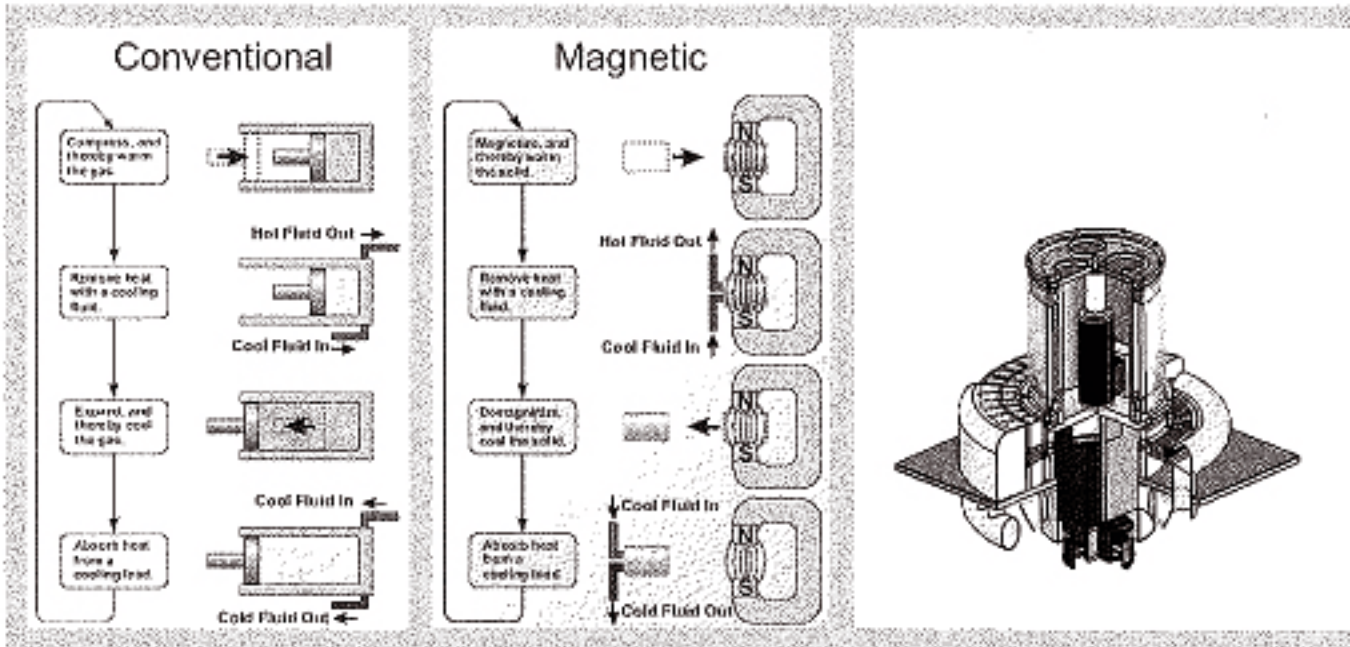
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Energie-Forschung 2005
Recherche énergétique

Überblicksberichte der Programmleiter
Rapports de synthèse des chefs de programme



Revolution bei der Wärmepumpentechnologie
Révolution technologique pour les pompes à chaleur

Allgemeine Auskünfte über Forschung und Entwicklung (F+E) und Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D) im Energiebereich

Andreas Gut, BFE, 3003 Bern
Tel. 031 322 53 24 Fax 031 323 25 00

Renseignements généraux sur la recherche et le développement (R+D) et sur les projets pilotes et de démonstration (P+D) dans le domaine de l'énergie :

Christophe de Reyff, OFEN, 3003 Berne
tél. 031 322 56 66 fax 031 323 25 00

Bezugsort für Berichte / Centre de distribution pour les rapports:

BFE, Sektion Kommunikation, 3003 Bern,
OFEN, Section Communication, 3003 Berne,
www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung

31.5.2006

ENERGIEFORSCHUNG
RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE
2005

Vorwort / Avant-propos 3

Fortschritte der Energieforschung 2005 / Survol de la recherche énergétique en 2005 4

Überblicksberichte der Programmleiter / Rapports de synthèse des chefs de programme

RATIONELLE ENERGIE-NUTZUNG / UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE	Rationelle Energienutzung in Gebäuden	11
	Verkehr und Akkumulatoren	21
	Elektrizität	33
	Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte	45
	Feuerung und Verbrennung	57
	Brennstoffzellen	71
	Verfahrenstechnische Prozesse	83
ERNEUERBARE ENERGIEN / SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES	Solaire actif : chaleur et stockage de chaleur	89
	Photovoltaik	101
	Solarchemie / Wasserstoff	117
	Biomasse	125
	Kleinwasserkraftwerke	135
	Geothermie	143
	Windenergienutzung	153
KERNENERGIE / ÉNERGIE NUCLÉAIRE	Nukleare Sicherheit und Entsorgung	159
	Regulatorische Sicherheitsforschung	169
	Fusion thermonucléaire contrôlée	183
ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN / FONDEMENTS DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE	Energiewirtschaftliche Grundlagen	189

Anhänge / Annexes

Abkürzungen / Sigles 197

Energieforschungsorganisation (F+E & P+D) / Organisation de la recherche énergétique (R+D & P+D) 198

Wichtige Adressen / Adresses importantes 199

VORWORT

Die Energieforschung der öffentlichen Hand der Schweiz richtet sich nach dem *Konzept der Energieforschung des Bundes*. Für die Umsetzung des Konzepts ist das Bundesamt für Energie (BFE) zuständig. Es verfügt dafür über eigene Fördermittel, die subsidiär zu den Anstrengungen der privaten und öffentlichen Forschungsstellen eingesetzt werden. Die Betreuung der verschiedenen *Forschungs- und Entwicklungsprogramme (F+E)* sowie der *Pilot- und Demonstrationsprogramme (P+D)* obliegt BFE-internen und -externen Programmleitern. Neben der Energieforschung ist das BFE mit dem Programm *EnergieSchweiz* auch in der Markteinführung tätig. Jedes Forschungsprogramm ist in einen Technologiebereich eingegliedert, in dem Forschung, Entwicklung, Demonstration und Markteinführung von einem BFE-internen Bereichsleiter koordiniert werden. Eine Übersicht über die Organisation mit den Kontaktadressen findet sich im Anhang.

Die Projektliste der Energieforschung des Bundes 2002/2003 gibt Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse. Die Gesamtzahlen für 2004 und 2005 liegen noch nicht vor; sie dürften jedoch infolge Kürzungen im P+D-Bereich geringer ausfallen als in der Vorjahren. Schätzungen für 2005: 180 Mio. CHF, wovon 15 Mio. Franken für P+D-Projekte. Die entsprechenden Aufwendungen des BFE betrugen 26 bzw. 4 Mio. CHF.

Der vorliegende Band enthält die Jahres-Überblicksberichte der BFE-Programmleiter. Darin sind die Fortschritte in denjenigen Projekten beschrieben, welche durch das BFE mitfinanziert worden sind. Enthalten sind aber auch Hinweise auf andere mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten. Dieser Bericht kann – zusammen mit weiteren Publikationen – auch auf der Internetseite: www.energieforschung.ch (Themen: Überblicksberichte) eingesehen und heruntergeladen werden. Der Fortschritt einzelner Projekte kann in den Projekt-Jahresberichten (JB) verfolgt werden, die von den entsprechenden Programmleitern via Internet abgegeben werden. Die Projekt-Schlussberichte (SB) können beim BFE bezogen werden (Datenbank Energieforschung): www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=de). Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist – unter Angabe der Quelle – gestattet.

Mai 2006
BUNDESAMT FÜR ENERGIE

Titelbild : *Prinzip des klassischen thermodynamischen Prozesses und dessen magnetischen Analogons für eine Wärmepumpe (Quelle: Peter W. Egolf, HEIG-VD, 2005, adaptiert)*

AVANT-PROPOS

Le *Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération* est le fil conducteur de la recherche soutenue par les pouvoirs publics dans le domaine de l'énergie en Suisse. Sa mise en pratique incombe à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) qui dispose, à cette fin, de moyens propres engagés de façon subsidiaire à ceux des institutions de recherche tant privées que publiques. La gestion des divers programmes de *recherche et développement* (R+D) et de ceux pour les *installations pilotes et de démonstration* (P+D) relève de responsables internes ou externes à l'OFEN. Par ailleurs, outre la recherche énergétique, l'OFEN est actif dans la promotion des technologies sur le marché, par le biais du programme *SuisseEnergie*. Chaque programme de recherche est rattaché à un domaine technologique spécifique, dont le responsable interne à l'OFEN coordonne la recherche, le développement, la démonstration et l'introduction sur le marché. On trouvera, en annexe, un survol de l'organisation avec les adresses de contact.

La Liste des projets de la recherche énergétique de la Confédération 2002/2003 donne des renseignements sur les dépenses des pouvoirs publics pour la recherche énergétique, ainsi qu'une revue détaillée des montants provenant des diverses sources de financement. Les chiffres pour 2004 et 2005 ne sont pas encore connus ; à la suite de coupes budgétaires dans le domaine P+D, ils doivent être plus petits que ceux des années précédentes. Estimations pour 2005 : 180 MCHF, dont 15 MCHF pour les projets P+D. Les dépenses de l'OFEN se montaient à 26 MCHF dont 4 MCHF pour les projets P+D.

Le présent volume comprend les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrits les progrès accomplis dans les divers projets cofinancés par l'OFEN. Il y est également fait mention des travaux de RD&D réalisés avec d'autres moyens publics et/ou privés. Ce rapport peut être consulté et déchargé – tout comme d'autres publications – sur le site Internet : www.recherche-energetique.ch (Thème : Rapports de synthèse). La plupart des rapports annuels (RA) des projets individuels, cités dans les rapports de synthèse, sont aussi téléchargeables. Les rapports finals (RF) des projets se trouvent aussi sur le site Internet de l'OFEN (Base de données Recherche énergétique) :
www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=fr. La reproduction d'extraits du présent document est autorisée – à condition d'en indiquer la source.

Mai 2006
OFFICE FÉDÉRAL DE L'ÉNERGIE

Page de titre : *principe du fonctionnement thermodynamique conventionnel et de son analogue magnétique pour une pompe à chaleur (source : adaptation de Peter W. Egolf, HIEG-VD, 2005*

FORTSCHRITTE DER ENERGIEFORSCHUNG 2005

SURVOL DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE EN 2005

GERHARD SCHRIBER – ANDREAS GUT – CHRISTOPHE DE REYFF
FORSCHUNGSKOORDINATION BFE / COORDINATION DE LA RECHERCHE OFEN

Energieforschung gilt als Schlüsselfunktion einer nachhaltigen Entwicklung. Ohne Verbesserung bereits bewährter und Anwendung neuer Technologien bleibt die Vision einer langfristig umweltverträglichen Energieversorgung eine blosse Absichtserklärung. Dieser Herausforderung entsprechend orientiert sich die Energieforschung an einem weiten Zeithorizont. Der Blick in die Zukunft weist den Weg, doch alle Erfolge, auch spektakuläre, sind letztlich eine Folge von kleinen Schritten. Insofern ist Stetigkeit in den Arbeiten eine der wichtigsten Bedingungen der Energieforschung.

Die Sicherung dieser Kontinuität gehört zu den zentralen Aufgaben der BFE-Forschungskoordination. Gemeinsam mit seinen Programmleitern obliegt dem BFE zudem die Koordination der Arbeiten im nationalen und internationalen Kontext sowie die Vernetzung von Forschungsaktivitäten der Wirtschaft und der öffentlichen Hand.

Die infolge von Sparmassnahmen entstandene Lähmung des Transfers der Forschungsergebnisse in die Praxis (Streichung von Mitteln für Pilot- und Demonstrationsprojekte) konnte 2005 noch nicht geheilt werden. Neue Finanzierungswege werden gesucht. Die Resultate der Forschungsarbeiten lassen sich jedoch – auch im internationalen Vergleich – sehr wohl sehen. Die im vorliegenden Bericht dokumentierten beachtlichen Leistungen sind nur durch das uneingeschränkte Engagement aller Beteiligten – Programmleiter und Energieforscher – möglich.

Nachfolgend ist eine Auswahl von Projekten und deren relevante Ergebnisse aufgezeigt. Sie stecken das breite Feld der Energieforschung ab. Zudem belegen die Projekte den hohen wissenschaftlich-technischen Stand der beteiligten Stellen. Eine umfassende Darstellung von Projekten und Resultaten findet sich in der Berichterstattung der BFE-Programmleiter. Über Energieforschung der öffentlichen Hand wird auch im Jahresbericht der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE sowie in Publikationen des ETH-Bereiches berichtet.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG

Transparente Fassaden sind aus dem aktuellen Hausbau kaum mehr wegzudenken. Nachteilig an diesem architektonischen Konzept sind hohe Energieeinträge aufgrund der Wärmestrahlung durch die Fenster. Die Minderung dieses Effektes

La recherche énergétique occupe une position clé sur la voie du développement durable. Sans l'amélioration des techniques déjà éprouvées et l'application de technologies nouvelles, la vision d'un approvisionnement énergétique, compatible à long terme avec les exigences de l'environnement, restera une pure déclaration d'intention. Relevant ce défi, la recherche énergétique se base sur des objectifs à long terme. Le regard sur l'avenir donne le ton ; pourtant, tous les résultats, aussi spectaculaires soient-ils, ne sont finalement obtenus que par une succession de petits pas. C'est pourquoi la continuité de l'effort est si importante pour la recherche énergétique.

Assurer cette continuité est l'une des tâches primordiales de la coordination de la recherche à l'OFEN. À côté de cela, cet office, conjointement avec ses chefs de programmes, coordonne les travaux dans leur contexte national et international et s'occupe de la mise en réseau des activités de recherche de l'économie et de celles des pouvoirs publics.

En 2005, le transfert à la pratique des résultats de la recherche était encore et toujours paralysé par la suppression du financement des projets pilotes et de démonstration résultant des mesures d'allégement budgétaire. La recherche de nouvelles sources de financement est en cours. Malgré tout, le niveau des résultats de la recherche soutient parfaitement la comparaison, au plan international également. Les performances remarquables présentées dans ce rapport ne sont possibles que grâce à l'engagement sans limite de tous les intervenants, du chef de programme au chercheur.

Nous présentons ci-après un choix de projets avec leurs résultats. Ils montrent toute l'étendue des thèmes abordés par la recherche énergétique et le haut niveau scientifique et technique atteint par les chercheurs. La description complète des projets et des résultats est publiée dans les rapports de synthèse des chefs des programmes. Le lecteur trouvera d'autres considérations sur la recherche énergétique publique dans le rapport annuel de la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) ainsi que dans des publications du Domaine des Écoles polytechniques fédérales.

UTILISATION RATIONELLE DE L'ÉNERGIE

La construction de logements ne se conçoit pour ainsi dire plus aujourd'hui sans **façades transpa-**

durch übliche Sonnenschutzsysteme schränkt die **Lichttransmission** ein. Die besten heute verfügbaren Verglasungen ermöglichen einen Gesamtdurchlassgrad (g) von 40% und eine Lichttransmission (τ) von 60%. An der Universität Basel werden mit gutem Fortschritt neuartige optische Beschichtungen untersucht, um in Verglasungen g-Werte von 20% mit einem τ von 50% zu kombinieren.

Dem Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich ist es gelungen das bisher **sparsamste Strassenfahrzeug** zu realisieren. Der Nachweis dieser Leistung erfolgte mit einem **Weltrekord** des sogenannten ***PacCar II*** am *Shell-Eco-Marathon* in Frankreich im Juni 2005. Der bisherige Rekord von 4'000 km mit einem Liter Benzinäquivalent wurde sehr deutlich auf 5'385 km erhöht. Dieses vom BFE geförderte Projekt mit grosser internationaler Ausstrahlung hat die Leistungsfähigkeit der Schweizer Energieforschung eindrücklich hervorgehoben. Erfreulich war zudem, dass diese Leistung durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Studierenden verschiedener Fachrichtung der ETHZ und Experten des PSI, von *RUAG Aerospace, Esoro AG* sowie *Tribecraft AG* zustande kam. Dies gibt der Ausbildung von Nachwuchsfachleuten in der Energietechnik zusätzlichen Aufwind.

Bei der Gewinnung von Geothermie fällt häufig Wärme mit Temperaturen unter 130 °C an. Aus ökologischen Gründen wäre eine Nutzung sinnvoll. Die **effiziente Konversion dieser Wärme in Elektrizität** eröffnet interessante und durchaus wirtschaftliche Perspektiven – auch für die Nutzung anderer Wärmequellen. Voraussetzung sind **Funktionsmaterialien** mit einem grossen Seebeck-Koeffizienten, gute elektrische sowie geringe thermische Leitfähigkeit. Im Projekt Geo-Thermopower wurden Übergangsmetalloxide untersucht, die als p- und n-leitende Halbleiter eine beachtliche Thermokraft aufweisen. Aufgrund ihrer sehr guten – durch Experimente verifizierten – thermischen Stabilität sind diese Substanzen hervorragend geeignet für thermoelektrische Anwendungen.

