelliert, um Hinweise auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten zu erhalten. In allen Anlagen für die Freisetzung von Wasserstoff durch chemische Reaktionen spielt neben Auswahl, Anordnung und Behandlung der Katalysatoren vor allem die Tatsache eine wesentliche Rolle, dass relativ grosse Wärmemengen in kurzer Zeit der Reaktionszone zugeführt werden müssen. In einem weiteren Projekt [8] wurde deshalb untersucht, wie weit die Wärmeübertragungskoeffizienten dadurch verbessert werden können, dass die innere Oberfläche der Reaktor-Röhren durch Rippen vergrößert wird. Die daraus resultierenden Verbesserungen betrugen bis zu 27 %.

In einem Ende 1991 begonnenen Projekt [9] wird untersucht, ob Wasserstoff in einem quasi-flüssigen Medium gespeichert werden kann, indem eine Grobsuspension aus metallischem Magnesium und einer wärmeleitenden Flüssigkeit mit Wasserstoff unter Druck und bei erhöhter Temperatur zu Magnesium-Dihydrid umgewandelt wird. Auf diese Weise liesse sich der Wasserstoff leichter als Ersatztreibstoff verwenden, weil der Tankvorgang erheblich erleichtert werden könnte. Im Berichtsjahr wurde eine Versuchsanlage zur Untersuchung der quasi-flüssigen Metallhydride aufgebaut.  $\text{LaNi}_5$ , suspendiert in n-Undecan, konnte erfolgreich zu  $\text{LaNi}_5\text{H}_6$  hydriert und wieder vollständig dehydriert werden. Der Anteil an gespeichertem Wasserstoff bezogen auf  $\text{LaNi}_5$  betrug im Maximum 1,3 Massen-%. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Rührdrehzahl im Reaktor der Transport des Wasserstoffes zu den Metallpartikeln erleichtert wurde und eine bessere Ausnutzung der Speicherkapazität erzielt werden konnte. Durch das Hydrieren und Dehydrieren wurde das n-Undecan chemisch nicht verändert; die  $\text{LaNi}_5$ -Partikel zerfielen jedoch in kleinere Körner mit einer mittleren Korngrösse von ca. 10  $\mu\text{m}$ .

Die Hydrierung von Abfall- $\text{CO}_2$  zu Methanol als Wasserstoff speichernde Reaktion und das dazu gehörende Umfeld (z.B. die Bereitstellung von  $\text{CO}_2$  in ausreichender Reinheit) wurde im Rahmen des Programms **Thermochemie** und in einem vom NEFF unterstützten Projekt untersucht. Über den Fortschritt dieser Arbeiten wird an anderer Stelle informiert. Vom PSI wurde im Berichtsjahr ein Grossprojekt zur Verwertung von Abfallbiomasse angeregt. Das Ziel des Projekts ist die Umwandlung von Biomasse über die Vergasung mit Sauerstoff und Dampf in den flüssigen Energieträger Methanol. Berührungspunkte mit dem Programm **Wasserstoff** ergeben sich durch die längerfristig vorgesehene Koppelung des Prozesses mit Wasserelektrolyse. Über die Konversion zu Methanol könnten in einer Tonne trockener Biomasse (z.B. Holz) bis zu 150 kg Wasserstoff gespeichert werden. Das Ziel des Projekts ist eine Demonstrationsanlage für die Biomasseumwandlung in Methanol bis zum Ende des Jahrhunderts. Mit einer Reihe von externen Partnern hat das PSI 1992 mit der ersten Phase des Projekts (Machbarkeit) angefangen. Über dieses Projekt wird im Überblick des Programms **Biomasse** berichtet.

## NUTZUNG VON WASSERSTOFF UND GESAMTSYSTEME

Im Zentrum der für die Weiterentwicklung des Schweizer Speicherkonzepts notwendigen Arbeiten an der Verbesserung der mit Wasserstoff betriebenen Verbrennungsmotoren [10] stand im Berichtsjahr hauptsächlich die Entwicklung eines neuartigen, elektronisch gesteuerten Wasserstoffeinblase-Systems. Dies bedeutet neben verbrennungstechnischen Vorteilen ein Höchstmass an Flexibilität für die möglichen Anwendungsvarianten. Insbesondere ist der Motor auch für stationären Betrieb besonders gut geeignet.

Im Rahmen der Förderung von Pilot- und Demonstrations-Projekten im Energiebereich für Bundesbauten wurden im Berichtsjahr zwei Projekte unterstützt, welche auf die praktische Nutzung von Wasserstoff in der Schweiz zielen: Das eine betrifft die Weiterentwicklung des am Paul Scherrer Institut in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich und mit der Privatindustrie entwickelten Wasserstoff-Lastwagens. Die im Vorjahr fertiggestellte

und auf dem Lastwagen installierte Dehydrieranlage konnte nach Behebung verschiedener Mängel kurz in einem stationären Betrieb erprobt werden. Für den mobilen Betrieb erwies sie sich wegen einiger Konstruktionsfehler als ungeeignet. Die Probleme traten dabei nicht in den chemischen Prozessen auf, sondern sie waren mechanischer Natur und vorwiegend durch die starken thermischen Lastschwankungen bedingt. Es wurde deshalb beschlossen, das Projekt durch die Auswertung dieser Erfahrungen abzuschliessen und auf die direkte mobile Anwendung zu verzichten. Einwandfrei haben während der ganzen Versuchsperiode die am PSI entwickelten 3 katalytischen Brenner mit einer Leistung von je 44 kW funktioniert, in welchen Wasserstoff im Temperaturbereich zwischen 0 und 600°C und demzufolge ohne Emission von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) mit der beachtlichen Wärmeleistungsdichte von 220 W/cm<sup>2</sup> flammenlos zur Erzeugung von Wärme eingesetzt werden kann.

Zum zweiten wurde ein konkretes Bauprojekt ausgearbeitet, wie der für die Wettersonden-Ballone in Payerne benötigte Wasserstoff mit Hilfe von solar erzeugtem Strom aus Wasser hergestellt werden könnte, anstatt wie bisher aus Gas-Druckflaschen. Der Bau der von der Elektrowatt Ingenieurunternehmung, in Zürich vorgeschlagenen Anlage mit einer autonomen solaren Erzeugung des Wasserstoffs ist für 1993 vorgesehen. Im Zusammenhang mit diesem Projekt wurde ein früher von der EWI in Zusammenarbeit mit der Ingenieurschule Burgdorf entwickeltes Programm zur Simulation photovoltaischer Anlagen um einen Programm-Modul erweitert [11], in welchem ein Elektrolyseur mathematisch beschrieben und mit der solaren Stromerzeugung gekoppelt wird.

### 3. Internationale Zusammenarbeit

In der Internationalen Energie-Agentur (IEA) werden zurzeit im Bereich Wasserstoff zwei Programme durchgeführt. In beiden (Wasserstoffherzeugung; Speicherung, Umwandlung und Sicherheit) ist die Schweiz mit Projekten aus den Programmen **Photochemie** und **Wasserstoff** aktiv beteiligt. Insbesondere wurde im Berichtsjahr unter den Auspizien der IEA eine Arbeitsgruppe gegründet, in welcher sechs Forschungsgruppen aus Deutschland, Italien, Norwegen und der Schweiz ihre Untersuchungen zur Koppelung von Druck-Elektrolyseuren mit Stromerzeugung aus Sonnenenergie zu einem kohärenten Arbeitsprogramm kombinieren. Die Schweiz ist in dieser Gruppe durch EWI und METKON vertreten.

Im Nachgang zur 1991 abgeschlossenen Phase 2 des von der EG initiierten internationalen Demonstrationsprojekts, in welchem Wasserstoff in Kanada erzeugt und zum Zweck der energetischen Nutzung in Europa über den Atlantik transportiert werden soll, wurden zwei Forschungsaufträge im Rahmen des von der EG finanzierten Begleitprogramms direkt in die Schweiz vergeben. Am PSI wurden die Effizienz und Selektivität von Dehydrierungs-Katalysatoren verbessert, und bei der Firma METKON wurde die mathematische Modellierung des transienten Verhaltens einer Kombination von Dehydrieranlage und Fahrzeugmotor untersucht.

Die Arbeiten zum oben erwähnten, vom PSI gemeinsam mit DAIMLER-BENZ ins europäische Forschungsprogramm EUREKA eingebrachten Projekt HYPASSE wurden im Berichtsjahr weitergeführt.

Auch im Bereich der Erzeugung von Wasserstoff werden die in der Schweiz stattfindenden Entwicklungen international mit grossem Interesse verfolgt. Die Firma METKON hat einige Elektrolyse-Anlagen ins Ausland verkauft, und sie steht in bezug auf ihre Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in engem Kontakt und Erfahrungsaustausch mit anderen führenden europäischen Herstellern.

### 4. Umsetzung

Beinahe alle im Rahmen des Schweizerischen Energieforschungsprogramms **Wasserstoff** unterstützen Projekte werden in enger Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Industrie durchgeführt, um einen gleitenden Übergang in eine spätere rein industrielle Entwicklung sicherzustellen. In zwei Fällen sind die durchführenden Firmen schon heute auf dem internationalen Markt tätig. In beiden Fällen erfolgten im Berichtsjahr wesentliche Restrukturierungen, um die fachliche Basis zu verbreiten und die wirtschaftlichen Perspektiven besser

abzusichern. Aus der Firma METKON wurde die Abteilung für industrielle Elektrochemie herausgelöst und als selbständige Firma ALYZER mit neuer Trägerschaft konstruiert. Der Bereich Kryotechnik der Firma SULZER wurde an die Firma LINDE, eine der weltweit führenden Firmen in der Tieftemperatur-Technologie, verkauft und besteht seit Juli 1992 als LINDE KRYOTECHNIK in Pfungen. Auf dem Gebiet der Metallhydrid-Batterien konnten die bisher im Programm **Wasserstoff** von der Universität Fribourg initiierten und durchgeführten Forschungsarbeiten durch die Aufnahme eines neuen industriellen Entwicklungsprojekts im Rahmen des Programms Elektrochemie wesentlich ergänzt werden.

Ein weiterer Schritt zur Umsetzung ist dadurch gegeben, dass in zwei Fällen weitgehend unabhängig von Förderung durch die öffentliche Hand Demonstrationsanlagen in Funktion oder im Bau sind. Insbesondere ist hier das Wohnhaus der Familie Friedli in Zollbrück zu erwähnen, welches besonders auch international viel Beachtung findet. Dort wird Wasserstoff durch Nutzung von Sonnenenergie erzeugt, gespeichert, und für den Hausbetrieb (Kochherd, Waschmaschine) wie für den Antrieb eines Fahrzeugs (Kombiwagen) genutzt. Im Berichtsjahr wurde das gesamte System weiter verbessert. Auf den in Ergänzung zu diesem Projekt an der Ingenieurschule Biel in Entwicklung befindlichen DC/DC-Wandler für die Solar-Wasserstoffanlage wird im Überblicksbericht des Programmleiters **Photovoltaik** eingegangen.

Die Firma ATEL hat in einer Wasserstoff-Demonstrationsanlage in Niedergösgen eine vollständige Kette von Erzeugung bis Nutzung implementiert. Neben der mit Hilfe des PSI instandgestellten MEMBREL-Elektrolyse-Anlage (mit einer Produktionsleistung von 100 kW, bzw. 20 Normkubikmeter Wasserstoff pro Stunde), Gasreinigung und -kompression auf 200 bar und den entsprechenden Speichertanks ist auch eine Brennstoffzelle installiert worden, in welcher der Wasserstoff mit einer Leistung von 3 kW in elektrischen Strom umgesetzt wird. Der reguläre Betrieb wurde 1992 aufgenommen.

## 5. Geplante Forschungsarbeiten 1993

Im Herbst 1992 wurde der Forschungsrahmen für die Jahre 1992-1995 genehmigt. In Übereinstimmung damit werden in allen drei Schwerpunktsbereichen 1992 abgeschlossen und 1993 abzuschliessende Projekte durch Folgeprojekte weitergeführt. Deren genaue Zielsetzungen sind zum Teil bereits festgelegt, zum Teil wird darüber nach Vorliegen der Schlussberichte und Folgeanträge entschieden werden. In zwei Fällen (Metallhydrid-Elektrode, Elektrolyseur-Modellierung) erfolgt bei dieser Gelegenheit ein Abtausch ins bzw. vom Programm **Elektrochemie**, um eine verbesserte Kohärenz zu gewährleisten. Im Rahmen von Studien werden von der Programmleitung aus neue Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten ausgelotet.

Drei Projekte ([7], [8] und [10]) stehen in direktem Zusammenhang mit dem EUREKA-Projekt HYPASSE, und die entsprechenden Arbeiten werden ins Gesamtprojekt eingegliedert. Für die Realisierung des ganzen Schweizer Anteils an diesem Projekt ist zusätzlich ab Frühjahr 1992 eine wesentliche Unterstützung durch den NEFF bewilligt worden. In diesem Zusammenhang wird auch die für die Elektrizitätswirtschaft interessante Frage näher untersucht werden, inwiefern sich die in der Schweiz entwickelte Methode der Speicherung in organischen Hydriden für stationäre Sommer-Winter-Speicherung und Wiederverstromung eignet.