Seit 1881 ist der **magnetokalorische Effekt** bekannt: Einem Magnetfeld ausgesetzte Materialien erwärmen sich, ohne Magnetfeld kühlen sie sich ab. Dank Fortschritten in der Materialforschung lässt sich der Effekt bei üblichen Raumtemperaturen nutzen – in Form einer neuen Generation von Kühlgeräten und Wärmepumpen. An der Fachhochschule Yverdon analysierten Wissenschafter das Systemverhalten und bewerteten die Wärme- respektive Kältekapazitäten geeigneter magnetischer Legierungen. Die Materialwahl wird unter anderem durch die Feldstärke des Magnetfeldes beeinflusst. Prädestiniert sind Mangan- und Gadolinium-Legierungen. Das Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist der Prototyp

rentes. Ce concept architectural présente l'inconvénient d'apports énergétiques importants par les fenêtres sous forme de rayonnement thermique. Les systèmes de protection contre le soleil utilisés actuellement réduisent ces apports, certes, mais limitent du même coup la **transmission de la lumière**. Les meilleurs vitrages commercialisés ont un taux de transmission d'énergie totale (g) de 40% et transmettent la lumière (τ) à raison de 60%. L'Université de Bâle étudie des revêtements optiques d'un type nouveau ; les progrès sont sensibles et l'on peut s'attendre à des valeurs respectives de 20% et de 50%.

À l'Institut des techniques de mesure et de régulation de l'EPF de Zurich, on a réussi à réaliser **le véhicule le plus économe en énergie** à ce jour. L'épreuve de cette performance a été le *Shell-Eco-Marathon* en France en juillet 2005 qui a permis au ***PacCar II*** de réaliser un **record mondial**. Jusqu'ici le record était un équivalent de 1 litre d'essence pour 4'000 km. Il a été porté à 5'385 km. La qualité des prestations de la recherche énergétique suisse a ainsi rencontré un très fort retentissement international grâce à ce projet soutenu par l'OFEN. Cette performance a été acquise grâce à une heureuse collaboration entre divers experts provenant de l'EPFZ, du PSI, de *RUAG Aerospace*, d'*Esoro SA* et de *Tribecraft SA*. Cela a également donné une impulsion bienvenue à la formation d'une relève dans le domaine de la technique énergétique.

La chaleur est souvent fournie par la **géothermie** à une température inférieure à 130 °C. Pour des raisons écologiques, il serait intéressant de l'utiliser. Sa conversion en électricité est *a priori* possible avec un bon rendement et, pourquoi pas, de manière rentable – comme d'ailleurs pour d'autres sources de chaleur. La condition à remplir est le **développement des matériaux adéquats**, qui possèdent un coefficient thermoélectrique de Seebeck élevé, une bonne conductivité électrique et une faible conductivité thermique. Dans le cadre du projet Geo-Thermopower, des oxydes de métaux de transition ont été étudiés ; ce sont des semiconducteurs «p» ou «n» au pouvoir thermoélectrique remarquable. L'expérience a confirmé qu'ils jouissent d'une excellente stabilité thermique. Ce sont donc des matériaux convenant parfaitement aux **applications thermoélectriques**.

L'effet magnétocalorique est connu depuis 1881. Des matériaux placés dans un champ magnétique s'échauffent ; sans ce champ, ils se refroidissent. Grâce aux progrès de la recherche en technique des matériaux, on peut tirer parti de cet effet aux températures ambiantes usuelles déjà, à l'aide d'une nouvelle génération d'appareils de refroidissement et de pompes à chaleur.

Des chercheurs de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) à

einer rotierenden **Kälte- und Wärmemaschine**. Je nach Einsatzgebiet erbringt die warme oder die kalte Seite der Maschine die Energiedienstleistung. Das Anwendungspotenzial ist enorm: Kühlschränke, Kühlanlagen für Räume und Produkte, Prozesstechnik, etc. Eine angemessene Würdigung fand das Projekt durch die Auszeichnung *Swiss Technology Award 2006*.

Ohne Nachbehandlung der Abgase lassen sich die hocheffizienten Zündstrahlmotoren in **landwirtschaftlichen Biogasanlagen** aus lufthygienischen Gründen nicht einsetzen. Die Stickoxidemissionen dieser Maschinen schwanken aufgrund des ständig ändernden Methangehalts im Biogas und liegen häufig über den gesetzlichen Grenzwerten. Mit der Entwicklung eines Katalysators zur Abgasreinigung sind diese Treibstoffeigenschaften kein Problem mehr: Der auf der **SCR-Technik** *(selective catalytic reduction)* basierende Katalysator wirkt unabhängig von NOx-Schwankungen im Abgas. Die Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung lassen sich mit dieser Innovation einhalten. Möglich ist dies sogar bei einer Verschärfung der LRV-Grenzwerte, indem der Katalysator modifiziert wird. Die Neuentwicklung konnte bereits in mehreren Biogasanlagen erfolgreich eingesetzt werden.

Eine höhere Leistungsdichte, die Startfähigkeit bei tiefen Temperaturen sowie spezifische Kosten von 4,20 Fr. je Watt waren die Ziele einer **Brennstoffzellenentwicklung** an der Fachhochschule Biel. Der luftgekühlte Stapel mit 32 Zellen in PEFC-Technik aus dem Vorgängerprojekt leistet 500 Watt. Durch Modifikation im Design konnte ein für Kleinserien geeignetes Produkt entwickelt werden. Die maximale Leistung beträgt nach dem Redesign 860 Watt, der Überdruck 7 bar. Als Industriepartner beteiligte sich schon in einer frühen Phase die in Wattwil domizilierte *CEKA* Elektrowerkzeuge. Die Firma baut heute die industrielle Fertigung auf. Eines der luftgekühlten PEFC-Brennstoffzellen-Geräte verkaufte *CEKA* bereits nach Norwegen.

ERNEUERBARE ENERGIEN

In der Zentrale des *Migros-Genossenschaftsbundes* in Zürich liefert eine mit **Solarwärme** betriebene **Absorptionsmaschine** Kälte zur Konditionierung von Räumen über Kühldecken respektive über die Lufterneuerung. Die Kältemaschine läuft im monovalenten Betrieb – ohne Heizungsunterstützung. Die notwendige Wärme kommt von den Röhrenkollektoren auf dem Dach der Überbauung. Bei einem Ausfall der Kältemaschine muss die Solaranlage vor Überhitzung geschützt werden. Dann geht die Solarwärme über einen Plattenwärmetauscher ins Rückkühlnetz und von da über einen Hybridkühler ins Freie. Um die Investitionskosten zu reduzieren, sollten Tech-

Yverdon ont analysé le comportement systémique et évalué les capacités de chauffage et de refroidissement d'un certain nombre d'alliages magnétiques. Le choix du matériau dépend notamment de l'intensité du champ magnétique. Les meilleurs candidats sont ici les alliages de manganèse et de gadolinium. Les travaux de recherche et de développement ont débouché sur le prototype d'une machine tournante produisant chaleur et froid. Selon l'application considérée, c'est le côté froid ou le côté chaud de la machine qui fournit un service énergétique. Les possibilités d'application sont immenses : armoires frigorifiques, refroidissement des locaux et des marchandises, technique des procédés, etc. Le projet a bien mérité le *Swiss Technology Award 2006* qui vient de lui être décerné.

Pour des raisons relevant de la protection de l'air, il n'est pas possible d'utiliser les moteurs de haut rendement à injection pilote dans les **installations de l'agriculture fonctionnant au biogaz** sans traiter leurs gaz d'échappement. La teneur en méthane du carburant (biogaz) fluctue continuellement, si bien que les émissions d'oxydes d'azote de ces machines sont aussi variables et dépassent souvent les valeurs limites légales. La solution réside dans le développement de catalyseur destiné à purifier les gaz d'échappement : la **technique SCR** *(selective catalytic reduction)* produit l'effet désiré, indépendamment de la concentration de NOx dans ces gaz. Cette innovation permet de se mettre en règle avec l'Opair (o. sur la protection de l'air). Il serait même possible de modifier le catalyseur si les prescriptions venaient à être renforcées. Cette nouvelle technique a déjà été appliquée avec succès à plusieurs installations utilisant du biogaz.

Une plus grande densité, la possibilité de démarrer à basse température et un coût de 4,20 CHF par watt, tels étaient les objectifs du **développement d'une pile à combustible** par la Haute École spécialisée de Bienne. Dans un projet antérieur, un stack refroidi à l'air, comportant 32 cellules de la technologie PEFC (pile à combustible à électrolyte polymère), avait atteint la puissance de 500 watts. Une modification apportée à sa construction a permis de réaliser un produit adapté à la production en petite série. La puissance atteint maintenant 860 watts et la surpression 7 bars. L'entreprise *CEKA*, basée à Wattwil, qui fabrique des outils électriques, avait été associée au projet en tant que partenaire industriel dans une phase antérieure déjà. Aujourd'hui, cette société met sur pied la fabrication industrielle du produit. L'une de ces piles à combustible à électrolyte polymère refroidies à l'air a d'ailleurs déjà été vendue en Norvège par *CEKA*.

SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

À Zurich, dans la centrale technique de la *Fédération des coopératives Migros*, c'est une **machine**

nikzentrale, Solaranlage und Rückkühler durch kurze Leitungen verbunden sein. Die Nutzung von Sonnenenergie zur Produktion von Kälte wird an Bedeutung gewinnen. Nach rein wirtschaftlichen Kriterien sind diese Kältemaschinen aber bislang noch nicht konkurrenzfähig.

Am IMT der Universität Neuenburg arbeiten Forscher an der Verbesserung der Wirkungsgrade von **Dünnschichtsolarzellen aus Silizium**. Erklärtes Ziel sind 14 % für mikromorphe Solarzellen. Im Vordergrund stehen die Prozessführung sowie die Charakterisierung der Solarzellen. Dabei sind erfreuliche Fortschritte gemacht worden. Auf der transparenten Oxydschicht aus ZnO auf Glas wurden mikrokristalline Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 9 % und mikromorphe Zellen von 11,6 % hergestellt. An amorphen Solarzellen auf PET-Folien konnten Wirkungsgrade von 7,3 %, an mikrokristallinen Zellen von 7,6 % und an mikromorphen Solarzellen von 8,3 % – jeweils auf dem gleichen Trägermaterial – gemessen werden. Die am IMT entwickelten Prozesse werden von Industriepartnern – Unaxis und VHF-Techologies – in ihre Produkte implementiert.

Um unter kontrollierten Bedingungen reproduzierbare Messungen mit **konzentrierter Solarstrahlung** durchführen zu können, wurde am Paul Scherrer Institut eine „künstliche Sonne“ entwickelt. Die Anlage besteht aus zehn Xenon-Bogenlampen. Mit ellipsenförmig gewölbten Reflektoren wird die Abstrahlung der Lampen auf einen Punkt fokussiert. Im Bereich des Fokus werden damit auf wenigen cm^2 Spitzenwerte von 10’000 Sonnen erreicht (1 Sonne entspricht 1 kW pro m^2). Dank der Unabhängigkeit von der Witterung können thermochemische Hochtemperaturprozesse, wie **die Herstellung von Wasserstoff** mit Sonnenenergie, in Zukunft wesentlich effizienter untersucht werden. Hierzu wird ein Reaktor in den Fokus der Bogenlampen gestellt – die hochkonzentrierte Strahlung heizt den Reaktor auf sehr hohe Temperaturen auf und treibt den Prozess an.

Die Untersuchung der energieintensiven Prozesse **zur Lignin- und Cellulose-Herstellung** am Beispiel von Booregaard ist Teil eines internationalen Forschungsprojektes. Ein Schwerpunkt lag auf der Analyse der chemischen Prozesse und deren Energieversorgung. Dies ermöglichte eine Modellierung der wichtigsten beteiligten Biomasse-Verfahren. In einem weiteren Schritt wurde die Effizienz der Erzeugung und Nutzung von Dampf bewertet und die Indikatoren zu deren Beeinflussung definiert. Zentraler Faktor ist die Energie- und Wasserrückgewinnung aus dem **Dampfkondensat**. Die entsprechende Rate liegt heute bei 31 %. Durch Ausschöpfung von weiteren Potenzialen lässt sich Energie und Wasser aus 80 t Kondensat pro Stunde zurückgewinnen. Dies entspricht einer Wärmeleistung von 60 Megawatt.

frigorifique à absorption fonctionnant à **l’énergie solaire** qui produit le froid nécessaire au conditionnement des locaux ; sa distribution s’effectue par le biais du renouvellement de l’air et à l’aide de plafonds de refroidissement. La machine frigorifique est actionnée par une seule source d’énergie ; il n’y a donc pas de chauffage d’appoint. La chaleur nécessaire est fournie par des capteurs solaires à tubes évacués placés sur le toit de l’édifice. Le champ de capteurs doit être protégé contre la surchauffe en cas de panne de la machine frigorifique ; cette protection est réalisée par le branchement automatique exceptionnel du circuit des capteurs sur le circuit de refroidissement de la machine frigorifique, via un échangeur de chaleur à plaques ; la chaleur solaire peut ainsi être dissipée dans l’air extérieur par l’intermédiaire d’une tour hybride de refroidissement. La centrale technique, le champ de capteurs et la tour de refroidissement devraient être reliés entre eux par des conduites aussi courtes que possible, de manière à limiter les frais d’investissement. Le recours à l’énergie solaire pour produire du froid deviendra de plus en plus fréquent. Toutefois, les machines frigorifiques de ce type ne sont pas encore compétitives si l’on applique à leur évaluation des critères purement économiques.

Des chercheurs de l’Institut de Microtechnique de l’Université de Neuchâtel travaillent à l’amélioration du rendement des **cellules solaires au silicium en couches minces**. Leur but est d’atteindre 14% pour les cellules micromorphes. Ils optimisent pour cela le procédé de fabrication et caractérisent les cellules obtenues. Les résultats sont réjouissants. Des cellules solaires microcristallines, déposées sur une couche, dite TCO (oxyde conducteur et transparent), d’oxyde de zinc (ZnO) sur un substrat de verre, ont atteint un rendement de 9%. Ce chiffre s’élève à 11.6% pour les meilleures cellules micromorphes fabriquées jusqu’ici. Pour les cellules déposées sur des films de PET, les meilleures valeurs mesurées du rendement sont de 7.3%, 7.6% et 8.3% pour les cellules amorphes, microcristallines et micromorphes, respectivement. Les partenaires industriels de l’IMT – Unaxis et VHF-Technologies – recourent aux procédés mis au point par cet Institut pour la fabrication de leurs produits.

L’Institut Paul Scherrer a mis au point un «soleil artificiel» pour pouvoir faire des mesures reproductibles à l’aide du **rayonnement solaire concentré**, dans des conditions bien précises. L’installation consiste en 10 lampes à arc au xénon. Des réflecteurs de forme elliptique focalisent le rayonnement des lampes en un seul point. À ce foyer, on obtient ainsi sur quelques cm^2 un rayonnement correspondant à environ 10’000 soleils (1 soleil correspond à environ 1 kW par m^2). Grâce à cette nouvelle indépendance des conditions atmosphériques, il est désormais possible d’étu-

In der folgenden Projektphase dokumentiert die EPFL sämtliche warmen und kalten Ströme in den relevanten Prozessen und integriert die Daten ins Modell. Daraus ergibt sich das Konzept zur Gesamtoptimierung der Anlage.

Die Energie bei der Druckreduzierung in geschlossenen Systemen, beispielsweise in **Trinkwasserleitungen**, lässt sich sinnvoll nutzen, z.B. für **Kleinstwasserkraftwerke**. Dafür wurde dafür eine spezielle Pelton-Turbine entwickelt. Die Anwendung weist ein riesiges Potenzial aus, vergleichbar jenem von rückwärtslaufenden Pumpen. Sehr gut schneidet auch die Gesamtökobilanz ab. Die guten Ergebnisse des Projekts und erfolgsversprechende Simulationen sind Gründe, in der Walliser Gemeinde Gregnols einen Prototyp zu installieren. Für ihr Engagement wurde die Projektnehmerin, die Stiftung *Revita*, mit dem *Swiss Mountain Water Award 2005* ausgezeichnet.

Das *Grand Hotel Dolder* in Zürich wird nach der Wiederinbetriebnahme im Jahre 2007 über **Erdsonden** gekühlt und beheizt. Die 72 Sonden greifen 152 m in das Erdreich. Nach Abschluss der Abteufung wurde die gesamte Installation auf Druck und Durchfluss geprüft. Ein Glasfaserkabel entlang einer Reihe von drei Erdwärmesonden am Rand des Feldes dient der Betriebsüberwachung. Damit lässt sich künftig die Soletemperatur messen. Zusätzlich sind zwei Sonden in der Mitte des Feldes mit Temperaturfühler ausgerüstet. Die Messinstallationen erlauben eine verlässliche Erfolgskontrolle; die verfügbaren Daten dienen zudem der **Systemoptimierung.**

Windkonverter in alpinen Verhältnissen unterliegen besonderen Beanspruchungen, insbesondere Vereisungen. Inwieweit diese Phänomene den Energieertrag beeinflussen, ist noch eine offene Frage. Zur Beantwortung derselben werden in der Windkraftanlage auf dem Gütsch 10-Minuten-Mittelwerte des Energieertrages und der Temperatur erfasst. Zusätzlich dokumentiert eine auf der Gondel installierte Webcam die Vereisung des Rotors. Über einen Bewegungsmelder lösen die Flügel fotografische Aufnahmen aus. Erstmals am 6. Dezember 2005 wurden Vereisungen festgestellt. Diese führten zu einem Minderertrag im Vergleich zum regulären eisfreien Betrieb. Der Befund zeigt die **Relevanz von Vereisungen** für einen effizienten und störungsfreien Betrieb, insbesondere für alpine Standorte.

KERNENERGIE

Die sichere Entsorgung **radioaktiver Abfälle** aus Kernkraftwerken sowie industriellen und medizinischen Anwendungen zählt zu den wichtigsten Aufgaben der Behörden und der damit befassten Genossenschaft Nagra. Ziel von Arbeiten am Paul Scherrer Institut bilden technisch-wissenschaftliche Grundlagen für den Sicherheitsnachweis von

dier beaucoup plus efficacement les procédés thermochimiques à haute température, comme la **production solaire d'hydrogène**. À cet effet, on place un réacteur au foyer des lampes à arc ; le rayonnement très concentré chauffe le réacteur jusqu'à des températures très élevées et devient le «moteur» de la réaction chimique qui s'y déroule.

La **fabrication de la lignine et de la cellulose** fait appel à des procédés qui demandent beaucoup d'énergie. Elle fait l'objet d'un projet international de recherche qui prend pour exemple la société *Booregaard*. Les chercheurs ont analysé les procédés chimiques et la façon dont l'énergie qu'ils requièrent est fournie. Ils ont pu ainsi modéliser les procédés de biomasse les plus importants mis en jeu. Dans un deuxième temps, ils ont évalué l'efficacité de la production de la vapeur d'eau et de son utilisation, puis défini des indicateurs qui déterminent cette efficacité. Le facteur principal est la récupération de l'énergie et de l'eau résultant de la **condensation de la vapeur**. Actuellement, le taux de récupération est d'environ 31%. En améliorant les procédés, il est possible de récupérer 80 t d'eau par heure, avec l'énergie de condensation correspondante. Cela représente une puissance de 60 mégawatt. La phase suivante du projet est en cours : l'EPFL relève maintenant tous les flux thermiques (chauds ou froids) que les procédés impliquent et les intègre au modèle. Le concept de l'optimisation générale de l'installation en résultera.

Dans des systèmes fermés, telles les **conduites d'eau potable**, l'énergie libérée par la réduction de la pression peut être mise en valeur astucieusement, par exemple, à l'aide **d'aménagements hydroélectriques de très petite taille**. Une turbine Pelton a été spécialement développée à cet effet. Cette application offre des possibilités immenses, comparables à celles des pompes qui tournent à l'envers. Son bilan écologique global est excellent. Comme le projet a donné de bons résultats et que les simulations numériques annoncent des réalisations prometteuses, la commune de Grengiols dans le Haut-Valais a décidé d'installer un prototype. La fondation *Revita*, qui réalise le projet, a reçu pour son engagement le *Swiss Mountain Water Award 2005*.

Après sa réouverture en 2007, le *Grand Hôtel Dolder* à Zurich sera chauffé et refroidi à l'aide de **sondes géothermiques**. Au nombre de 72,ces sondes s'enfoncent de 152 m dans le sol. Le forage étant terminé, toute l'installation a été mise sous pression et son débit contrôlé. La surveillance de son bon fonctionnement se fait à l'aide d'un câble de fibre de verre placé le long d'un ensemble de trois sondes en bordure du champ de sondes. On pourra ainsi mesurer la température du mélange antigel. En complément, deux son-

Endlagern. Zu diesen Arbeiten zählen Sorptionsuntersuchungen an Tonmineralien, die in einem geologischen Tiefenlager als Hauptbestandteil des Verfüllmaterials in Kavernen (Bentonit) und des Wirtgesteins Opalinuston dienen. Dabei geht es in erster Linie darum, **Sorptionsprozesse von Metallen** an Tonmineralien zu verstehen und Modelle zu entwickeln, mit denen die Retardierung von Radionukliden in einem geologischen Tiefenlager prognostiziert werden können. Die Sorption von 11 Metallen an Montmorillonite, die experimentell bei Spurenkonzentrationen des Metalls bestimmt worden waren, wurden mithilfe des am PSI entwickelten Oberflächenkomplexierungsmodells modelliert.

Um den neuen Anforderungen für den **Sicherheitsnachweis von Kernkraftwerken** bei Störfällen mit abgebrannten Brennstäben gerecht zu werden, laufen am Paul Scherrer Institut verschiedene Untersuchungen, darunter die Weiterentwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Rechenunsicherheit. Neue Verfahren erlauben es der Hauptabteilung für die Sicherheit in Kernkraftanlagen, HSK, Alterungsmechanismen zu untersuchen, beispielsweise die Neutronenversprödung. Damit lässt sich die maximale Betriebsdauer alternder Kernkraftanlagen bestimmen und Auslegestörfälle mittels verifizierten und validierten Programmen beurteilen. Gegenüber dem Vorläuferprojekt wurden die Schwerpunkte von der Entwicklung von KKW-Anlagemodellen und der Anwendung von Rechencodes auf **Aspekte des Systemverhaltens** verschoben.

Auf dem Gebiet der **kontrollierten thermonuklearen Fusion** hat die anerkannte Expertise des *Centre de Recherche en Physique des Plasma*s *CRPP* der EPF Lausanne auf dem Gebiet der Heizung mittels zyklotron-elektronischen Wellen dazu geführt, dass diese Institution bei der **Entwicklung eines Gyrotron** für den Experimentalreaktor ITER die Rolle des führenden Labors in Europa übernimmt. Im Berichtsjahr wurden dazu benötigte experimentelle Einrichtungen installiert und im Jahr 2006 finden erste Tests am Gyrotron statt. Das CRPP hat ebenfalls wesentliche Beiträge zur Konzeption der Antenne für die Erzeugung der zyklotron-elektronischen Wellen von ITER geliefert. Aufgrund einer vertieften Analyse der physikalischen Anforderungen wurde eine Änderung des Referenzkonzepts der Antenne vorgeschlagen. Diese Änderung wurde vom Projektteam von ITER akzeptiert und das CRPP hat nun in diesem Projekt die Hauptrolle übernommen.

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Die **Erneuerung des Gebäudebestandes** bleibt weit hinter den technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten zurück. Die Hemmnisse liegen unter anderem im Bau- und Planungsrecht, im Miet- und

des du milieu du champ sont équipées de capteurs mesurant la température. Avec ce dispositif de mesure, on pourra contrôler de manière ciblée la conception et la réalisation de l'installation. En outre, les données disponibles permettront **d'optimiser l'ensemble**.

Les **éoliennes installées en conditions alpines** subissent des contraintes très sévères, notamment le givrage. On ne connaît pas encore pour l'instant l'effet de ces contraintes sur la production d'énergie. C'est pourquoi, au Gütsch sur Andermatt (UR), les valeurs moyennes sur 10 minutes de l'énergie produite et de la température sont mesurées systématiquement. En outre, une caméra installée sur la nacelle de l'éolienne permet d'enregistrer l'évolution du givrage éventuel du rotor. C'est un détecteur du mouvement des pales qui déclenche la prise de vue. Un givrage a été constaté pour la première fois le 6.12.2005, conduisant à une réduction de la productivité par rapport à des pales non givrées. Cela confirme a posteriori le **bien-fondé de l'étude du givrage des pales** en vue d'assurer, en conditions alpines notamment, une exploitation des éoliennes efficace et sans dérangement.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La gestion sûre des **déchets radioactifs** – provenant des centrales nucléaires et des applications industrielles et médicales – est l'une des tâches les plus importantes des autorités de surveillance et de la NAGRA qui s'en occupe. Des travaux réalisés à l'Institut Paul Scherrer ont pour but d'assurer les fondements techniques et scientifiques des méthodes qui apportent la preuve de la sécurité des dépôts définitifs. Les chercheurs étudient notamment les phénomènes de sorption dans les minéraux argileux qui, dans un dépôt en couches géologiques profondes, constituent le composant principal de la roche d'accueil et du matériau de remplissage utilisé dans les cavernes (bentonite). Il s'agit surtout de comprendre la **sorption des métaux** dans ces minéraux argileux et de développer des modèles qui permettent de prévoir par le calcul dans quelle mesure la migration des radionucléides est retardée dans un dépôt en couches géologiques profondes. La sorption de 11 métaux sur la Montmorillonite qui a été déterminée expérimentalement par analyse des traces de métaux, a pu être modélisée grâce à un modèle de complexation sur des surfaces développé au PSI.

Pour répondre aux exigences nouvelles applicables à la **sûreté des centrales nucléaires** en cas de dérangements dus aux barres de combustible, le PSI effectue des travaux comprenant le perfectionnement de la méthodologie utilisée pour déterminer l'incertitude de calcul. Des procédés nouveaux permettent à la DSN d'examiner les mécanismes de vieillissement dont l'action des neu-

Steuerrecht sowie in den Kriterien zur Hypothezierung von Objekten. Das Projekt „Mobilisierung der Erneuerungspotenziale bei Wohnbauten“ analysiert die Problemfelder und schlägt Strategien und Massnahmen vor, um den Rhythmus und die Qualität der Gebäudeerneuerung nachhaltig zu beeinflussen. Als Ansatzpunkte nennen die Autoren der Untersuchung unter anderen Punkten die Verstärkung der Bestellerkompetenz von **Bauherrschaften und Planer,** die Weiterbildung von Baufachleuten, die Verbesserung der mietrechtlichen Rahmenbedingungen, insbesondere zur Überwälzung von Modernisierungskosten auf die Mieterschaft, sowie eine Verschärfung von Bauvorschriften.

trons qui rendent le métal cassant. Il devient alors possible de déterminer une plus grande durée d’exploitation possible pour une centrale vieillissante et de juger, à l’aide de logiciels bien validés, de la portée des accidents de dimensionnements. Par rapport au projet qui l’a précédé, consacré au développement de modèles de centrales et à l’application de logiciels de calcul, le projet actuel met l’accent sur des **aspects du comportement des systèmes.**

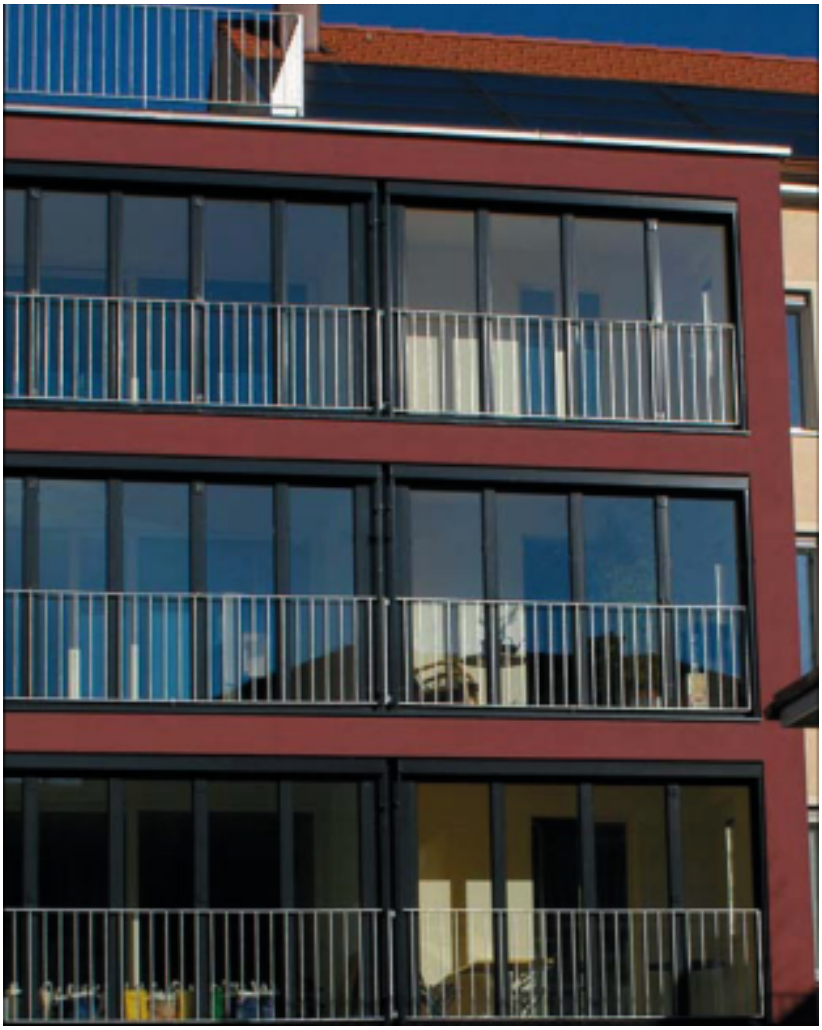
En **fusion thermonucléaire contrôlée**, l’expertise reconnue du Centre de Recherche en Physique des Plasmas (CRPP) de l’EPFL dans le développement de chauffage par ondes cyclotron-électroniques fait que le CRPP s’est vu confier le rôle de chef de file en Europe pour le **développement du gyrotron destiné à *ITER***. L’installation à Lausanne du banc d’essai pour cet instrument s’est poursuivie en 2005 et sera prête pour les premiers essais du gyrotron en 2006. Le CRPP a également fait une contribution significative dans la conception de l’antenne pour les ondes cyclotron-électroniques d’*ITER*, où après une étude approfondie des exigences de la physique, il a proposé un changement de concept de référence de l’antenne. Ce changement a été accepté par l’équipe d’*ITER* et c’est le CRPP qui joue maintenant le rôle principal dans ce projet.

BASES DE L’ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE

La **rénovation du parc immobilier** accuse un retard considérable par rapport à ce qu’il serait possible de faire, compte tenu des coûts et de la technique actuels. Les obstacles se trouvent, notamment, dans le droit de la construction, dans celui régissant les rapports entre propriétaires et locataires, ainsi que dans les critères appliqués à l’octroi des hypothèques. Le projet «Stimulation des rénovations dans les habitations» analyse les secteurs qui font problème et propose des stratégies et des mesures susceptibles d’agir durablement sur le rythme et la qualité des rénovations d’immeubles. Les auteurs de l’étude retiennent ici, par exemple, **l’amélioration des compétences des propriétaires et des bureaux d’études** en qualité d’acheteurs, la formation continue dans les métiers du bâtiment, l’amélioration des conditions cadres régissant le droit des locataires – en particulier la possibilité de reporter sur le locataire les frais de modernisation –, ainsi que des prescriptions plus sévères dans les règlements de construction.

RATIONELLE ENERGIENUTZUNG IN GEBÄUDEN

Mark Zimmermann
mark.zimmermann@empa.ch



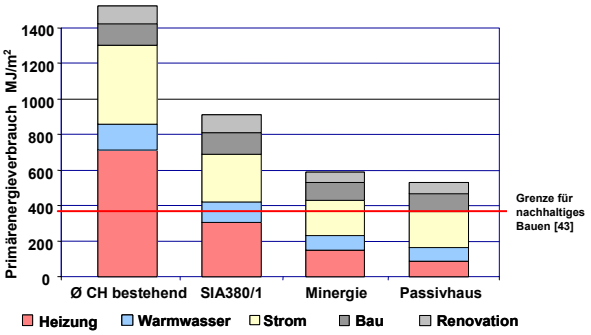
Passivhaussanierung

Der Umgang mit der bestehenden Bausubstanz ist eine der grossen Herausforderungen unserer Gesellschaft. Eine umfassende energetische Sanierung, verbunden mit räumlichem Mehrwert kann eine nachhaltige Zukunft sichern (Bild: Passivhaussanierung Zwinglistrasse, Architekt Viridén, Zürich).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Energienutzung in Gebäuden ist verantwortlich für etwa die Hälfte des Schweizerischen Energiekonsums. Entsprechend bedeutend ist die daraus resultierende Umweltbelastung – insbesondere mit Treibhausgasen, aber auch der Verbrauch der materiellen Ressourcen

Realisierte Gebäude zeigen, dass bezüglich Energieeffizienz besonders bei Altbauten aber auch bei Neubauten nach wie vor ein grosses Potential besteht (Figur 1). Die Mehrkosten energieeffizienter Bauten halten sich dabei in einem durchaus vertretbaren Rahmen.



Figur 1: *Primärenergieverbrauch verschiedener Gebäudestandards für Betrieb, Erstellung und Renovation*

Das Forschungsprogramm *Rationelle Energienutzung in Gebäuden* will die Möglichkeiten des effizienten und umweltschonenden Energieeinsatzes weiter verbessern, indem es Grundlagen erforscht und innovative Technologien unterstützt. Dabei werden vor allem Technologien gefördert, die ein hohes Einsparpotential (50 - 90 %) und eine gute Akzeptanz im Markt aufweisen.