## 6. Liste der Projekte

- [1] G.C. Sioli, METKON, Mendrisio: *Zellen für Hochdruckwasserelektrolyse*. (SB)
- [2] G.C. Sioli, METKON, Mendrisio: *Zellen für Hochtemperatur-Wasserelektrolyse*. (SB)
- [3] G.C. Sioli, METKON, Mendrisio: *Sunlyzer* (Phasen 1 bis 3). (JB)
- [4] L. Schlapbach, Uni - Fribourg: *Metallhydride als Elektroden in Batterien*. (SB)

- [5] K. Yvon, Uni - Genève: *Synthèse et caractérisation de nouveaux hydrures métalliques ternaires et quaternaires*. (JB)
- [6] B. Ziegler, SULZER, Winterthur: *H<sub>2</sub> Ortho-Para-Konversion*. (JB)
- [7] D.W.T. Rippin, ETH - Zürich: *Experimental Investigation of Multimetallic Catalysts for Hydrogen Storage Reactions including Membrane Reactors to reduce Equilibrium Restrictions*. (JB)
- [8] E. Newson, PSI - Villigen: *Messung von Wärmeübergangskoeffizienten in Reaktor-Rohren mit und ohne Rippen*. (SB)
- [9] K. Marti, HTL - Burgdorf: *Quasi-flüssige Metallhydride als Wasserstoffträger für Automobile*. (JB)
- [10] J. Jäger, LARAG, Wil: *Weiterentwicklung des Wasserstoff-Motors für das MTH-System*. (JB)
- [11] R. Minder, EWI, Zürich: *Simulationsprogramm Photovoltaik/Elektrolyseur*. (SB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden



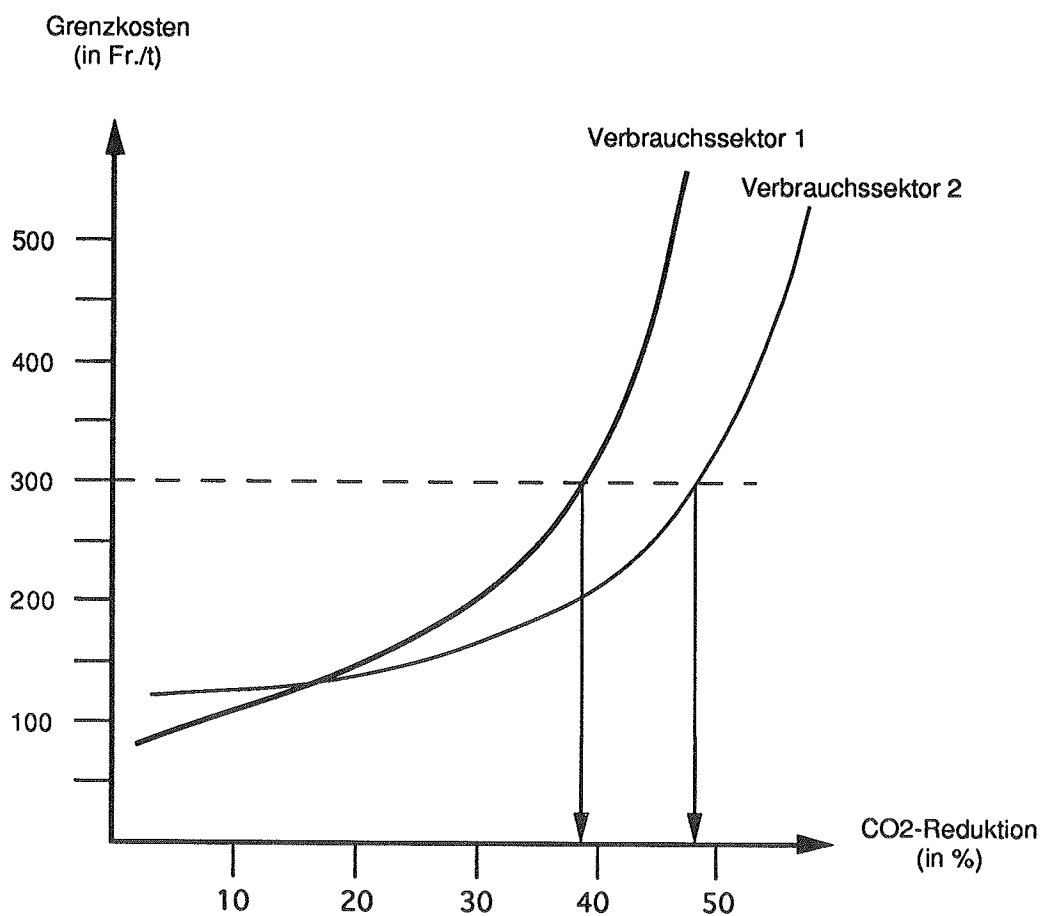


# SOZIOÖKONOMIE

Überblicksbericht  
zum Forschungsprogramm 1992

Programmleiter: W. Baumgartner

---



## Grenzkosten der CO<sub>2</sub>-Reduktion

Gesamtwirtschaftlich sollten die CO<sub>2</sub>-Emissionen in allen Verbrauchssektoren bis zu den gleichen Grenzkosten reduziert werden. Bei Fr. 300.-- je Tonne CO<sub>2</sub> entspricht dies im Verbrauchssektor 1 einer Reduktion um ca. 38%, im Verbrauchssektor 2 um ca. 48 %.

## 1. Programmübersicht

Das Thema der **sozio-ökonomischen Energieforschung** überdeckt ein weites Feld: Neben sozio-ökonomischen Fragestellungen in engeren Sinn werden auch psychologische, statistische, ökologische und technisch-ökonomische Fragen untersucht. Das sozio-ökonomische Energieforschungsprogramm des BEW dient zudem als Plattform für solche Themen, die in andern BEW-Programmen kein geeignetes Gefäss finden.

Im Rahmen der sozio-ökonomischen Energieforschung werden neben aktuellen Problemen auch Problemkreise angegangen, die über die unmittelbare Aktualität hinausweisen. Idealerweise stehen Forschungsergebnisse zu bestimmten Themen dann zur Verfügung, wenn sie von der Politik "gebraucht" werden und nicht erst geraume Zeit später. Selbstverständlich wird sich die energiepolitische Aktualität der Planung (vergl. das Konzept der sozio-ökonomischen Energieforschung [30]) immer wieder entziehen.

Die vorliegenden Ausführungen streben - schon aus Platzgründen - keinen Überblick über die gesamte sozio-ökonomische Energieforschung in der Schweiz an. Sie beschränken sich auf jene Bereiche und Projekte, mit denen der Programmleiter direkt oder indirekt zu tun hat.

## 2. Anvisierte Zielpunkte für 1992

Wie im letzten Jahr bildeten die Untersuchungen über Möglichkeiten und Auswirkungen verschiedener energiepolitischer Strategien zur Stabilisierung oder Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen einen wichtigen Schwerpunkt. Die meisten dieser Arbeiten konnten im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Verschiedene neue Aufträge beschäftigen sich mit weiteren Auswirkungen der Energiebereitstellung und des Energieverbrauchs auf die Umwelt. Ein weiterer Schwerpunkt ergab sich bei der Modellierung der Energienachfrage und weiterer damit verbundener Fragestellungen. Gesamthaft wurden - von Kleinaufträgen abgesehen - zehn neue Studienaufträge erteilt.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 1992

### DATEN

Die Verfügbarkeit guter und aktueller energie- und umweltbezogener Daten ist für viele Themen der sozio-ökonomischen Forschung zentral. Solange es sich um "klassische" Statistik-Daten (Wohnbevölkerung, Bruttoinlandprodukt, Gesamtenergieverbräuche, etc.) handelt, ist die Situation in der Schweiz recht komfortabel; ansonsten ist die Datenlage - vor allem im internationalen Vergleich - eher schlecht.