Für das Programm stehen die **Optimierung ganzer Gebäudesysteme** und die **ganzheitliche Berücksichtigung der Umweltwirkungen** im Vordergrund. Die aktuellen Schwerpunkte basieren auf dem *Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 - 2007:*

- **Hochisolationstechnik**: Neue, hochisolierende, zum Teil vakuumisolierte Dämmsysteme sollen vermehrt für hochwertige Bauprodukte eingesetzt werden. Sie sind platzsparend und deshalb vor allem für Gebäudesanierungen interessant.
- **Elektrizitätsnutzung in Gebäuden** (in Zusammenarbeit mit dem Programm Elektrizität): Der stets zunehmende Elektrizitätsverbrauch ist eine der grossen, heute noch ungelösten Herausforderungen der Energieversorgung.
- **Gebäudekühlung:** Der Kühlbedarf wird immer wichtiger. Wachsenden Komfortansprüchen und der Klimaerwärmung muss rechtzeitig mit geeigneten Massnahmen begegnet werden.
- **Umweltaspekte energieeffizienter Bauten**: Neue Technologien und Standards dürfen nicht nur energetisch beurteilt werden, sie sollen auch vorteilhaft bezüglich Umweltbelastung sein.
- **Nachhaltige Quartierentwicklung**: Mit vereinzelten Projekten sollen im Sinne der nachhaltigen Raumplanung die Auswirkungen des Bauens auf Quartierebene besser berücksichtigt werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

2005 wurde – nach einer Programmausschreibung – eine grössere Zahl von Projekten initiiert (siehe Projektliste). Es werden im Folgenden nicht sämtliche Projekte einzeln aufgeführt, sondern teilweise Themenbereiche zusammengefasst.

UMWELT / NACHHALTIGKEIT

Mit dem Aufbau des schweizerischen Zentrums für Ökoinventare wurde eine internationale Datenbank geschaffen (www.ecoinvent.ch), auf deren Basis nun umweltrelevante Fragestellungen auch aus dem Energiebereich gezielt angegangen werden können. Der Aufbau des Zentrums wurde primär durch das BFE, das BUWAL und diverse ETH-Institutionen unterstützt.

Basierend auf dieser Datenbank konnten verschiedene Projekte gestartet werden. So wird gegenwärtig abgeklärt, welche (positiven) ***Umweltwirkungen durch die Einführung von energetischen Gebäudestandards*** ausgehen würden [1]. Parallel dazu wird untersucht, in welchem Masse ***neue Energiesysteme wie Wärme-Kraft-Kopplung oder Brennstoffzellen*** die Umweltbelastung reduzieren würden [2]. Dabei wird die gesamte Prozesskette von der Energiegewinnung bis zu deren Nutzung analysiert.

Um Bauprojekte hinsichtlich ihrer Umweltbelastung einfacher beurteilen zu können, wird gemeinsam mit dem Verein *eco-bau* (früher *KÖB)* ein ***elektronischer Bauteilkatalog*** [3] entwickelt. Der Bauteilkatalog gibt Auskunft über den Isolationskennwert U und die verursachten Umweltbelastungen von etwa 100 Standardbauteilen, deren Abmessungen variiert werden können. Mit diesem Katalog wird es möglich sein, auf der Basis des SIA 380/1-Nachweises ein Bauprojekt sowohl energetisch wie auch ökologisch beurteilen zu können.

Eine Weiterentwicklung des Bauteilkatalogs wird mit einem Nachweisverfahren angestrebt, welches eine gesamtheitliche Beurteilung von Energieeffizienz, Umweltbelastung und Gesundheitsaspekten von Gebäuden ermöglichen soll [4]. Das Nachweisverfahren soll vorerst für die Erteilung eines ***Minergie-Eco*** Labels eingesetzt werden.

Ein mehrjähriger Schwerpunkt des Programms liegt in der Erarbeitung und Umsetzung von Strategien für eine ***nachhaltige Quartierentwicklung***. Dazu arbeiten das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), das Bundesamt für Wohnungswesen (BWO) und das BFE in ***Basel*** [5a], ***Lausanne*** [6], ***Luzern*** [7] und ***Zürich*** [8] mit lokalen Behörden und Institutionen zusammen um Quartierentwicklungsprojekte durchzuführen, resp. Hilfsmittel für die nachhaltige Entwicklung auf Quartierebene bereit zu stellen. Die verschiedenen Projekte werden durch ***Novatlantis*** [9], der ETH-Plattform für nachhaltige Entwicklung, koordiniert und begleitet.

PASSIVE SONNENENERGIENUTZUNG / GEBÄUDESYSTEME

Energieeffiziente Bauten zeichnen sich nicht allein durch gute Komponenten, sondern durch ein optimiertes Gesamtkonzept und den ausgewogenen Einbezug von erneuerbaren Energien aus. In den letzten Jahren wurden deshalb im Rahmen eines *IEA*-Projekts ***Solar Sustainable Housing*** [10a] die erfolgreichsten Gebäudekonzepte untersucht und umfangreiches Planungsmaterial zusammengestellt. Die energetisch besten Gebäude werden unter dem Begriff *Passivhaus*, in der Schweiz als *Minergie-P-Häuser* bekannt, realisiert. Der Heizenergieverbrauch dieser Gebäude, von denen es bereits mehrere tausend gibt, liegt mit rund 10 kWh/m^2-Bruttogeschossfläche rund 5 mal tiefer als bei normalen Neubauten. Gemäss einer *Empa*-Studie [43] [44] entsprechen damit diese Bauten, falls auch auf einen sparsamen Umgang mit Elektrizität geachtet wird, bereits weitgehend der Anforderung an nachhaltige Gebäude. Wieso dieser wegweisende Standard nicht schneller Fuss fassen kann, wurde mit einer ***Marktanalyse Passivhaus*** [11] näher untersucht. Die Studie zeigt, dass es nebst dem in der Schweiz gut eingeführten *Minergie-Standard* ein noch weiter gehender Gebäudestandard schwer haben wird, sich durchzusetzen.

Um die Planung energieffizienter Bauten zu vereinfachen, sind verschiedene Planungshilfsmittel in Bearbeitung. Einerseits wird das Berechnungsverfahren zur ***Bestimmung des Elektrizitätsbedarfs gemäss SIA 380/4*** erweitert [12] und den Europäischen Normen angepasst, anderseits werden zwei weitere Hilfsmittel, eines basierend auf der ***Klimaflächenmethode*** [13], das andere basierend auf einer detaillierten Energiebilanz (***Helios***) [14] bereitgestellt. Beide Programme dienen in erster Linie dazu, im frühen Planungsstadium auf einfache Weise differenzierte Analysen - auch bezüglich Kühllasten - durchführen zu können.

Wie sich Gebäude verändern müssen, wenn das Klima wärmer wird, soll eine Studie [15] herausfinden, welche die ***Auswirkungen der Klimaerwärmung*** auf die Dimensionierung von Heizung und Kühlung systematisch untersucht.

GEBÄUDEHÜLLE

Eine wichtige Neuerung der vergangenen Jahre stellt die Entwicklung der ***Vakuumisolation*** für Bauanwendungen dar. Auf diesem Gebiet sind denn auch verschiedene Arbeiten erfolgreich abgeschlossen und neue gestartet worden. Im Rahmen des nun abgeschlossenen IEA-Projekts ***High Performance Thermal Insulation in Buildings*** [5b] [16] [17], wurden vor allem die Grundlagen für einen dauerhaften Einsatz dieser Technologie im Gebäude (Lebenserwartung >50 Jahre) erarbeitet. An einer internationalen Konferenz, dem *7th International Vacuum Insulation Symposium* (*Empa*, *Dübendorf*, September 28-29, 2005) [45] wurden die Ergebnisse dieser Arbeiten, aber auch andere internationale Entwicklungen vorgestellt.

Inzwischen konnten mit bedeutenden Unternehmen Entwicklungsprojekte gestartet werden [5c] [18] [19] [20], um die extreme Dämmwirkung der ***Vakuumisolation in Bauprodukten*** einzusetzen. Weitere Anwendungen sind in Planung.

Welche innovativen ***Wandkonstruktionen für Minergie-P Häuser*** [10b] in internationalen Pilot- und Demonstrationsbauten ausgeführt wurden, wird ein einer Publikation zusammengestellt. Sie soll vor allem dem Planer zeigen, welche hoch dämmenden Wandkonstruktionen sich in der Praxis bewährt haben.

Durch die enorme Entwicklung der Wärmeschutzverglasungen ist die transparente Fassade zu einem wesentlichen Bestandteil jedes Gebäudekonzepts geworden. Allerdings sind auch die besten Gläser noch nicht optimal, wenn es darum geht, Tageslicht durch zu lassen, Wärmestrahlung jedoch abzuhalten. An der Universität Basel werden deshalb ***neuartige optische Beschichtungen*** untersucht [21], mit dem Ziel, Gläser mit einem g-Wert um 20 % und einem τ-Wert um 50 % zu erhalten. Heute verfügbare Gläser weisen Werte um 40 % respektive 60 % auf.

Damit das Verhalten von verglasten Fassaden schon in der Planungsphase beurteilt werden kann, werden komplexe Berechnungsprogramme eingesetzt, welche den ***Strahlungs- und Wärmedurchgang am Fenster*** simulieren. Um diese Programme testen zu können, werden mit dem Solarprüfstand der Empa hochwertige Messdatensätze erzeugt, welche anschliessend weltweit zum Testen entsprechender Simulationsprogramme dienen [22a].

HAUSTECHNIK

Im Bereich Gebäudetechnik stehen zurzeit vier Themen im Vordergrund: Elektrizität im Gebäude, Beleuchtung, Gebäudekühlung und Warmwasser.

Elektrizität

Die Bereitstellung und die effiziente Nutzung von Elektrizität stellt die grösste Herausforderung an Planer und Betreiber. Auf diesem Gebiet wurden deshalb, koordiniert mit dem Programm Elektrizität, diverse Projekte gestartet.

Die Nutzung hochwertiger fossiler Brennstoffe nur für Wärmezwecke ist nicht mehr zeitgemäss. Zukünftig soll damit im Gebäude Strom und Wärme, evtl. sogar auch noch Kälte produziert werden. Wie das, abhängig vom jeweiligen Bedarf und den Leistungscharakteristiken der eingesetzten Systeme, optimal gemacht werden kann, untersucht das *IEA*-Projekt ***Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems*** [23].

Das Elektrizitätsproblem lässt sich jedoch kaum allein mit zusätzlicher Stromerzeugung lösen. Gleichzeitig muss auch der Verbrauch reduziert werden. Es gäbe dazu eine ganze Reihe von Techniken, welche den Strom effizienter nutzen, sie werden bisher jedoch kaum eingesetzt. Planer und Installateure nutzen diese Möglichkeiten zu wenig. Mit dem Projekt ***Hilfsenergie Haustechnik: Einsparpotentiale und Umsetzungspfade*** [24] werden nun die Schwierigkeiten ermittelt und Massnahmen zu deren Behebung vorgeschlagen werden.

Stark von elektrischer Hilfsenergie abhängig sind auch so genannte Kombigeräte welche vor allem in Niedrigenergiehäusern zum Einsatz kommen. Diese heizen das Haus nicht nur, sie lüften gleichzeitig und stellen das Warmwasser bereit. Um diese komplexen Anlagen prüfen und die Technik weiter entwickeln zu können, wurde an der *HTA Luzern* ein ***Prüfstand für Kombigeräte*** [25] aufgebaut. Erste Messungen zeigen, dass noch Entwicklungspotential besteht. So liegt die Leistungsziffer der integrierten Kleinwärmepumpe bei 1.5 bis 3.0, was noch klar ungenügend ist.

Nach Abschluss des Projekts ***Bestellerkompetenz*** konnte nun auch das Projekt **Betreiberkompetenz** fertig gestellt werden. Das Projekt befasste sich zwar mit dem sicheren und energieeffizienten Betrieb von komplexen Gebäuden im Allgemeinen, der sparsame Umgang mit Elektrizität spielt dabei jedoch eine sehr wichtige Rolle. Die Arbeiten wurden in internationaler Zusammenarbeit im Rahmen des IEA-Projekts ***Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Systems*** [26] durchgeführt. Der Verband der schweizerischen Facility Manager (*IFMA Schweiz*) hat die Arbeiten übernommen und führt sie nun in eigener Regie weiter.

Licht

Licht ist zu einem bedeutenden Faktor für Elektrizitätsverbrauch und Komfort geworden.

An der EPF Lausanne wurde deshalb im Rahmen eines IEA-Projekts die ***Optimierung der Tageslichtnutzung in Gebäuden*** [27a] untersucht. Das Resultat sind technische Lösungsvorschläge für die intelligente Kombination von Kunst- und Tageslicht. Ergänzend dazu werden nun ***neue Beleuchtungskonzepte für Büroarbeitsplätze*** mit einer installierten Lichtleistung um 3 W/m^2 gesucht [27b]. Dabei wird auch geklärt, welche Rolle LED-Leuchten in Zukunft spielen könnten.

Einen ganz anderen Weg geht die Fachhochschule in Yverdon. Sie will die ***Schwefeldampflampe*** weiterentwickeln, welche für eine sehr hohe Lichtausbeute bekannt ist [28]. Das Ziel ist eine unbewegte Lampe kleiner Leistung (<100 W) mit einer Lichtausbeute von mehr als 100 Lumen/W. In einem ersten Entwicklungsschritt ist es bereits gelungen, das Plasma in einer ruhenden, und nicht wie bisher, in einem rotierenden Glaskolben zu erzeugen.

Kühlung

Nicht zuletzt infolge des Hitzesommers 2003 und der sich abzeichnenden Klimaerwärmung, aber auch aufgrund des Trends zu stark verglasten Bauten, ist die Gebäudekühlung nach wie vor ein hochaktuelles Thema.

Im Vordergrund steht die Ausnutzung natürlicher Kältesenken. In den meisten Fällen genügt die ***Nachtauskühlung***, wenn das Gebäude mit kühler Nachtluft richtig bewirtschaftet werden kann. Mit dem Projekt [22b] wird mittels detaillierten CFD-Simulationen untersucht, wie die Anordnung der Fensteröffnung und der Speichermasse den Auskühlvorgang zu beeinflussen vermag. Im Rahmen eines Industrieprojekts wurde dieses Konzept an einem Bürogebäude untersucht [29]. Die Messungen zeigen, dass die natürliche Konvektion oft nicht genügt um den Raum auszukühlen, da die grosse Speichermasse der Betondecken oberhalb der Fenster liegt und kaum erreicht wird. Eine erzwungene Belüftung der Betondecke bringt schon wesentlich mehr. Interessant könnte auch das Konzept sein, welches die Universität Genf untersucht [30]. Hier wird eine Speichermasse so mit Nachtluft durchströmt, dass eine zeitliche Phasenverschiebung entsteht und dadurch tagsüber die Kälte der Nachtluft zur Verfügung steht.

Nicht auf kühle Nachtluft, sondern auf kühles ***See- und Grundwasser*** setzt eine Untersuchung [31], welche prüft, inwiefern in Neuenburg über ein Kältenetz mit See- und Grundwasser gekühlt werden könnte. Die Studie soll zeigen, welches Potenti-

al diese natürlichen Kältespeicher in städtischen Gebieten abdecken könnten.

Drei weitere Projekte befassen sich mit der energieeffizienten Bereitstellung von Kälte. Einerseits sollen dazu ***reversible Wärmepumpen*** eingesetzt werden, die sowohl als effiziente Wärme- wie auch als Kälteaggregat eingesetzt werden können [32]. Andererseits wird versucht, Solarwärme oder Abwärme zur Kältebereitstellung zu nutzen. Dazu wird mit der so genannten ***sorptionsgestützten Kühlung*** die Luft getrocknet um sie anschliessend auf ein normales Mass wieder zu Befeuchten und dadurch abzukühlen. Im Projekt werden semipermeable Membranen untersucht, welche sich sehr gut für den Feuchteaustausch eignen, das Trockenmittel jedoch von der Zuluft trennen [33]. Das Projekt ***Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen*** [2b] befasst sich gezielt mit der Problematik der Erneuerung ineffizienter bestehender Anlagen. Es wertet beispielhafte Sanierungen aus und soll dem Planer zeigen, welche Konzepte bei der Erneuerung alter Klimaanlagen zu empfehlen sind.

Warmwasser

Durch die laufende Verbesserung der Gebäudehülle, gewinnt der Energieverbrauch zur Wassererwärmung gegenüber dem Heizwärmeverbrauch laufend an Bedeutung. Währenddem die Planungsmethoden für den Heiz- und Kühlbedarf weit entwickelt sind, fehlen für die Planung der Warmwasseranlagen entsprechende Werkzeuge. Mit einer ***Methode zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs von Warmwasseranlagen*** [34] wurde diese Lücke geschlossen Es steht nun ein einfaches Planungswerkzeug zur Verfügung, mit welchem der Energieverbrauch für Warmwasser berechnet, bezüglich Schwachstellen analysiert und optimiert werden kann.

Mit der energetisch erwünschten Senkung der Warmwassertemperatur unter 60°C steigt das Risiko des Leginonellenwachstums. Damit sich Energieeffizienz und Gesundheitsrisiko nicht unnötig ausschliessen, untersucht die ETH welche materialbedingten und betrieblichen Faktoren das ***Wachstum von Legionellen und Amöben im Wasser*** beeinflussen [35].

Nationale Zusammenarbeit

Von den laufenden 41 vom BFE unterstützten Forschungsprojekten wurden 11 Projekte mit **Fachhochschulen**, 17 Projekte mit **ETH-Instituten und Universitäten** und 10 Projekte mit der **Industrie** durchgeführt. An 24 Projekten waren planende **Ingenieurbüros** beteiligt und in 3 Projekten wurde mit **Branchenverbänden** und **Agenturen** zusammengearbeitet.

Es besteht eine enge Zusammenarbeit mit den Forschungsprogrammen ***Solarwärme, Elektrizität*** und ***Energiewirtschaftlichen Grundlagen***, mit denen programmübergreifende Projekte koordiniert und teilweise gemeinsam finanziert werden.

Eine weitere Projektkoordination und gemeinsame Projektdurchführungen findet mit den Bundesämtern ARE und BWO auf dem Gebiet der nachhaltigen Quartierentwicklung [5a] [6] [7] [8] [9]und mit dem BAFU (bisher BUWAL) und dem BBL im Ökologiebereich statt. Diese Ämter sind auch wesentlich beteiligt am **Schweizer Zentrum für Ökoinventare**, welches von Instituten des ETH-Bereichs getragen wird und mit dem weltweit umfassendsten Ökoinventar ***ecoinvent*** international grosse Beachtung findet.

Gemeinsame Projekte im Bereich *nachhaltiges Bauen* werden auch mit den Vereinen *Ecobau* und *Minergie* [1] resp. dem Hochbauamt der Stadt Zürich sowie im Bereich *elektrische Energie im Hochbau* mit dem *SIA* [12] und der Agentur *S.A.F.E.* [24] durchgeführt.

Im Rahmen des nationalen Kompetenznetzwerks ***brenet*** *(Building and Renewable Energies Network of Technology,* www.brenet.ch) konnten die Zusammenarbeit zwischen den Fachhochschulen und mit der KTI und der Industrie die Zusammenarbeit intensiviert werden. Das Netzwerk beteiligt sich auch an den neu gebildeten ***Kompetenznetzwerk Energy and Mobility*** des *ETH-Bereichs*.

Internationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit der Europäischen Union gestaltet sich schwierig. Der Gebäudebereich hat im 6. Rahmenprogramm keine hohe Priorität. Vereinzelte Projekte sind noch aus dem 5. Rahmenprogramm (FP5) laufend:

- ***ECCO-BUILD****, Energy and comfort control for building management systems, EPFL (FP 5)*
- ***RE-FRAME****, New window framing technologies for aerogel and other highly insulated glazing, Industry (FP 5)*
- ***Hope****, Health optimisation protocols for energy-efficient buildings, EPFL (FP 5)*
- ***SUNTOOL****, An environmental modelling tool to support sustainable urban planning, EFFL (FP 5)*
- ***BIO-Pro****, New burner technologies for low grade biofuels to supply clean energy, Ökozentrum, Langenbruck, (STREP FP6)*
- ***GenFC****, Generic Fuel Cell Modelling Environment, Empa (IP FP6)*

- ***TetraEner,*** *Komunale Energieplanung, City of Geneva (EU FP6 Concerto Program)*

Neue Impulse werden sicher von europäischen ***Energy Performance Building Directive (EPBD)*** ausgehen, welche weitgehende Anforderungen an bestehende und neue Bauten vorsieht und 2006 europaweit eingeführt werden soll.

Eine gute und intensive Zusammenarbeit findet jedoch weiterhin mit den **IEA-Programmen *Energy Conservation in Buildings and Community Systems (BCS)*** und ***Solar Heating and Cooling (SHC)*** statt. Die Schweiz war im Berichtsjahr an sechs Projekten engagiert:

- ***Sustainable solar buildings****, SHC Task 28,* Abschluss anfangs 2006 [10a]
- ***Daylighting buildings in the 21st century****, SHC Task 31,* Abschluss Ende 2005 [27a]
- ***Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools****, SHC Task 34,* 2004-2006 [22]
- ***High performance thermal insulation systems****, BCS Annex 39,* abgeschlossen [16]
- ***Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems****, BCS Annex 42,* 2004-2007 [23]
- ***Energy Efficient Electric Lighting for Buildings****, BCS Annex 45,* 2005-2008 [27] [28]
- ***Solar & Conservation Renovation of Housing****, SHC Task 37*, 2006 - 2008
- ***Prefabricated Systems for Low Energy and High Comfort Building Renewal****, BCS Annex 50,* 2006-2010.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Rahmen des Forschungsprogramms werden keine neuen Pilot- und Demonstrationsprojekte mehr gestartet (Sparmassnahmen beim Bund). Das Schwergewicht liegt auf dem Abschluss der bereits genehmigten Projekte und allenfalls auf der wissenschaftlichen Begleitung und Auswertung besonders interessanter Projekt. Entsprechend wurden von den laufenden acht Projekten deren 5 im Jahr 2005 abgeschlossen.

Eine Übersicht über sämtliche P+D-Projekte wird im Internet auf www.empa-ren.ch/ren/P+D-Kategorien.htm gegeben.

GEBÄUDESTANDARDS

Das Projekt ***Datenerfassung beim Synergiepark für erneuerbare Energien*** [36] beinhaltete die Bereitstellung der Messungen am Gebäude und den Solaranlagen auf dem Internet. Die erfassten Tages-, Monats- und Jahresdaten werden auf www.synergiepark.ch laufend aktualisiert und können von Interessierten eingesehen werden. Das Projekt ist abgeschlossen und läuft nun selbstständig weiter.

Mit dem ***Solarhaus Häni-Ruf in Altnau*** [37] konnte ein sehr schön gestaltetes Einfamilienhaus realisiert werden, das trotz ungünstiger Ausrichtung und Lage einen niedrigen Jahresenergieverbrauch aufweist, der zu 100 % über erneuerbare Energien (Holz und Sonne) gedeckt wird. Mit einem Holzverbrauch von 7-8 Ster (63 kWh/m^2) konnten allerdings keine Rekordwerte erreicht werden. Die flach auf dem Dach liegenden Vakuumröhrenkollektoren haben sich bewährt und stellen eine gute Alternative zu aufgeständerten Flachkollektoren dar. Rundum konnten so die hohen Ansprüche an die Gestaltung des Gebäudes, sowie die hohen Ansprüche an Komfort und Nutzung erneuerbarer Energien realisiert werden.

Das Projekt ***Wattwerk – 1. Plusenergie-Gewerbehaus*** [38] in Bubendorf BL erhielt 2004 den europäischen Solarpreis in der Kategorie *Betriebe und Unternehmen*. Das Gebäude soll mehr Energie produzieren als es verbraucht. Die Messungen wurden 2005 abgeschlossen und der Schlussbericht wird 2006 erscheinen. Informationen sind unter www.wattwerk.ch zu finden.

Figur 2: *Passivhausrenovation einer Altliegenschaft mit vorgefertigtem Dachstock (Arch. K. Viridén, Zürich) [39]; v.l.n.r: (1.) Die Liegenschaft vor der Renovation, (2.) Vorfabrikation des Dachstuhls mit Vakuumisolation, (3.) Montage des Dachstuhls, (4.) Die renovierte Liegenschaft: nahe am Minergie-P-Standard für Neubauten*

Die ***Minergie-P-Sanierung Zwinglistrasse*** [39] (s. Fig. 2) ist die Dritte in der Folge des Architekten K. Viridén. Die gesteckten Zielsetzungen konnten jedoch auch hier noch nicht ganz erreicht werden. Es zeigte sich, dass der Benutzereinfluss bei Gebäuden mit solch tiefen Verbrauchswerten wesentlich grösser ist als bei Gebäuden mit normalem Verbrauch. Immerhin liegt der normierte Heizwärmebedarf mit 11.9 kWh/m² nur unwesentlich über den angestrebten 10 kWh/m² pro Jahr. Dank hohem Anteil an Solarwärme für das Wärmwasser liegt die gewichtete Primärenergiekennzahl für sämtliche Energiebezüge mit 84.7 kWh/m² sogar wesentlich tiefer als die zulässigen 120 kWh/m².

HAUSTECHNIK

Beim Projekt ***CO_2-basierte Lüftungssteuerung für ein Wohnhaus*** in Wald [40] wurde die Anwendung neu entwickelter, kostengünstiger CO_2-Sensoren untersucht. Das vom Bewohner abgegebene CO_2 ist ein guter Indikator für die Luftqualität. Steigt der CO_2-Wert über 1000 ppm, so ist die Raumluftqualität beeinträchtigt, steigt er über 1500 ppm so ist die Luftqualität ungenügend. Die Untersuchung hat deutlich gezeigt, dass die Steuerung von Wohnungslüftungen über CO_2-Messungen klare Vorteile gegenüber herkömmlicher Handschaltung bringt. Die Komfortwerte sind insgesamt sehr gut. Zu trockene Luft konnte nicht registriert werden. Für die Steuerung der Lüftung wäre die Platzierung der CO_2-Messung in der Abluft geeigneter als der gewählte Standort des Sensors im Wohnzimmer. Der Lüftungsstromverbrauch reduzierte sich dank der CO_2-Steuerung um gut 50 %, d.h. vom *Minergie*-Planungswert von 1.9 kWh/m² und Jahr auf 0.89 kWh/m². Die Lüftungswärmeverluste werden dank der CO_2-Steuerung um gut 20 % reduziert (2.2 kWh/m² und Jahr statt 2.9 kWh/m²).

GEBÄUDEHÜLLE

Eishallen müssen auch bereits während der warmen Jahreszeit betrieben werden. Die Erwärmung des Eissfeldes erfolgt hauptsächlich über Wärmestrahlung. Das Projekt ***Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern*** [41] untersuchte deshalb die Wirkung von reflektierenden Deckenbekleidungen, welche die kalte Eisoberfläche widerspiegeln. Die Untersuchungen kamen zum Ergebnis, dass in Anbetracht des hohen Energiesparpotentials und der immer gegebenen Wirtschaftlichkeit, emissionsarme, insbesondere aus Aluminium gefertigte Deckenuntersichten für neu zu erstellenden Eissportanlagen aller Art zum verbindlichen Standard erklärt werden sollten.

Im Falle von Umbauten oder energetischen Sanierungen in Eishallen stellt der Einbau einer Aluminiumdeckenuntersicht sicher eine seriös zu prüfende, in den meisten Fällen wirtschaftlich interessante Optimierungsmassnahme dar. In den meisten Fällen konnten damit auch die Beleuchtungsverhältnisse verbessert werden.

Das Projekt ***SOLARIX-Wandheizsystem*** [42] verwendet eine neu entwickelte Solarfassade mit transparenter Wärmedämmung TWD (aussen) und vorfabrizierten Betonelementen (innen). *Solarix* vereinigt ein Heiz- und Kühlsystem mit folgenden Komponenten: Wandflächen mit Absorbern hinter den TWD-Fassaden, hydraulisches System zur Bodenheizung, Speicher resp. Erdregister, Steuerung der Kreise für den Heiz- und Kühlfall. Das geplante Pilotprojekt kann erst 2006 ausgeführt werden.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

2005 wurde eine Ausschreibung zu den sieben aktuellen Programmschwerpunkten durchgeführt:

- ***Alternative Kühlkonzepte für Niedrigenergiebauten***
- ***Minimierung Elektrizitätsverbrauch***
- ***Effizienzpotentiale bedarfsgeregelter Systeme***
- ***Entwicklung hochisolierter Bau- und Anlageteile mit integrierten Vakuum-Isolationspaneelen***
- ***Ökologische Beurteilung neuer Energiesysteme***
- ***Energieaspekte städtischer Quartiere und Agglomerationen***
- ***Umweltauswirkungen von Energiestandards***

Die Begleitgruppe des Forschungsprogramms hat 74 Projektanträge evaluiert und 33 für weiterführende Vertragsverhandlungen vorgeschlagen (www.empa-ren.ch/ren/Ausschreibung_05.htm). 19 Projekte konnten bereits gestartet werden, bei weiteren 6 Projekten sind die Vertragverhandlungen bereits abgeschlossen.

Ende 2005 wurde auch die Programmleitung neu ausgeschrieben und die Stelle konnte neu besetzt werden. 2006 wird deshalb die Überführung des Programms zum neuen Programmleiter stattfinden. Eine seiner ersten Aufgaben wird es sein, die Programmschwerpunkte 2008 – 2011 in Zusammenarbeit mit der Energieforschungskommission CORE festzulegen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)

[1] R. Dettli, (reto.dettli@econcept.ch), Econcept, *Zürich:* ***Umweltwirkungen von Gebäudestandards: Perspektiven für den Gebäudepark Schweiz*** (JB).

[2] A. Primas, (alex.primas@bhz.ch), Basler&Hofmann AG, *Zürich*: a) ***Ökologische Bewertung neuer WKK-Systeme und Systemkombinationen*** (JB) ◆ b) ***Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen.***

[3] M. di Paolantonio, (m.dipaolantonio@holligerconsult.ch), Holliger Consult GmbH, *Epsach:* ***Realisierung elektronischer Bauteilkatalog***.

[4] R. Sigg, (sigg@intep.de), Intep, *Zürich:* ***Minergie-Eco – Systemnachweis für nachhaltige Hochbauten.***

[5] A. Binz, (a.binz@fhbb.ch), FHBB, *Muttenz:* a) ***Nachhaltige Quartierentwicklung Basel Gundeldinger Feld – Lehrpfad Nachhaltigkeit*** ◆ b) ***Vakuum-Dämmung im Baubereich – Systeme und Applikationen*** (Beitrag IEA BCS Annex 39) (SB) ◆ c) ***Bauelemente und Systeme mit VIP für Aussenwand und Dach.***

[6] D. Robinson, (darren.robinson@epfl.ch), EPF LESO-PB, *Lausanne:* ***Nachhaltige Quartierentwicklung Lausanne Bellevaux.***

[7] J. Inderbitzin, (buero.bitzi@bluewin.ch), HSW, *Luzern:* ***Nachhaltige Quartierentwicklung Luzern Basel-Bernstrasse.***

[8] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, *Zürich:* ***Checkliste Ersatzneubau*** (JB).

[9] R. Stulz, (roland.stulz@novatlantis.ch), novatlantis, *Zürich:* ***Projektkoordination Nachhaltige Quartierentwicklung*** (JB).

[10] R. Hastings, (robert.hastings@freesurf.ch), AEU, *Wallisellen:* a) **IEA/SHC Task 28: Sustainable Solar Buildings (Nachhaltige Solar-Wohnbauten)** (SB) ◆ b) **Wandkonstruktionen für Minergie-P Häuser** (JB).

[11] T. Andris, (tom.andris@renggli-haus.ch), Renggli AG, *Schötz:* ***Marktanalyse Passivhaus Schweiz*** *(Beitrag IEA/SHC Task 28)* (SB).

[12] W. Seidinger, (seidinger@lemonconsult.ch). Lemon Consult, *Zürich:* ***Update Software 380/4 für Lüftung, Kühlung, Beheizung*** (SB).

[13] B. Keller, (bkeller@hbt.arch.ethz.ch), Professur für Bauphysik, ETH, *Zürich:* ***Weiterentwicklung der Klimaflächenmethode und -software zu erhöhter Praxisverwendbarkeit***.

[14] Th. Frank, (thomas.frank@empa.ch),EMPA, *Dübendorf:* ***Überarbeitung Programm HELIOS*** (SB).

[15] C.U. Brunner, (cub@cub.ch), Büro CUB, *Zürich:* ***Bauen, wenn das Klima wärmer wird*** (JB).

[16] M. Erb, (markus.erb@eicher-pauli.ch), Eicher+Pauli AG, *Liestal:* ***High Performance Thermal Insulation in Buildings (IEA/BCS Annex 39)*** (SB).

[17] H. Simmler, (hans.simmler@empa.ch), Empa, *Dübendorf:* ***Vakuum-Dämmsysteme im Baubereich – Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen*** (IEA/BCS Annex 39) (JB).

[18] M. Jordi, (Martin.Jordi@renggli-haus.ch),Renggli AG, *Schötz:* ***Entwicklun eines VIP-Passivhausfassadenelements*** (JB).

[19] O. Huth, (olaf.huth@empa.ch), Empa, *Dübendorf:* ***Thermotragelemente aus hochfestem Faserverbundstoff und integrierten Vakuumisolationspaneelen (VIP)*** (JB).

[20] W. Mantsch (walter.mantsch@toblerag.ch), Tobler AG, *Urdorf:* ***Entwicklung eines kompakten Fussbodenheiz-/Kühlelements mit integriertem VIP*** (JB).