Ein erstes Projekt [1] hat zum Ziel, die Entwicklung des **Stromverbrauchs 1975 - 1985 im Dienstleistungssektor** der Stadt Zürich im Detail zu analysieren und modellmässig zu erklären. Im Berichtsjahr wurden die Branchen "Reisebüros" und "Kino und Theater" untersucht. Es zeigte sich, dass die Entwicklung bei den Reisebüros in erster Linie mit der Modernisierung und der Informatisierung der Arbeitsplätze zu tun hat. Die *extreme* Zunahme bei den Kinos und bei den Theatern konnte *nicht* endgültig geklärt werden. Besondere Beachtung galt der Frage nach der Übertragbarkeit der Studien-Resultate auf andere Regionen. Es konnte z.B. gezeigt werden, dass im *Bankensektor* eine solche Übertragung ohne weiteres möglich ist, wenn man als Bezugsgrösse (bzw. als "Hochrechnungsparameter") die *Zahl der Beschäftigten* nimmt. Diese und weitere damit zusammenhängende Fragen stehen im Zentrum des in Kürze verfügbaren Schlussberichtes. Dabei werden wichtige Hinweise für die künftige Modellierung der Elektrizitätsnachfrage im Dienstleistungssektor erwartet.

In ökologischen Bilanzbetrachtungen spielt die Umweltbelastung durch die Energiebereitstellung und den Energieverbrauch eine zentrale Rolle. Bisher gibt es für die wichtigsten Energieketten und -prozesse keine auf die schweizerischen Verhältnisse zugeschnittene, nach einheitlichen Kriterien erarbeitete Datenbasis. Im Rahmen eines mehrjährigen, vom BEW mitfinanzierten Projektes **Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung** [2] werden die in Boden, Wasser und Luft emittierten Schadstoffmengen sowie weitere Umweltfaktoren pro Einheit Energie ermittelt. Das Projekt wird bis Mitte 1993 abgeschlossen. Einige wichtige verbleibende Lücken, so etwa im Transport- und Entsorgungsbereich, werden durch neue Projekte im Rahmen des Schwerpunktprogramms UMWELT geschlossen. Im übrigen ist die Umsetzung der Resultate und die Sicherstellung einer fortlaufenden Aktualisierung der ermittelten Daten eine wichtige Aufgabe der Koordinationsgruppe des Bundes für Energie- und Ökobilanzen.

Energie- und Stoffbilanzen von Bauteilen und Gebäuden sind das Thema einer weiteren Studie im Energie- und Ökobilanzbereich [3]. Ausgehend von Arbeiten über den Energieaufwand und die Umweltbelastung von Niedrigenergiehäusern werden die Energie- und Stoffflüsse von Bauteilen und Gebäuden während ihrer gesamten Lebensdauer (von der Produktion bis zur Entsorgung) ermittelt. Im Berichtsjahr wurde der Leitfaden mit **Regeln zur Datenerfassung für Energie- und Stoffflussanalysen** sowie das Handbuch über **Methodische Grundlagen für Energie und Stoffflussanalysen** überarbeitet (vergl. [31]) und publiziert. Des weiteren wurde ein provisorischer Standarddatensatz für Emissionskoeffizienten für die Energiebereitstellung, die Energieumwandlung etc. und den wichtigsten Baumaterialien zusammengestellt und ein EDV-basiertes Hilfsmittel zur Erstellung von Energie- und Stoffbilanzen erarbeitet. Dieses Hilfsmittel wird an einem Workshop anfangs 1993 vorgestellt werden. Letztlich ist es das Ziel des Projektes, Energie- und Stoffdaten von Bauteilen und Gebäuden in die Elementgliederung des CRB (Schweiz. Zentralstelle für Baurationalisierung) zu integrieren. Der Abschluss des Projektes ist auf Ende 1993 geplant. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang auch ein vom BEW mitgesponserter internationaler Workshop *Buildings and the Environment*, der vom 27. bis 29. September 1992 in Cambridge stattfand [32].

Im Rahmen einer Vorstudie wurde ein auf der **Exergie basierender alternativer Ansatz** zur Untersuchung von Energiesystemen beleuchtet [4]. Trotz verschiedener Vorteile einer exergetischen gegenüber einer energetischen Betrachtung von Energiesystemen musste die weitere Verfolgung des Themas - primär aus Budgetgründen - zurückgestellt werden.

Schliesslich beteiligt sich das BEW an einem mehrjährigen Projekt zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen **Treibhausgasen und Klima** mittels Analysen von polaren Eiskernen [5]. Im Juli 1992 wurde auf Grönland in einer Tiefe von 3028 m das Felsbett erreicht. Das Alter des Eises in dieser Tiefe wird auf 200'000 bis 250'000 Jahre geschätzt. Die neuen Eiskerne werden es erlauben, die Umweltgeschichte der letzten zwei Klimazyklen sehr genau zu untersuchen.

## MODELLE UND PERSPEKTIVRECHNUNGEN

Als Grundlage für die Erarbeitung von CO<sub>2</sub>-Perspektiven wurden neue Energienachfrage-Perspektiven erstellt [6]. Unterschiedliche Annahmen über die volkswirtschaftlichen Rahmenbedingungen und die unterstellten energiepolitischen Massnahmen zeigen, wo die "Fixpunkte" der künftigen Entwicklung liegen und wo und in welchem Umfang ein energiepolitischer Handlungsspielraum besteht. Im übrigen wurde auch eine **Ex-post-Analyse des Energieverbrauchs** für das Jahr 1991 durchgeführt [33].

In einer anfangs 1992 abgeschlossenen Studie [7] wurden anhand von **verschiedenen Bilanzierungsansätzen die CO<sub>2</sub>-Emissionen** bestimmt, die die schweizerische Elektrizitätswirtschaft in den beiden Stichjahren 1986 und 1989 unter Berücksichtigung des Elektrizitätsaustausches mit dem umliegenden Ausland verursacht hat. Die Rechnungen basieren auf einfachen Knotenmodellen, welche den (physikalischen) Elektrizitätsfluss im In- und Ausland modellmässig nachvollziehen.

Im Berichtsjahr wurden weiter zwei Vorstudien über den Einsatz und die Weiterentwicklung von (berechenbaren) **Gleichgewichtsmodellen** durchgeführt ([8] und [9]). Gleichgewichtsmodelle dienen, vereinfacht gesagt, dazu, die volkswirtschaftlichen Auswirkungen bestimmter Massnahmen und Veränderungen (z. B. Steuern, Abgaben, Wechselkurse) vorherzusagen. Sie zeigen etwa die Veränderungen in den Wachstumsraten einzelner Branchen, ermitteln die Einnahmen des Staates und der Haushalte und geben damit ein Bild der strukturellen Effekte, die ausgelöst werden. Darüberhinaus können Gleichgewichtsmodelle auch zur Überprüfung der Konsistenz der Resultate von **Energienachfragemodellen** eingesetzt werden. Inzwischen ist basierend auf der ersten Vorstudie ein Projekt angelaufen [10], ein zweites ist in Planung.

Die neue SIA-Empfehlung 380/4 "Elektrische Energie im Hochbau" befindet sich zur Zeit in Erprobung. Sie sieht vor allem für hochtechnisierte Gebäude im Dienstleistungssektor energetische Anforderungen vor. Mit einer im Berichtsjahr gestarteten Untersuchung [11] sollen u. a. die gesamtschweizerisch zu **erwartenden Elektrizitätseinsparungen** abgeschätzt werden. Darüberhinaus werden Hinweise darauf erwartet, inwieweit im Dienstleistungssektor die Energiebezugsfläche als Hochrechnungsparameter für die Energiemodellierung geeignet ist.

Im übrigen hat sich das BEW entschlossen, den gesamten Arbeitsablauf von der Erarbeitung und fortlaufenden **Aktualisierung von Energienachfrage- und Energieangebotsmodellen** bis zur Erstellung von Energieperspektiven personell und institutionell neu zu organisieren. Eine wesentliche Randbedingung ist dabei, dass das am *Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)* in Genf erarbeitete Know-how bestmöglich genutzt wird (vergl. [34]). Bis Ende 1992 sind aber noch keine definitiven Entscheide gefällt worden. Parallel dazu wurde eine Bestandsaufnahme (Aktualisierung der Dokumentationen) der Energiemodelle des CUEPE vorgenommen [12, 13].

## KOSTEN- UND WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSEN

Mit dem inzwischen abgeschlossenen Projekt **Energiesparpotentiale und Energiesparkosten im Raumwärme- und Warmwasserbereich** [14] wurden für 20 Gebäudetypen (unterschiedliche Grösse und Nutzung, verschiedene Alterskategorien etc.) in sich stimmige Massnahmenpakete zum Energiesparen definiert und frankenmässig bewertet. Es zeigte sich u. a., dass *bei den aktuellen Energiepreisen nur wenige Massnahmenpakete effektiv wirtschaftlich sind*. Die Resultate dieser Studie wurden u. a. als Input für die CO<sub>2</sub>-Arbeiten verwendet (die Gebäudetypen wurden so gewählt, dass eine Hochrechnung auf die ganze Schweiz relativ leicht möglich ist). Die Resultate sollen auch als *bottom-up*-mässig gestützte Substitutionselastizitäten in die Gleichgewichtsmodelle eingebaut werden.

Das Auftreten von negativen Externalitäten gehört zu den wichtigsten Beweggründen für staatliche Eingriffe im Energiebereich. Insofern diese Externalitäten als Emission in Erscheinung treten, werden sie im Rahmen der Energieforschung des BEW durch Projekte im Energie- und Ökobilanzbereich abgedeckt (vergl. die Projekte [2] und [4]). Über die mit diesen Emissionen verbundenen Kosten (etwa durch die damit verursachten Schäden) wird nichts ausgesagt. Diese Lücke wird durch die Studie **Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung** [15] geschlossen: Für die wichtigsten Energiesysteme werden die externen Kosten als Schadenskosten (beim CO<sub>2</sub> als Vermeidungskosten) quantitativ ermittelt und auf die Energiepreise umgelegt. Im Berichtsjahr wurden für fossile Brennstoffe die externen Effekte in den Bereichen Wald, Landwirtschaft, Gesundheit und Gebäudeschäden sowie die Externalitäten aus der Nutzung der Kernenergie im Normalbetrieb und im Störfall ermittelt. Das Projekt soll im Sommer 1993 fertiggestellt sein.

## MASSNAHMEN

Bei der Untersuchung von energiepolitischen Massnahmen stehen folgende Fragen im Vordergrund: Wie sehen die Massnahmen konkret aus? Wie sollen sie eingeführt werden? Mit welchen Wirkungen und Nebenwirkungen ist zu rechnen?

Zwei Studien hatten technische, **organisatorische und vollzugsorientierte Fragen** im Zusammenhang mit einer möglichen Limitierung des spezifischen Treibstoffverbrauchs von Personenwagen zum Gegenstand [16, 17].

Eine weitere Studie **im Verkehrsbereich** beschäftigte sich mit den **direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen** [18]. Ein Teilbericht thematisiert für den Flugverkehr die wichtigsten Einflussfaktoren sowie die Einsparpotentiale bei Technik und Flugbetrieb. Eine Diskussion möglicher Massnahmen und ihrer mutmasslichen Wirkungen rundet den Bericht ab. Ein anderer Teilbericht bezieht sich auf die Neue Alpentransversale (NEAT). In einem letzten Teilbericht wurden schliesslich in parametrisierter Form für verschiedene CO<sub>2</sub>-Reduktionswerte die zugehörigen Kosten abgeschätzt. Diese "Parameterstudie" diente als Grundlage für die bereichsübergreifende Optimierung einer CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie: Indem spar- und angebotsbezogene Kosten verschiedener Nachfrage- und Angebotssektoren einander gegenübergestellt wurden, liessen sich Überlegungen zu einem optimalen Mitteleinsatz mit Blick auf eine möglichst **effiziente CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie** anstellen und die volkswirtschaftlichen Wirkungen in grober Näherung abschätzen [19].

## PILOT- UND FELDVERSUCHE

In diesem Themenbereich werden Projekte zusammengefasst, die als Umfragen, Erhebungen, Bereitstellung von Beratungsinstrumenten oder Ähnlichem viele aktiv Beteiligte betreffen.

In Ergänzung zum oben erwähnten Projekt über die Externalitäten der Wärme und Stromversorgung wurde im Rahmen einer Vorstudie [20] abgeklärt, inwiefern in bestimmten Bereichen der energiebedingten Externalitäten über Zahlungsbereitschaften Hinweise auf die **Grösse von externen Kosten** gewonnen werden könnten. Aufgrund der Resultate dieser Vorstudie wurde schliesslich eine eigenständige Untersuchung über die **Monetäre Bewertung des Treibhauseffektes mittels der Erfassung von Zahlungsbereitschaften** [21] gestartet. Dabei wird u. a. die Zahlungsbereitschaft für eine definierte Verminderung des Treibhauseffektes ermittelt. In einer Prüffrage wird die geäusserte Zahlungsbereitschaft mit der damit verbundenen Einkommenseinbusse in Verbindung gebracht, um unrealistische Antworten eliminieren zu können. Die Hauptbefragung wird im Frühling 1993 durchgeführt werden, der Abschluss der Studie ist auf Herbst 1993 geplant.