[21] A. Romanyuk, (andriy.romanyuk@unibas.ch), Universität *Basel:* ***Neue optische Beschichtungen für transparente Gebäudeteile im Hinblick auf einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz*** (JB).

[22] H. Manz, (heinrich.manz@empa.ch), Empa, *Dübendorf:* a) ***Empirische Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen*** (IEA/SHC Task 34) (JB) ◆ b) ***Passive cooling by night-time ventilation using climate responsive elements*** (JB).

[23] V. Dorer, (viktor.dorer@empa.ch), EMPA, *Dübendorf:* **Building Integrated Fuel Cell and other Cogeneration Systems** (IEA/BCS Annex 42) (JB).

[24] J. Nipkow, (juerg.nipkow@arena-energie.ch), Agentur S.A.F.E., *Zürich,* ***Hilfsenergie Haustechnik: Einsparpotentiale und Umsetzungspfade*** (JB).

[25] R. Furter, (rfurter@hta.fhz.ch), HTA, *Luzern/Horw:* ***Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte für Komfortlüftung*** (SB).

[26] J.-M. Chuard, (chuard@enerconom.ch), Enerconom, *Bern:* ***Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance*** *(IEA BCS Annex 40)* (SB).

[27] J.-L. Scartezzini, (jean-louis.scartezzini@epfl.ch), EPF LESO-PB, *Lausanne:* **a) Daylighting Buildings in the 21st Century (IEA/SHC Task 31)** (SB) ◆ **b) Dispositifs d'éclairage intégrés à haute performance énergétique** (JB).

[28] G. Courret, (gilles.courret@heig-vd.ch), Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, *Yverdon:* ***Environmental friendly high efficient light source*** (JB).

[29] P. Karlstroem, (Petra.Karlstroem@aerni.ch), Robert Aerni Ing. AG, *Dietlikon:* ***MICS – Multiple integrated climate system*** (SB).

[30] P. Hollmuller, (Pierre.Hollmuller@cuepe.unige.ch), CUEPE Université de *Genève:* ***Rafraîchissement passiv Coolshift*** (JB).

[31] B. Matthey. (info@masai-conseils.com), B. Matthey Ingénieurs-Conseils SA, *Montezillon:* **Réseau de distribution d'eau de lac et d'eau souterraine pour couvrir les besoins en rafraîchissement et en chaleur de l'environnement des bâtiments** (JB).

[32] Th. Afjei, (thomas.afjei@fhbb.ch), FHBB, *Muttenz:* ***Heizen und Kühlen mit reversiblen Wärmepumpen*** (JB).

[33] M. Conde, (MANUEL_R_CONDE@compuserve.com), M. Conde Engineering, *Zürich* ***Open absorption system for cooling and air conditioning using membrane contactors*** (JB).

[34] E. Füglister, (erich.fueglister@amstein-walthert.ch), Amstein+Walthert AG, *Zürich:* ***Methode zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs von Warmwasseranlagen*** (SB).

[35] H. Hilbi, (hubert.hilbi@micro.biol.ethz.ch), ETH Institut für Mikrobiologie, *Zürich:* ***Wachstumsregulation von Legionella pneumophila in Biofilmen und Amöben*** (JB).

Liste der P+D-Projekte

[36] P. Schibli, (synergiepark@bluewin.ch) Heizplan AG, *Gams:* **Datenerfassung Synergiepark für erneuerbare Energien**.

[37] P. Dransfeld, (dransfeld@dransfeld.ch) Architekt, Ermatingen: ***Solarhaus Häni*** - Ruf, Altnau (SB).

[38] H. Holinger, (heinrich@holinger-solar.ch), Holinger Solar AG, *Liestal:* ***Wattwerk- erstes Plusenergie-Gewerbehaus*** (JB).

[39] K. Viridén, (viriden@viriden-partner.ch), Viridén+Partner, *Zürich:* ***Passivhaus-Umbau Zwinglistrasse*** (SB).

[40] W. Hässig, (whaessig@BHZ.ch), B+H, *Zürich:* ***CO_2-basierte Lüftungssteuerung für ein Wohnhaus*** (SB).

[41] F. Gachnang, (gachnang@eta-energietechnik.ch), eta Energietechnik, *Winterthur*: ***Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern*** (SB).

[42] P. Oesch, (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, *Bern:* ***P+D-Projekt mit Messungen SOLARIX- Wandheizsystem Solarix.***

Referenzen

[43] M. Zimmermann, Hans-Jörg Althaus, Anne Haas: ***Benchmarks for sustainable construction - A contribution to develop a standard for the evaluation of the ecological sustainability of buildings***, Energy And Buildings, November 2005, Pages 1147-1157.

[44] ***M. Zimmermann: Passivhaus und 2000-Watt-Gesellschaft – Welches sind die Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung?*** 9. Int. Passivhaus Tagung, Ludwigshafen DE, 2005.

[45] ***M. Zimmermann: 7th International Vacuum Insulation Symposium***, Empa, Duebendorf CH, September 28-29, 2005.

PROGRAMM VERKEHR / AKKUMULATOREN

Martin Pulfer
martin.pulfer@bfe.admin.ch

Weltrekord mit PAC-Car II

Nach Jahren der Forschung und Entwicklung, der Optimierung und der nervlichen Belastungen der Moment des Triumphs und der Entspannung: Mit 5385 km Reichweite pro Liter Benzinäquivalent wurde der alte Weltrekord förmlich pulverisiert.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach wie vor ist der **Verkehr in der Schweiz der grösste Energieverbraucher**. Gegenwärtig benötigt er, bei zumeist steigender Tendenz, rund einen Drittel der Endenergie in unserem Lande. Mit 48,6 % (Stand 2000, inkl. Flugverkehr) hat er auch den höchsten Anteil an den Emissionen des Treibhausgases CO_2.

Der Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen können durch ein **adäquates Mobilitätsverhalten** drastisch gesenkt werden. Gerade während einer Phase mit hohen Luftschadstoffbelastungen (beispielsweise im Sommer) und insbesondere in den Agglomerationen der Städte sollten möglichst viele Kurzstreckenfahrten mit dem PW umweltschonend, energie- und zeitsparend durch ein einspuriges Verkehrsmittel (Velo, E-Bike, E-Scooter, etc.) oder durch eine Fahrt mit dem öffentlichen Verkehr ersetzt werden. Auch bei PW-Fahrten mit dem Fahrstil *Eco-Drive* kann 10 –15 % Treibstoff eingespart werden. Hierbei sind auch der Pneudruck, Luftwiderstand und Ballast gebührend zu berücksichtigen. Durch den Kauf eines effizienten Personenwagens lassen sich, gegenüber einem ineffizienten, bei gleicher Sitzplatzzahl, gleichem Nutzvolumen und Komfort, gut 30 % Treibstoff sparen. Das **Forschungsprogramm *Verkehr*** untersucht Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs im Verkehr, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Erreicht werden damit auch eine Reduktion der Umweltbelastung sowie die Stärkung des Industriestandorts Schweiz. Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr wird dabei vor allem mit folgenden Ansätzen angestrebt:

- Leichtere und / oder kleinere Fahrzeuge,
- Effizientere Antriebsstränge,
- Optimiertes Verhalten beim Fahrzeugkauf.

Das **Programm *Akkumulatoren*** erforscht die Möglichkeiten zur verbesserten elektrochemischen und elektrostatischen Energiespeicherung. Die Schwerpunkte liegen insbesondere bei:

- *Zebrabatterie:* System mit sehr hoher Energiedichte, nahe der Marktreife und einem weiterhin vorhandenen grossen Verbesserungspotential.
- Super-Cap: Hochleistungskondensatoren mit einer sehr hohen Leistungsdichte (aber tieferen Energiedichte) und einer sehr langen Lebensdauer
- Blei-Akkumulatoren: bewährte, aber immer noch verbesserungsfähige Batterien

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

VERKEHRS-VERHALTEN UND GRUNDLAGEN

Das Forschungsprojekt ***Finanzielle Anreize für eneregieeffiziente Fahrzeuge*** [1] von RappTrans Zürich und Interface Luzern hatte zum Ziel, die Wirkung solcher Anreize am Beispiel der Förderprojekte VEL2 und NewRide zu evaluieren. In den betrachteten Förderprojekten konnte eine deutliche Wirkung der finanziellen Anreize nachgewiesen werden, die jedoch nicht für alle Fahrzeugkategorien das gleiche Ausmass erzielte. Es ist zu beachten, dass finanzielle Anreize nur im Kontext einer kontinuierlichen Kommunikationstätigkeit wirken. Bei den geförderten Benzin- und Dieselfahrzeugen konnte der Anteil der geförderten Modelle mehr als verdoppelt werden. Im Bereich der Elektrofahrzeuge haben die finanziellen Anreize sehr stark gewirkt. Allerdings führten die hohen Fahrzeugbeiträge und die eher niedrigeren Fahrleistungen dieser Fahrzeuge zu einem schlechten Kosten-Nutzen-Verhältnis bezüglich Energieeinsparung. Das Angebot in diesen Fahrzeugkategorien stagniert seit etwa einem Jahrzehnt. Die staatliche Förderung dieser Fahrzeuge ist vor diesem Hintergrund zu überdenken. Eine Ausnahme stellen die E-Bikes dar: Das Angebot hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert und die Absatzzahlen sind kontinuierlich gestiegen. Effiziente Fahrzeuge können zur Erreichung von unterschiedlichen Zielsetzungen gefördert werden, so dass eine allgemeine Aussage zur Erwünschtheit der Förderung nicht möglich ist. Im Hinblick auf die in diesem Forschungsprojekt vor allem untersuchten Auswirkungen bezüglich des CO_2-Ausstosses hat sich die Förderung von effizienten Diesel-, Benzin- oder Hybrid-PW als besonders Erfolg versprechend erwiesen.

Cleaner Drive [2] stellte ein 3-jähriges EU – Forschungsprojekt dar, welches von der EU (DG Transport and Energy TREN) und in der Schweiz vom Bundesamt für Strassen (ASTRA) und vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt wurde. Cleaner Drive war ein Netzwerk von Projektpartnern aus folgenden Ländern: Belgien, Deutschland, Frankreich, Grossbritannien, Holland, Italien, Österreich, Schweden und der Schweiz. In der Schweiz war e'mobile der Projektverantwortliche.

Das Ziel war die Verhinderung resp. Überwindung von Markthindernissen bei der Markteinführung von neuen Fahrzeuggenerationen.

Das Projekt war in die drei Teilprojekte *Umweltbewertungssystem, Entscheidungshilfe Fahrzeugkauf und Infrastruktur* unterteilt:

Das **Umweltbewertungssystem** berechnet für jedes Fahrzeug den so genannten Cleaner Drive-Index, eine dimensionslose Umweltbewertungszahl zwischen 100 und 1. Berücksichtigt werden Treibhausgase (CO_2, CH_4, N_20) und Luftschadstoffe (CO, HC, NO, PM10, SO_2) sowohl beim Betrieb des Autos als auch bei der Herstellung des Treibstoffs. Die Gewichtung der einzelnen Indikatoren erfolgt über externe Kosten, basierend auf dem EU-Projekt ExternE.

Obwohl Verkehrslärm eine bedeutende Umweltbelastung darstellt, wird er in der Umweltbewertungsmethode nicht erfasst, weil die Daten zu wenig aussagekräftig sind. Die Problematik wird jedoch auf der Cleaner Drive-Website ausführlich behandelt. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden in der aktuellen Version Bio-Treibstoffe. Die verfügbaren Daten reichen nicht aus, um den Ansprüchen des Cleaner Drive- Umweltbewertungssystems zu genügen; zu viele Kompromisse und Verallgemeinerungen müssten in Kauf genommen werden. Die Vorzüge von Bio-Treibstoffen werden aber auf der Homepage (siehe www.e-mobile.ch, Rubrik *Fahrzeuge und Treibstoffe*) ausführlich beschrieben.

Das oben beschriebene Umweltbewertungssystem wurde in eine Website integriert und für den Benutzer anwendbar gemacht, damit dieser sie als **Entscheidungshilfe** beim Autokauf einsetzen und den Umweltaspekten vermehrt Beachtung schenken kann. Besondere Herausforderungen sind die Anwendbarkeit für verschiedene Länder und Sprachen. Der Benutzer wird in 5 Schritten durch die Entscheidungshilfe geführt. Die Inputdaten zu den Fahrzeugen wurden national erfasst und aufbereitet, anschliessend wurden sie zentral in die Datenbank eingebaut.

Infrastruktur für gasförmige Treibstoffe: Ende 2001 hat die EU in einer Richtlinie eine Zielvorgabe für den Einsatz von alternativen Treibstoffen bis ins Jahr 2020 gesetzt. Danach sollen die Anteile von Erdgas und Wasserstoff am gesamten Treibstoffverbrauch in der EU auf 10 resp. 5 % ansteigen.

Der Aufbau des Tankstellennetzes gilt als die grösste Hürde zur Erreichung des EUZiels für 2020. Aus ökonomischer Sicht drängt sich eine Etappierung dieses Aufbaus in drei Phasen auf:

- Test und Demonstration,
- Geografische Abdeckung,
- Kommerzialisierung.

Daneben spielen, vor allem in der Anfangsphase, Grossflottenbetriebe eine bedeutende Rolle.

Die Kosten für den Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes für Methan (Erdgas und Biogas/Kompogas) wurde aufgrund der aktuellen Preise abgeschätzt, wobei aufgrund der zu erwartenden technologischen Entwicklung von einer Kostenreduktion von 30 - 50 % (je nach Tankstellentyp) ausgegangen wurde. Aus diesen Berechnungen resultiert ein notwendiges Investitionsvolumen von 10 bis 12 Milliarden *€.*

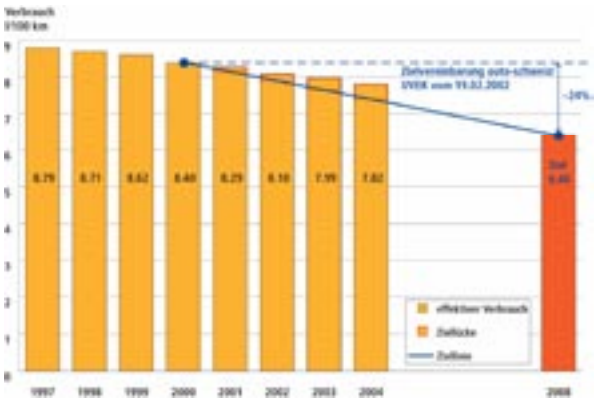
Ein analoger Ansatz ergab für den Aufbau eines Tankstellennetzes für Wasserstoff ein Investitionsvolumen von 26 Milliarden *€,* wobei hier der Absatz nur 5 % des gesamten Treibstoffverbrauchs beträgt (im Gegensatz zu 10 % für Methan). Zur Zeit existieren erst sehr wenig Tankstellen für Wasserstoff. Deshalb wurde diese Extrapolationsmethode mit einer Analyse verschiedener Studien erhärtet. Insgesamt wurden 79 verschiedene Wasserstoffpfade miteinander verglichen. Sie führten zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen; der Durchschnitt der ermittelten Investitionskosten beträgt 36 Milliarden *€.*

Im Rahmen des Forschungsprogramms Energiewirtschaftliche Grundlagen untersuchte die ETH Zürich im Projekt ***Autoklassen - Wechselverhalten*** [3] die Wirkung von Lenkungsabgaben beim Neuwagenkauf. Eine gleichmässig erhöhte Autoimportsteuer für alle Neufahrzeuge und ein abgestufter haushaltsneutraler Bonus für die Fahrzeuge der Effizienzkategorien A und B senkt den Verbrauch der Neuflotte 1.6% (s. Fig. 1). Durch diese Untersuchung konnten die Ergebnisse einer früheren Studie von Infras Bern zu diesem Thema bestätigt werden.

Die vom Schweizerischen Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich, finanzierte ***Busvergleichsstudie*** [4] vergleicht die aktuellsten Erdgas- versus Dieselbusse. Im Durchschnitt benötigten die Erdgasbusse 14 % mehr Energie, emittierten aber rund 15 % weniger CO_2 und schnitten bezüglich der Schadstoffemissionen besser, bezüglich den toxischen deutlich besser ab.

Im Rahmen des ***Erlebnisraum Mobilität der Pilotregion Basel*** [5] sollen dort bis ins Jahr 2010 hundert Umwelttaxis in Verkehr gesetzt werden. In diesem Projektrahmen analysiert das *BFE-Gas- und Hybridtaxiprojekt* der Arbeitsgemeinschaft *PSI Sustainsurv* die Erfolgsfaktoren und Stolpersteine, beantwortet Akzeptanzfragen und zeigt die Kosten- und Nutzen-Verhältnisse auf. In einem nächsten Schritt werden Umfragen bei Erdgastaxi-Benützern, Fahrern und Haltern durchgeführt, sowie begleitend ein Simulationsmodell entwickelt, in welchem wichtige Prozesse der Umstellungsstrategie auf Umwelttaxis und deren Kosten- und Umwelt-Auswirkungen abgebildet und analysiert werden. Das Projekt wird voraussichtlich Ende 2006 abgeschlossen werden.