Im Rahmen eines gemeinsamen Projektes mit RAVEL, der Informationsstelle für Elektrizitätsverwertung (INFEL) und dem Energiekonsumentenverband (EKV) ist ein Leitfaden für eine effiziente und transparente **Energieverbrauchserfassung in mittleren und kleineren Industriebetrieben** erarbeitet worden [22]. Die Erfassung soll neben der Elektrizität (inkl. Eigenerzeugung), die fossilen Brennstoffe, die Fernwärme und die nutzbare Abwärme betreffen. Die verbesserte Energieerfassung wird dem Betrieb dabei helfen, Schwachstellen bei der Versorgungssicherheit, bei energieintensiven Verfahren oder beim Benutzerverhalten aufzudecken. Darüberhinaus werden verschiedene Verbesserungsvorschläge für die EKV-Statistik erarbeitet. Ein Entscheid über das weitere Vorgehen ist pendent.

Die Realisierung von wirtschaftlichen Energiesparmassnahmen scheitert oft daran, dass Investitionen in die Produktion vorgezogen werden, dass am technischen Erfolg von Sparmassnahmen gezweifelt wird, dass das Investitionsrisiko für Sparmassnahmen dem Anlagenbetreiber zu hoch oder dass die Erfolgskontrolle für ihn zu aufwendig ist. Mit dem **Einbezug eines "Drittinvestors"** könnten die aufgezählten Hinderungsgründe zu einem grossen Teil ausgeschaltet werden: Der Drittinvestor übernimmt Planung, Finanzierung und Realisierung des Projektes sowie die Erfolgskontrolle. Im Rahmen einer Voruntersuchung [23] wurden in Abstimmung mit einem analogen RAVEL-Projekt die Marktchancen des Finanzierungsinstrumentes "Drittinvestor" im schweizerischen Kontext untersucht. Aus der Befragungen von Energiefachstellen, privaten Büros, Genossenschaften und Banken in der Schweiz scheint sich ein starkes Interesse für ein solches Finanzierungsinstrument ableiten zu lassen. Zur Zeit ist für ein konkretes Projekt ein Gesuch zur Finanzierung des Monitorings hängig.

Bis heute gibt es kaum einheitliche Vertragsunterlagen für den Netzparallelbetrieb elektrischer Erzeuger, sowie für die Lieferung von Wärme aus dezentralen Wärmekraftkopplungsanlagen (WKK-Anlagen, bzw. Eigenerzeugungsanlagen). Für jede Anlage wurden jeweils weitgehend neue Vertragsunterlagen ausgearbeitet. Es fehlten klare, aber trotzdem flexible Modelle für die Festlegung von Anschlussbeiträgen, Grundgebühren und Wärmepreisen für verschiedene Betriebsmodelle. Das Projekt **Standard-Verträge für WKK-Anlagen** [24] soll hier Abhilfe schaffen. Die folgenden Verträge sind bereinigt und stehen zur Verfügung: Muster-Anschluss-Vertrag für Selbstversorger (Elektrizität), Muster-Wärmeliefer-Vertrag für WKK-Anlagen und Muster-Service-Vertrag für WKK-Anlagen.

## ERFOLGSKONTROLLE

Mit der Einführung einer (energiepolitischen) Massnahme wird die "Erfolgskontrolle" zum Thema. Inhaltlich können dabei etwas vereinfacht vier Problemkreise unterschieden werden: a) Wird die Massnahme überhaupt durchgeführt (Vollzugsevaluation) ? b) Welche Wirkungen und Nebenwirkungen sind zu beobachten (Wirkungsevaluation) ? c) Werden die Ziele erreicht (Zielerreichungsevaluation) ? d) In welchem Verhältnis steht der Aufwand zum Ertrag (Effizienzevaluation) ?

Mit Blick auf die nächste Zwischenbilanz 1993 des "Energiepolitischen Programms" sollen in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe "Erfolgskontrolle" der Konferenz der kantonalen Energiefachstellen mögliche Schwachstellen im Vollzug und in der Umsetzung der energierechtlichen Bestimmungen im Baubereich in verschiedenen Kantonen aufgezeigt werden. Mit dem anfangs 1991 erteilten Studienauftrag [25] wird einerseits eine methodische Abstimmung der daran beteiligten Kantone erreicht, andererseits ein **kantonsübergreifender**

Quervergleich angestrebt. Die Studie soll Bund, Kantonen und Gemeinden Hinweise für gegebenenfalls notwendige Massnahmen zur mittelfristigen Verbesserung der energetischen Bauqualität geben.

Im Aktionsprogramm ENERGIE 2000 wird der Erfolgskontrolle eine grosse Bedeutung beigemessen. Eine grössere Vorstudie galt der Erarbeitung der methodischen und vorgehensmässigen Grundlagen für die **Vollzugsevaluation** [26]. Ausgehend von den vielen verschiedenen Ansätzen und Methoden wurde eine Systematik entwickelt, mit der sich diese ordnen und später als Grundlage für die praktische Evaluation von ENERGIE 2000 verwenden lassen. Die Studie hat ergeben, dass das Programm nicht als Ganzes evaluiert werden kann, sich die Evaluation also auf bestimmte Bereiche und bestimmte Massnahmen beschränken muss. Für drei Massnahmen wurden eigentliche Evaluationskonzepte entwickelt. Ein weiterer Auftrag zielte auf die Bereitstellung von Grundlagen für eine technisch-ökonomisch orientierte **Wirkungsevaluation** [27]. Spezielles Gewicht wurde hierbei auf die Untersuchung der Datenlage im Gebäudebereich gelegt.

Anhand von 25'000 ausgewerteten Bauten im Kanton Zürich konnte im Rahmen einer kleinen Untersuchung u. a. gezeigt werden, dass der spezifische Raumheizungsbedarf bei Neubauten, die 1985 erstellt wurden, im Vergleich zu Neubauten aus dem Jahre 1975 um 36% kleiner ausfällt [28]. Zudem zeigte sich, dass die Annahmen der EGES über die Fortschritte beim Energiesparen im Gebäudebereich von der Wirklichkeit z. T. bereits überholt worden sind.

Eine ganz andere Art von Erfolgskontrolle betrifft die Untersuchung der **Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage** [29]. In einem mehrjährigen Projekt sollen die kurz- und mittelfristigen Reaktionen der Elektrizitätsnachfrage der Haushalte untersucht werden. Hierzu werden in den drei Städten Zürich, Bern und Basel Tarif-, Verbrauchs- und Klimadaten sowie weitere sozio-ökonomische Bestimmungsgrössen wie Haushaltsausgaben, Gerätebestände, Grösse des Haushaltes, Wohnfläche etc. auf der Ebene einzelner Haushalte zusammengeführt und analysiert.

#### 4. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit im sozio-ökonomischen Bereich wird über zwei Pfade gesichert: Zum einen werden grössere Projekte in aller Regel auf verschiedene Studiennehmer aufgeteilt, zum andern wird die Finanzierung eines grösseren Projektes meist von zwei oder mehreren Institutionen getragen.

Die internationale Einbindung der sozio-ökonomischen Arbeiten versteht sich von selbst: Die Aufarbeitung der internationalen Erkenntnisse steht fast immer am Anfang einer Studienbearbeitung. Ein Paradebeispiel bilden die Untersuchungen zu den Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung, wo der Transfer und die Anpassung ausländischen Know-hows in verschiedenen Bereichen die einzige Möglichkeit darstellt, bei eher bescheidenen Budgets neue Erkenntnisse für die Schweiz zu erarbeiten. Zudem wird der Einbezug ausländischer Institute und Beratungsfirmen nach Möglichkeit gefördert.

#### 4. Umsetzung

In vielen Fällen ist die Umsetzung der sozio-ökonomischen Forschungsergebnisse durch den Auftragszusammenhang von vornherein sichergestellt, etwa bei den CO<sub>2</sub>-Untersuchungen, den Projekten im Rahmen von Pilot- und Feldversuchen oder der Erfolgskontrolle im Rahmen des Aktionsprogramms ENERGIE 2000. Darüberhinaus sind zur Umsetzung der Erkenntnisse eigenständige Aktivitäten nötig, wie Seminare, Workshops, Unterstützung von Publikationen usw. Im Berichtsjahr wurden verschiedene solcher Aktivitäten durchgeführt; die Anstrengungen sind aber noch zu verstärken.

## 5. Bewertung 1992 und Ausblick 1993

Die sozio-ökonomische Energieforschung des BEW hat sich im Berichtsjahr weiter konsolidiert. Verschiedene, auch für ein breiteres Publikum interessante Projekte konnten zum Abschluss gebracht, andere Projekte konnten neu in die Wege geleitet werden, auch wenn angesichts der finanziell angespannten Lage des Bundes hierbei gewisse Abstriche vorgenommen werden mussten. *Dennoch wurden - bis auf den Industriebereich - die im letzten Jahresbericht genannten Zielpunkte erreicht.*

Für 1993 zeichnen sich Schwerpunkte im Industriebereich und bei der Energiemodellierung ab. Zudem muss der Umsetzung der erarbeiteten Erkenntnis noch stärkeres Gewicht gegeben werden.

## 6. Liste der Projekte

- [1] B. Aebischer, D. Spreng, ETH - Zürich: *Darstellung, Analyse und Modellierung des Elektrizitätsverbrauchs im Dienstleistungssektor einer grossen Schweizer Stadt.* (JB)
- [2] P. Suter, LES / ETH - Zürich: *Umweltbelastung durch die End- und Nutzenergiebereitstellung.* (JB)
- [3] N. Kohler, LESO / ETH-Lausanne: *Energie- und Stoffbilanzen von Bauteilen und Gebäuden.* (JB)
- [4] M. R. von Spakovsky, D. Favrat, M.V. Curti, LEI / ETH - Lausanne: *Méthode globale d'évaluation des systèmes énergétique, basée sur l'approche exergétique étendue à des considérations économiques et environnementales.* (SB)
- [5] B. Stauffer, Uni - Bern: *Treibhausgase und Klima.* (JB)
- [6] B. Giovannini, CUEPE, Genf: *Perspectives de la demande d'énergie en Suisse, 1990 - 2025, en vue du problème du CO<sub>2</sub>.* (SB)
- [7] B. Covelli, TECOVA, Wohlen: *CO<sub>2</sub>-Bilanzierung der Elektrizität unter Berücksichtigung des Aussenhandels.* (JB)
- [8] M. Garbely, T. Müller, F. Carlevaro, CUEPE, Genf: *Vers une modélisation en équilibre général des mesures de politique énergétique en Suisse.* (SB)
- [9] S. Felder, ECOPLAN, Bern: *Möglichkeiten und Grenzen von allgemeinen Gleichgewichtsmodellen zur Untersuchung von energiepolitischen Massnahmen.* (SB)
- [10] F. Carlevaro, CUEPE, Genf: *Evaluation en équilibre général des mesures de politique énergétique en Suisse.* (JB)
- [11] E. A. Müller, C.U. BRUNNER, Zürich: *Quantifizierung der Elektrizitätseinsparung als Folge der neuen SIA-Empfehlung 380/4.* (JB)
- [12] F. Carlevaro, CUEPE, Genf: *Bestandsaufnahme der heute benützten ökonometrischen Modelle des CUEPE.* (JB)
- [13] B. Giovannini, CUEPE, Genf: *Bestandsaufnahme der heute benützten technisch-ökonomischen Modelle des CUEPE.* (SB)
- [14] W. Moser, BASLER & HOFMANN, Zürich: *Energiesparpotentiale und Energiesparkosten im Raumwärme- und Warmwasserbereich.* (SB)
- [15] W. Ott, INFRAS, Zürich & K. Masuhr, PROGNOSE, Basel: *Externalitäten der Wärme- und Stromversorgung.* (JB)
- [16] J. Czerwinski, HTL - Biel: *Limitierung des Treibstoffverbrauchs der Personenwagen* (technische Fragen). (SB)
- [17] P. Marti, METRON RAUMPLANUNG, Brugg-Windisch: *Limitierung des Treibstoffverbrauchs der Personenwagen* (Auswirkungen, Vollzug). (SB)
- [18] M. Keller, INFRAS, Bern: *CO<sub>2</sub>-Perspektiven Verkehr.* (SB)
- [19] K. Masuhr und M. Sättler, PROGNOSE, Basel: *Untersuchungen der Substitutionsmöglichkeiten zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen im Wärmesektor und Gesamtoptimierung einer CO<sub>2</sub>-Strategie.* (SB)

- [20] W. Ott, INFRAS, Zürich: *Vorstudie über die Bewertung von Externalitäten im Energiebereich mittels der Erfassung von Zahlungsbereitschaften.* (SB)
- [21] W. Ott, INFRAS & M. Peters, IPSO, Zürich: *Monetäre Bewertung des Treibhauseffektes mittels der Erfassung von Zahlungsbereitschaften.* (JB)
- [22] Ch. Bélaz, A. Huser, ARGE COLENCO-INFEL, Baden und Zürich: *Betriebliche Energieverbrauchserfassung, RAVEL-Projekt 12.52.* (JB + SB)
- [23] G. Grünstein, SUTER + SUTER, Basel: *Drittinvestor.* (SB)
- [24] Hp. Eicher, EICHER & PAULI, Liestal: *Standard-Verträge für WKK-Anlagen.* (JB)
- [25] A. Baumgartner, INTEP, Zürich: *Koordination und Gesamtauswertung der Vollzugs- und Ausführungskontrolle kantonaler Vorschriften im Baubereich.* (JB)
- [26] W. Linder, Uni - Bern: *Vorprojekt Vollzugsevaluation .* (JB + SB)
- [27] B. Aebischer, ETH - Zürich: *Evaluation (Vollzug, Wirksamkeit) des Aktionsprogramms.* (JB + SB)
- [28] C. U. Brunner, E. A. Müller, C.U. BRUNNER, Zürich: *Entwicklung des Raumwärmeverbrauchs von Neubauten und bestehenden Bauten.* (SB)
- [29] P. Zweifel, Uni - Zürich: *Auswirkungen einer grenzkostenorientierten Tarifrevision auf die Elektrizitätsnachfrage.* (JB)