NewRide [6] ist das vom BFE unterstützte Promotionsprogramm für Elektrozweiräder. Im Rahmen der Begleitforschung dieses Programms wurde durch Interface, Luzern, die Wirkung der seit 2001



Figur 1: *Minderung des Treibstoffverbrauchs der Schweizer Fahrzeug Neuflotte. Zur Zeit besteht eine beträchtliche Ziellücke.*

laufenden Förderaktivitäten mittels Kundeninterviews analysiert. Es zeigte sich, dass beispielsweise bei Betriebsanlässen (Information / Schulung / Probefahren) das Kosten-Nutzen-Verhältnis in der Regel deutlich schlechter ist, als die gleiche Promotion an grossen Besuchermessen. Deshalb wurde beschlossen, Betriebsanlässe in der heutigen Form nur noch bei Grossbetrieben (ab ca. 500 Mitarbeitern) durchzuführen. Ein Interesse des Betriebes über die eigene Imagepflege oder die unverbindliche Sensibilisierung für die Problematik hinaus ist aber unabdingbare Voraussetzung. Eine Kurzevaluation der Gemeinde-Projekte zeigte zudem, dass die Gemeinden die Produkte von NewRide schätzen und die Zusammenarbeit mit dem NewRide-Sekretariat gut klappt. Die Gemeinden betonten darüber hinaus die entscheidende Bedeutung der finanziellen Unterstützung durch NewRide für die Akzeptanzschaffung gegenüber den Gemeindebehörden und der Bevölkerung.

Das Projekt ***e-rent*** [7] der Arbeitsgruppe SOKW (Solarkraftwerk Wohlen bei Bern) erprobte einen Mietservice für Elektrofahrzeuge, mit dem Ziel, ein sinnvolles Ergänzungsangebot zu ÖV und Car Sharing (Mobility) aufzubauen. Damit sollte dem Bedürfnis nach individueller Mobilität durch Förderung des Einsatzes energiesparender und umweltschonender Elektro-Fahrzeuge nachgekommen werden. Der Strom wurde vom Solarkraftwerk Wohlen bezogen. Das Mietangebot sollte Jedermann die Gelegenheit geben Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen zu machen ohne zuerst einen hohen Anschaffungspreis in Kauf nehmen zu müssen und sich dennoch umweltbewusst fortbewegen zu können. Das Mietangebot umfasste 2 Elektroroller und 2 Elektropersonenwagen. Elektrofahrzeuge eigneten sich nicht für einen Mietservice. Die Handhabung mit der Ladung durch die NutzerInnen erwies sich im Mietsystem als zu kompliziert und wirkte sich auf die Lebensdauer der Batterien nachteilig aus. Die Reparaturkosten stellten sich dem entsprechend hoch ein. Im Winter wurde von Scoot'elec-Angebot, wegen der Kälte, wenig Gebrauch gemacht. Der erwartete Erfolg blieb unter den Erwartungen. Deshalb wurde das Projekt *e-rent* nach fünf Jahren eingestellt.

ANTRIEBSSYSTEME

Das Projekt ***PALOS II*** [8] der ETH Zürich umfasst zwei Teilprojekte: (1.) Modellierung und optimale Leistungsregelung eines Hybriden PEM-Brennstoffzellensystems und (2.) Druckwellenlader für Ottomotoren.

Im ersten Teilprojekt wird ein Regelsystem für eine hybride Brennstoffzelle optimiert. Brennstoffzellen gelten künftig für eine Vielzahl von Anwendungen (z.B. automobile Antriebe, Notstromaggregate) als vielversprechende Alternative. Die hohe Leistungsdichte, die tiefen Betriebstemperaturen und ihre Eigenschaft rasch auf Lastwechsel reagieren zu können, macht die Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Brennstoffzelle zur bevorzugten Technologie für Anwendungen, welche durch stark transiente Betriebsbedingungen gekennzeichnet sind. Brennstoffzellen funktionieren nur in einem relativ engen Temperaturbereich optimal. Um die Leistungseinschränkungen der Brennstoffzellen während des Warmlaufvorgangs zu kompensieren, werden die Systeme daher hybridisiert, d.h. durch einen elektrischen Energiespeicher (z.B. eine Batterie) ergänzt. Überdies macht der Einsatz von elektrischen Zuheizern Sinn, um die Warmlaufphase zu verkürzen.

Neben der Regelung der Temperatur auf den Betriebspunktwert kommt der optimalen Leistungskontrolle (power control) des Systems während der Warmlaufphase eine wichtige Bedeutung zu. Ziel ist es, das System möglichst rasch auf Betriebstemperatur zu bringen und dabei die Ladung im elektrischen Energiespeicher zu erhalten (charge-sustaining operation). Um das dynamische Verhalten eines solchen hybriden Brennstoffzellensystems systematisch zu analysieren, wurde zuerst ein mathematisches Modell hergeleitet und validiert. Basierend auf diesem Modell wurden dann einerseits robuste Regler für die Temperaturregelung des Systems entwickelt und andererseits optimale Strategien für einen beschleunigten Warmlaufvorgang synthetisiert. Die Strategien wurden als Feedback-Regelgesetze formuliert, was deren praktischen Einsatz ermöglicht. In simulierten Zyklen konnte die Funktionsweise der Regelgesetze verifiziert und klare Verbesserungen gegenüber alternativen Systemkonfigurationen aufgezeigt werden.

Im zweiten Teilprojekt wird der Einsatz von Druckwellenladern für Ottomotoren analysiert. Benzinmotoren verfügen über ein ausgezeichnetes Emissionsverhalten, aber unterliegen den Dieselmotoren bezüglich Wirkungsgrad. Traditionell wird die Last von Benzinmotoren über eine Drossel im Ansaugtrakt eingestellt. So wird die Dichte im Ein-

lasskrümmer und schliesslich der vom Motor angesaugte Massenstrom variiert. Diese Methode ist billig und weist ein vortreffliches dynamisches Verhalten auf, aber der Motorwirkungsgrad sinkt massgeblich im Teillastbetrieb. Personenwagen werden aber am häufigsten in der Teillast betrieben, was tiefe Wirkungsgrade beziehungsweise einen hohen Verbrauch bewirkt.

Zahlreiche Massnahmen sind vorgeschlagen worden, um Motoren nur teilgedrosselt oder ungedrosselt zu betreiben. Ein Konzept besteht darin, den Motor-Hubraum zu reduzieren und die Leistung über Aufladung zurück zu gewinnen. Heutzutage werden verbreitet Abgasturbolader eingesetzt, wobei die nach dem Auslasskrümmer im Rauchgas vorhandene Enthalpie dazu verwendet wird, einen Kompressor anzutreiben, welcher seinerseits die Frischluft im Einlasskrümmer verdichtet. Im Gegensatz dazu stehen in Druckwellenladern Rauchgas und Frischluft in direktem Kontakt. Die Enthalpieübertragung erfolgt durch einen gasdynamischen Prozess, wobei Druckwellen in den beiden Medien hin und her laufen. Aufgrund dieses Prinzips zeichnen sich Druckwellenlader durch ein gutes Ansprechverhalten und durch über den gesamten Betriebsbereich hohe Wirkungsgrade aus. Beides steigert die Fahrbarkeit beim Einsatz in Personenwagen.

Moderne Druckwellenladersysteme bieten die Möglichkeit, über drei unabhängige Stellglieder in den Prozess einzugreifen: Gastaschen-Zufluss-Ventil, Rotordrehzahl und Winkelversatz zwischen Luft- und Gasgehäuse lassen eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten zu, wie die Massenströme und schliesslich das Motordrehmoment zu beeinflussen sind.

Während hohen Lastsprüngen können dann kritische Situationen entstehen, wenn grosse Mengen an Rauchgas durch den Lader zurück in den Ansaugtrakt transportiert werden. Dieser Effekt - auch als Abgasrezirkulation (AGR) bezeichnet - bewirkt einen markanten Drehmomenteinbruch und verschlechtert dadurch die Fahrbarkeit merklich. Durch eine koordinierte Betätigung der Steller sind aber solche Situationen vermeidbar. Das Protokoll befasst sich deshalb mit der Entwicklung von physikalischen Modellen, mit denen es möglich wird, sowohl stationäre als auch transiente Effekte von Motor und Lader simulieren zu können.

Einführend wird ein Modell vorgestellt, welches auf Grundprinzipien der Gasdynamik aufbaut. Die so genannten Eulergleichungen, ein Satz von partiellen Differentialgleichungen, werden mit Hilfe eines finite-Differenzen-Verfahrens numerisch gelöst. Das Modell berücksichtigt die eindimensionale Gasdynamik und auch Effekte wie Leckage, Wärmeübergang, Reibung und veränderliche Stellgrössen. Ein Vergleich mit Messresultaten von einem Motor mit Druckwellenlader zeigt, dass die Resultate über einen grossen Betriebsbereich innerhalb von 5% liegen.

Ausgehend von diesem finite-Differenzen-Modell wird ein vereinfachtes, regelungstechnisch orientiertes Mittelwertmodell abgeleitet. Der daraus resultierende verringerte Rechenaufwand ermöglicht den Einsatz dieses statischen Druckwellenlader-Modells in einer Simulationsumgebung, womit das dynamische Verhalten des gesamten Motorsystems nachgebildet werden kann.

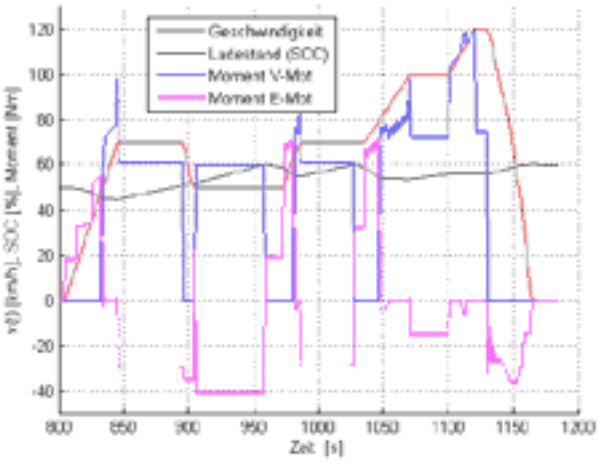
Basierend auf diesen Modellen wird ein Regelkonzept entworfen und experimentell am Motor überprüft. Der Regler vermag die während Lastsprüngen auftretenden AGR-Effekte zu verhindern, und der Lader wird wirkungsgrad-optimal betrieben. Diese neuen Regelkonzepte haben das Potential, die Akzeptanz von verbrauchsgünstigen druckwellenaufgeladenen Motoren markant zu steigern.

Vom Projekt ***Kraftstoffsparende Antriebssysteme*** [8] der ETH Zürich konnte im Berichtsjahr das Teilprojekt **Optimierte Hybridstrategien** gestartet werden. Die Automobilindustrie setzt seit einigen Jahren verstärkt auf Hybridfahrzeuge im Bereich Personenkraftwagen. Diese basieren auf einer Kombination von Verbrennungsmotor und Elektromotor. Diese hybride Struktur ermöglicht eine Vielzahl von Betriebsmodi: Bei Stillstand des Fahrzeuges kann der Verbrennungsmotor abgeschaltet werden ohne dabei Verzögerungen beim Anfahren in Kauf nehmen zu müssen. Beim Abbremsen kann ein Teil der kinetischen Energie in Form von elektrischer Energie rekuperiert werden. Im Fahrbetrieb kann rein elektrisch, rein thermisch oder kombiniert angetrieben werden. Diese Vielzahl von Freiheitsgraden der Steuerung des Systems erlaubt einer angepassten Betriebsstrategie den Verbrauch signifikant zu reduzieren.

In diesem Projekt sollen modellbasierte Strategien entwickelt und untersucht werden die den Verbrauch von Hybridfahrzeugen minimieren. Dabei muss die geforderte Fahrleistung stets erfüllt werden um den Komfort und die Sicherheit zu garantieren. Zusätzlich muss die Strategie garantieren, dass keine elektrische Energie dem Fahrzeug extern zugeführt werden muss.

In Zusammenarbeit mit Robert *Bosch GmbH* wurde eine akausale, modellbasierte Strategie in eine Simulation zur Potentialabschätzung und Komponentendimensionierung implementiert. Parameter müssen dabei iterativ gefunden werden. Dabei stützt sich die numerische Optimierung der Parameter auf mehrfache Auswertung der Simulation über den Fahrzyklus (s. Fig. 2). Folglich basieren die Parameter der Strategie auf dem Zyklus und die Strategie ist nicht mehr kausal. Das Projekt fokussiert parallele Hybridfahrzeuge. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus der Simulation im NEFZ.

Zukünftig werden kausale Strategien entwickelt. Diese sind modellbasiert, was einerseits die Implementation in verschiedene Fahrzeugmodelle deutlich vereinfacht und andererseits den Einsatz von mathematischen Optimierungsmethoden zulässt. Es werden sowohl analytische als auch numerische Betriebsstrategien untersucht. Die gefundenen Strategien sollen so erweitert werden, dass sie durch Adaption an den Fahrer und seine typischen Fahrstrecken den Verbrauch weiter senken. Es ist weiter vorgesehen auch Informationssysteme (GPS, Radar) einzubeziehen um Schätzungen über den zukünftigen Fahrverlauf zu erhalten und darauf basierend den Fahrzeugbetrieb zu optimieren.



Figur 2: *Simulation im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)*

Das 2005 gestartete Projekt ***CLEVER*** [9] der bewährten Projektpartner EMPA / ETH, Volkswagen, Bosch, Corning und Engelhard entwickelt einen hybriden Antrieb mit Erdgas als Treibstoff. Das Projekt nutzt das Wissen aus dem CEV Projekt (siehe Jahresbericht 2004) und strebt eine dauerhaltbare Nullemissionstechnologie für Erdgasfahrzeuge an und macht die Erdgasmotortechnologie fit für Hybridanwendungen. Der Projektinhalt und die Zusammenarbeit wurde zwischen den Projektpartnern in der Vorphase abgestimmt. Die Resultate bezüglich der dauerhaltbaren Nullemissionstechnologie können kurzfristig in die Serienentwicklung von Volkswagen einfliessen während die Hybridtechnologie auf eine längerfristige Umsetzung zielt. Das Projekt wird neben der Unterstützung durch die Industriepartner vom ETH-Rat, dem BAFU und dem BFE unterstützt.

Unter Beteiligung diverser Forschungs- und Wirtschaftspartner wurde im Projekt ***Brennstoffzellen-SAM*** [10] an der HTI Biel ein Brennstoffzellen-Batterie-System entwickelt und in das Leichtelektromobil SAM der Firma CREE integriert.

Der PEM-Brennstoffzellenstapel ist mit einer Dauerleistung von 6 kW auf den mittleren Leistungsbedarf des Fahrzeugs bei Überlandfahrten ausgelegt. Die maximale Antriebsleistung von 15 kW bei Beschleunigungsvorgängen und bei Bergfahrten wird durch einen Hybrid mit Lithium-Polymer-Akkumulatoren bereitgestellt. Der für die Brennstoffzelle benötigte Wasserstoff wird in Metallhydridspeichern bei relativ niedrigem Betriebsdruck auf dem Fahrzeug mitgeführt.

In ausgedehnten Tests auf dem Rollenprüfstand der HTI, im Stadt- und Überlandbetrieb wurde der stabile Betrieb der Systeme nachgewiesen. Die Fahrleistungen (Beschleunigung, Endgeschwindigkeit) der Originalversion des SAM mit Bleibatterien bleiben unverändert gut, wobei die Reichweite auf rund 130 km verdoppelt werden konnte.

Insgesamt hat das Fahrzeug bis zum Projektabschluss rund 300 km ohne grössere Störungen zurückgelegt. Es konnten dabei die Auslegungsleistungsdaten des Fahrzeugs mit einer Spitzengeschwindigkeit von 80 km/h und einer Beschleunigung mit 15 kW Antriebsleistung bestätigt werden. Die Testserien erbrachten mit gefüllten Speichern eine Reichweite von über 128 km. Auf eine Distanz von 100 km kann bei einer *normalen* Beanspruchung ein Wasserstoffverbrauch von 464g H_2 abgeleitet werden. Mit den Heizwerten von Wasserstoff und Benzin umgerechnet, ergibt sich ein Verbrauch von 1.67 l Benzin auf 100 km.

Die Entwicklung eines Erdgasantriebes für das Leichtbaufahrzeug SAM im Projekt ***Naturgas-SAM*** [4] des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches SVGW, Zürich, in Zusammenarbeit mit der SamSon GmbH, Biel, musste wegen Überlastung letzterer unterbrochen werden. Die SVGW beabsichtigt 2006, mit einem neuen Partner, das Projekt erfolgreich abzuschliessen und die Umsetzung anzustreben.