(JB) Jahresbericht 1992 vorhanden  
 (SB) Schlussbericht vorhanden

## 7. Referenzen

- [30] W. Baumgartner, IBFG, Zürich: *Sozio-ökonomische Energieforschung SÖEF, BEW-Forschungsprogramm 92 - 95*, Dezember 1991.
- [31] BASLER & HOFMANN, Zürich: *Workshop Energie- und Ökobilanzen 14. und 15. November 1991 - Statusbericht*, Juni 1992.
- [32] *Buildings and the Environment - An International Research Meeting, Participant's Information Package*, 27 - 29th September 1992, Queen's College, Uni - Cambridge, UK.
- [33] F. Carlevaro et B. Giovannini, CUEPE, Genf: *Analyse de l'évolution de la consommation d'énergie en Suisse en 1991 d'après les modèles du CUEPE*, August 1992.
- [34] F. Carlevaro et B. Giovannini, CUEPE, Genf: *Propositions pour un développement de la demande d'énergie en Suisse*, Septembre 1992.



## Annexe / Anhang

### ADRESSES DES CHEFS DE PROGRAMME

### ADRESSEN DER PROGRAMMLEITER

---

Utilisation rationnelle de l'énergie dans les bâtiments

Rationelle Energienutzung in Gebäuden

**Markus ZIMMERMANN**, dipl. Arch. ETH, KWH / EMPA, 8600 Dübendorf

Tel 01 / 823 41 78 Fax 01 / 821 62 44

Utilisation rationnelle de l'énergie dans les transports

Rationelle Energienutzung im Verkehr

**Bruno ALBRECHT**, dipl. Bau-Ing. ETH, ALBRECHT+PARTNER AG, Waldstätterstrasse 9, 6003 Luzern

Tel 041 / 23 90 92 Fax 041 / 23 05 71

Valorisation de la chaleur ambiante, rejets thermiques et installations chaleur-force

Umgebungs- & Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung

*bis 31.3.1993 :*

**Ulrich SCHÄRER**, dipl. Masch.-Ing. HTL, BEW, 3003 Bern

Tel 031 / 61 56 59 Fax 031 / 26 44 03

*ab 1.4.1993 :*

**Martin ZOGG**, Prof. Dr. sc. techn. ETH, Ingenieurschule Burgdorf, 3400 Burgdorf

Tel 034 / 21 42 88 oder 22 07 85 Fax 034 / 23 15 13

Combustion

Feuerung & Verbrennung

**Alphons HINTERMANN**, Dr. Phys. ETH, BEW, 3003 Bern

Tel 031 / 61 56 54 Fax 031 / 26 44 03

Technique atomique et sécurité nucléaire

Kerntechnik und nukleare Sicherheit

**Wolfgang KRÖGER**, Prof. Dr. Ing., PSI, 5232 Villigen

Tel 056 / 99 27 42 Fax 056 / 98 23 27

Recherches réglementaires de la DSN en matière de sécurité

Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK

**Sabyasachi CHAKRABORTY**, dipl. Phys., HSK, 5232 Villigen

Tel 056 / 99 39 36 Fax 056 / 99 39 95

Solaire thermique et stockage de chaleur

Aktive Solarnutzung & Wärmespeicherung

**Pierre BREMER**, dipl. ing. méc. EPF, SEDE S. A., Rue du Midi 33, 1800 Vevey

Tél 021 / 921 05 15 Fax 021 / 921 95 57

Architecture solaire

Solararchitektur

**Robert HASTINGS**, Arch., M. Sc., HBT / ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

Tel 01 / 377 29 88 Fax 01 / 371 55 48

Photovoltaïque

Photovoltaik

*jusqu'au 31.8.1993 :*

**Christophe de REYFF**, Dr, physico-chim., OFEN, 3003 Berne

Tél 031 / 61 56 66 Fax 031 / 26 44 03

*à partir du 1.9.1993 :*

**Stefan NOWAK**, Dr, Phys., Université de Fribourg, Pérolles, 1700 Fribourg

Tel 037 / 82 65 71 Fax 037 / 82 65 19

Thermochimie

Thermochemie

**Armin RELLER**, Prof., Dr., Chem., A.C.I., Winterthurerstr.190, 8057 Zürich

Tel 01 / 257 46 17 oder 0049 40 / 41 23 31 03 Fax 0049 40 / 41 23 28 93

Photochimie

Photochemie

**Jean-Claude COURVOISIER**, Dr, phys., 13 rue François-Jacquier, 1225 Chêne-Bourg

Tél 022 / 349 38 49

Biomasse

Biomasse

**Michel ROUX**, dipl. ing. él. EPF, OFEN, 3003 Berne

Tél 031 / 61 56 24 Fax 031 / 26 44 03

Géothermie

Geothermie

**Harald L. GORHAN**, Dr., Geol., EWI, Bellerivestr. 36, Postfach, 8034 Zürich

Tél 01 / 385 27 33 Fax 01 / 385 26 54

Fusion nucléaire contrôlée

Kontrollierte Kernfusion

**Paul ZINSLI**, Dr., Phys., BBW, 3003 Bern

Tel 031 / 61 96 53 Fax 031 / 61 78 54

Électricité

Elektrizität

**Roland BRÜNIGER**, dipl. El.-Ing. ETH/BWI, Isenbergstr. 30, 8913 Ottenbach

Tel 01 / 760 00 66 Fax 01 / 760 00 68

Piles à combustible

Brennstoffzellen

**Léo DUBAL**, Dr, phys., OFEN, 3003 Berne

Tél 031 / 61 56 44 Fax 031 / 26 44 03

Électrochimie

Elektrochemie

**Otto HAAS**, Dr., Chem., P.S.I., 5232 Villigen PSI

Tel 056 / 99 24 72 Fax 056 / 98 23 27

Hydrogène

Wasserstoff

**Thomas SCHUCAN**, Dr., Phys., P.S.I., 5232 Villigen PSI

Tel 056 / 99 27 43 Fax 056 / 98 23 27

Socioéconomie

Sozioökonomie

**Walter BAUMGARTNER**, Dr., sc. nat., IBFG AG, Postfach 176, 8035 Zürich

Tel 01 / 362 99 00 Fax 01 / 363 22 87

Renseignements généraux sur la recherche énergétique

Allgemeine Auskünfte über die Energieforschung

**Gerhard SCHRIBER**, Dr., Phys., BEW, 3003 Bern

Tel 031 / 61 56 58 Fax 031 / 26 44 03

Centre de distribution pour les rapports annuels et finaux de recherche énergétique

Bezugsort für Jahres- und Schlussberichte aus der Energieforschung

**ENET**, c/o OFEN, 3003 Berne

Tél 031 / 44 19 00 Fax 031 / 44 77 56

Éditeur / Herausgeber : Léo Dubal, OFEN, 3003 Berne

Distribution / Bezugsquelle : ENET, c/o OFEN, 3003 Berne