Ateliers d'études de construction automobiles (A.C.A.) von Franco Sbarro entwicklte, erprobte und optimierte in den vergangenen zwei Jahren in Grandson ein ***hydropneumatisches Rekuperationssystem*** [11] für Personenwagen. Dieses funktioniert einerseits auf der Rekuperation der Fahrenergie und andererseits durch die Wandlung der Energie in den Stossdämpfern. Die Rekuperationsenergie wurde in Drucklufttanks mit einem Druck von anfänglich maximal 200, später bis zu 260 bar gespeichert (s. Fig. 3). Durch diese quasi Hybridisierung des Antriebs konnte der Treibstoffverbrauch um insgesamt 14 – 15 % gesenkt werden. In der Folge ist vorgesehen, den Speicherdruck bis auf 400 bar zu erhöhen und so die Systemwirkung weiter zu verbessern.

Das Projekt ***E-Management-Integration*** [12] der HTI Bern / Biel erforschte einen kleinen seriellen Hybrid Antrieb für zwei- bis vierrädige Kleinfahrzeuge. Das Konzept ist modular aufgebaut und ermöglicht den Einbau von industriell gefertigten

Figur 3: *Pneumatischer Zwischenspeicher unter dem Fahrzeugboden.*

Baugruppen. Als Serie Hybrid ist das System auch deshalb interessant, weil aus ihm verschiedene Antriebs - Konfiguration ableitbar sind: Hybride, reine Batterie-Fahrzeuge sowie Brennstoffzellen-Fahrzeuge.

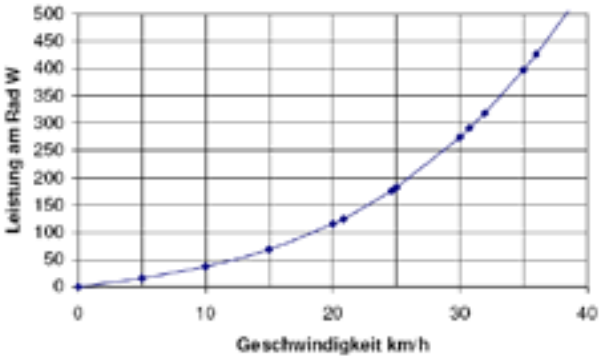
Mit dem Aufkommen von hochstromfähigen Lithium Akkumulatoren verlagerte sich der Fokus bei den Energiespeichern im Verlauf der Projektdauer von Ultra-Cap zu ebendiesen Speichern.

Zusammen mit den Industriepartnern *autork*, Bern, später *Brüggli*, Romanshorn und Buchs, wurden die Antriebs-Komponenten weiterentwickelt und als Prototypen realisiert. Komponenten sind jeweils auch auf Leerlaufverluste hin untersucht worden. Die Komponenten wurden in ihrem jeweiligen Entwicklungsstand in zwei Muskelkraft-Fahrzeugen, einem Laborzweirad, und einem *Digitrike*, montiert und testgefahren.

Mit knapp 300 W Fahrleistung kann man mit dem Laborzweirad 30 km/h schnell fahren. Stammt die Hälfte davon aus Muskelkraft sind vom elektrischen Antrieb die verbleibenden 150 W zu liefern (s. Fig. 4). Mit 150 W Leistung, kommt eine Person auf mittlerer Distanz noch nicht ins Schwitzen. Mit auf e-Bikes/Pedelecs typisch installierten Batteriekapazitäten von 150 bis 200 Wh können so Reichweiten von 30 – 40 km erzielt werden.

LEICHTBAU UND KLEINFAHRZEUGE

Das Hauptziel des Projekts ***Lightweight Vision 0 - 21 (Livio 21)*** [13] von *Horlacher, Möhlin, Rieter Automotive*, Winterthur, der Fachhochschule



Figur 4: *Leistung am Rad vs. Geschwindigkeit*

Nordwestschweiz ist die Entwicklung neuer Technologien (Konstruktionen, Materialien, Prozesse) zur Herstellung von leichtgewichtigen Modulen für die Automobilindustrie. Mit solchen leichten Modulen kann die Schweizer Zuliefererindustrie massgeblich zur Reduktion des Fahrzeuggewichtes und damit zur Verringerung des Treibstoffverbrauchs der Autos beitragen.

Zur Erprobung und Demonstration dieser neuen Technologien wird das Konzeptfahrzeug Livio 21 markenneutral als *fahrende Plattform* aufgebaut. Die Hauptstruktur des Fahrzeugs besteht aus einem metallischen Rahmen (= Spaceframe, erwiesenermassen eines der leichtesten Konzepte für eine Fahrzeugstruktur) und leichten Composite-Modulen mit integrierten Funktionen. Ein solches Fahrzeug wird als leichtgewichtiger Kleinwagen (wenig Querschnitt) mit guter Aerodynamik und einem effizienten Antriebssystem mit einem Minimum an Energie fahren können.

Bei den Modulen konzentrieren sich die Forschungsaktivitäten auf Front-, Boden-, Dach- und Heckmodul. An den im *Livio 21* grundsätzlich zugänglichen Sitz-, Seiten- und Antriebsmodulen wird zur Zeit nicht gearbeitet. Ein erstes Bodenmodul aus leichtgewichtigen Sandwichplatten wurde im Konzeptfahrzeug *Livio 21* eingebaut. Ausserdem wurde in einer Diplomarbeit der Fachhochschule Aargau die Herstellung eines Bodenmoduls mit integrierter Sitzbefestigung im RTM-Verfahren untersucht. Am Frontmodul wurden Ideen aufzeigt, wie mit einem leichten Kleinwagen die heutigen Sicherheitsanforderungen (haben bisher zu immer schwereren Fahrzeugen geführt) erfüllt werden können. In einer Diplomarbeit der Fachhochschule beider Basel wurde ein Vorschlag für eine *weiche* A-Säule erarbeitet. Zudem wurde Mitte Juni 05 ein erster Fussgänger Crashtest mit einem Leichtbau - Frontmodul durchgeführt. Durch die weiche Gestaltung der Fahrzeugfront im Stossstangen und Fronthaubenbereich sowie durch einen Airbag auf der Windschutzscheibe konnte der Dummy *sanft* abgefangen werden. Leider wurde er durch das Fahrzeug so weggeschleudert, dass er dann mit dem Kopf voran auf der Strasse aufprallte (s. Fig. 5).

Figur 5: *Computersimulierter Fussgänger / PW Crash*
Quelle: Automobil

Mit Hilfe einer Projektarbeit der Fachhochschule Aargau wurde die Schnittstelle zwischen der Struktur des *Livio 21* und dem Heckmodul konstruiert und auf dem Konzeptfahrzeug integriert. Auch beim Dachmodul wurde die Schnittstelle definiert und ein Prototyp auf dem Livio 21 installiert. Die beteiligten Projektpartner beabsichtigen im nächsten Jahr die *fahrbare Plattform Livio 21* fertig zustellen. Als Schwerpunkt wollen sie die Technologien zur Herstellung leichtgewichtiger Module an den Beispielen Front-, Boden-, Dach-, und Heckmodul weiter erforschen.

Im Projekt ***Ultra Leicht Scooter*** [12] ULS der HTI Bern / Biel wurde die technische und ökonomische Machbarkeit eines solchen Scooters an Hand erster Design-Konzepte analysiert. Antriebsseitig wurden alle möglichen Antriebssysteme ins Auge gefasst. Wegen den grossen Fortschritten bei den Lithium-Batterien und der Einfachheit des Batterieelektroantriebs wurde dieses System als Antrieb evaluiert. So wird es möglich, einen ultraleichten Roller mit folgenden Eigenschaften zu realisieren (Faust-Formel „60/60/60“):

- Energieinhalt Batterie 2 kWh
- Masse Roller 60 kg
- Maximalgeschwindigkeit 60 km / h
- Reichweite 60 km

Ein solches einspuriges Verkehrsmittel erhöht die Kapazität des Verkehrsträgers, ist lärmarm und lokal emissionsfrei.

Die zentrale Zielsetzung des Projektes ***Wetterschutz*** [14] von *Tribecraft*, Zürich, war die Entwicklung eines Wetterschutzsystems für ein Fahrrad, das die bisherigen Produkte bezüglich der Funktion aber auch in Bezug auf formale Aspekte übertrifft. Das Projekt soll als Basis für die Entwicklung eines Serienproduktes genutzt werden können.

In der Analysephase hat sich recht schnell gezeigt, dass ein Fahrrad-Wetterschutz nicht unbedingt dem Anspruch eines hundertprozentigen Wetterschutzes gerecht werden muss. Vielmehr wurde klar, dass ein Produkt anzustreben ist, mit welchem eine maximale Einsatzhäufigkeit erreicht werden kann. Der Wetterschutz sollte im Vergleich zu heute zwar besser sein, aber nur so gut, dass die Einfachheit bei der Nutzung optimal ist und der Wetterschutz zum selbstverständlich eingesetzten Utensil bei wechselnden Wetterbedingungen werden kann.

Diese aus der Analyse hervorgehende, abstrakte Zieldefinition war Grundlage für das nun entstandene Produkt, einem völlig neuartigen Fahrrad-Wetterschutz. Der Wetterschutz sorgt nicht nur für einen optimalen Schutz gegen Spritzwasser von der Fahrbahn, sondern schützt zudem die Kleider vor der Verschmutzung durch das Fahrrad selbst (Kette). Im Weiteren verbessert der Wetterschutz die Sichtbarkeit des Fahrradfahrenden. Der Wetterschutz besteht aus mehreren Teilen, die je nach Umgebungsbedingungen ergänzend eingesetzt werden können. Dadurch kann bei Regen der Schutz der Beine und Füsse weiter verbessert werden. In Kombination mit einer Regenjacke, die so oder so von den meisten durchschnittlichen Alltagsradlern in der Stadt genutzt wird, ergibt sich ein nahezu optimaler Schutz gegen Nässe und Regen, Verschmutzung und in geringerem Masse auch gegen die Kälte vom Fahrtwind. Ein intensiver Alltagtests ist noch vorgesehen.

Das Projekt ***Citybike Swiss*** [15] von *Rent a Bike*, Therwil, entwickelt ein automatisches Velovermietsystem. Ein solches Velovermietsystem kann in Zukunft den Zugang zur kombinierten Mobilität erleichtern. Bisher wurden 3 Untervarianten entwickelt; mit der Kostengünstigsten Version wird 2006 die Umsetzung angestrebt.

FAHRZEUGE

Ziel des ***PAC-Car-Projektes*** [8] war, das bisher sparsamste Strassenfahrzeug zu realisieren. Zu diesem Zweck hat das Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich eine Forschungsgruppe zusammengestellt, die sich aus Forschern und Studierenden der ETHZ und des Paul Scherrer Instituts sowie aus industriellen Partnern wie RUAG Aerospace, Esoro AG und Tribecraft AG zusammensetzt.

Um das sehr ambitiöse Ziel erreichen zu können, musste ein Fahrzeug entwickelt werden, das sowohl bezüglich der Fahrzeugmasse, der Fahrzeugfläche, des Luft- und Rollwiderstand, der Effizienz des Antriebsstrangs sowie bezüglich der Fahrstrategie optimiert ist. Hierzu wurden Simulationsmethoden, FE-Analysen und Messungen auf Teststrecken wie auch im Windkanal eingesetzt.

Ende April 2005 bestand das Fahrzeug, das zumeist aus Baugruppen besteht, die einzeln gefertigt worden sind, die technische Abnahme. So konnte die verbleibende Zeit bis zum Rekordversuch für weitere Erprobungen und Optimierungen verwendet werden. Am 26. Juni 2005 verbesserte der PAC-Car, anlässlich des Shell-Eco-Marathons in Ladoux Frankreich den Weltrekord von knapp 4000 km Reichweite pro Liter Benzinäquivalent sehr deutlich auf 5385 km. Nachfolgendes Factsheet beschreibt die Erfolgsfaktoren des PAC-Car II:

Figur 6: *Der Aufbau und die Erfolgsfaktoren des PAC-Car II*

Die *Carrosserie Hess AG* in Bellach SO entwickelte im Rahmen des Projekts ***Swisstrolley 3*** [16] einen neuen, energieeffizienten und leichten Trolleybus (s. Fig. 7). Das projektierte Leer-Gewicht von 18'920 kg wurde beinahe erreicht, das Fertigfahrzeug erreicht ein Leergewicht von 19'100 kg. Damit ist dieses Fahrzeug im Vergleich zu ähnlichen Fahrzeugen der Konkurrenz um 1400 kg leichter. Mit kundenfreundlicher Klimaanlage benötigt das Fahrzeug bescheidene 21,4 Wh pro Passagier und km. Die Wirtschaftlichkeit kann mit einem vorläufig noch berechneten LCC-Fahrkilometer-Preis von CHF 0.69 als erfüllt gelten. Der Fahr-, der Einstieg- und der Sitzkomfort sowie das Interieur kommen bei den Fahrgästen und Betreibern sehr gut an. Das BAV hat das Fahrzeug nach allen Gesichtspunkten des Behindertengleichstellungsgesetzes sowie den dazugehörigen Empfehlungen abgenommen. Ein erstes Fahrzeug wird seit dem Berichtsjahr in Luzern im Linienbetrieb eingesetzt, gegenwärtig sind 72 Einheiten des Busses (Systempreis ca. 1000 kFr.) von den Verkehrsbetrieben der Städte Genf, Luzern und Zürich bestellt.

Figur 7: *Swisstrolley 3 für die Verkehrsbetriebe Genf*

REVA ist ein Leichtelektromobil, das seit Juni 2001 in Bangalore, Indien, für den globalen Markt produziert wird. Dieses günstige Fahrzeug ist ein ideales, emissionsfreies, energieeffizientes Stadtfahrzeug, wenn es an schweizerische/europäische Marktanforderungen angepasst wird. Im Rahmen des vorliegenden Projektes entwickelt die Firma PASOL, Titterten, den ***REVA EURO*** [17], der folgende europäischen Anforderungen erfüllt:

- Spitzengeschwindigkeit 85 km/h (im Vergleich zu 65 km/h des aktuellen REVA)
- Reichweite 100 bis 150 km (im Vergleich zu 60 bis 80 km des aktuellen REVA)
- Beschleunigung 0 auf 50 km/h in weniger als 10 Sekunden
- Wartungsfreier Antriebsstrang und Batterie

Seit dem Projektstart Oktober 2005, wurden folgende Arbeiten bereits erledigt:

- Simulation des REVA EURO zur Spezifikation von Batterie, Antriebsstrang und Ladegerät.

(Drehmomentkennlinien, Nominal- und Spitzenleistung, Übersetzungsverhältnis, etc.). Dazu wurden in der Schweiz ein paar Referenzfahrten mit Horlacher sport durchgeführt (Gewicht, Rollwiderstand gleich wie Zielfahrzeug).

- Diskussion von Lösungsansätzen für den Antriebsstrang mit einschlägigen Firmen. Festlegung der Antriebsstrang-Komponenten.
- Systemintegration (mechanisch und elektrisch) von Batterie, Antriebsstrang und Ladegerät.
- Konzeption und Bau des Interfaces zwischen REVA Ladegerät und ZEBRA Batteriemanagement, sowie CAN-Kommunikation zwischen ZEBRA-BMI und Inverter. Tests dieser Subsysteme in aktuellem REVA mit ZEBRA Batterie (48V System).
- Die Machbarkeitsstudie *MUPUM [18]* (Multi Purpose Mobil) der HTI Biel entwickelt ein kommunales Mehrzweckfahrzeug, dessen Umsetzung in der Schweizer Fahrzeugindustrie angedacht ist. Die Trägerzelle ist in der Gestalt, dass an ihr rasch verschiedene Module mit unterschiedlichem Einsatzweck an- und abgebaut werden können: Module für Schulbus, Behindertentransport, Kehrichtsammlung, Strassenreinigung, Löscheinsätze. Für den Antrieb wurden verschiedene Konzepte geprüft; aus ökologischer Sicht ergeben sich Vorteile für hybride Systeme, insbesondere im Teillastbetrieb, hervorgerufen durch die Nebenaggregate im Stillstand.

Im Projekt ***COASTER*** [19] der Firma *Brusa*, Sennwald, entwickelt diese das Antriebssystem für den Coaster, ein schienengebundenes, führerloses Taxi (s. Fig. 8). Eine erste Pilotanlage ist am Bürserberg im Eingang des Brandnertals, Österreich, in der intensiven Erprobung. Das Gesamtsystem soll künftig in sensiblen Gebieten die Strasse, den PW ersetzen. Erste kleinere kommerzielle Anlagen sind für mehrere Touristische Gebiete in Planung und in der Zwischenzeit wurde bereits eine Anlage geordert.

Figur 8: *Das schienengebundene, führerlose Taxi Coaster*

AKKUMULATOREN / ULTRAKAPAZITÄTEN

Ziel des Projektes ***Integrated micro-supercapacitors*** [20] (µSC) des PSI Villigen ist die Entwicklung eines mikrostrukturierten Doppelschichtkondensators (µSC), der als Energie- und Leistungsversorgung für eine Mikrobrennstoffzelle dient. Der Kondensator soll sowohl bei der Startphase der BZ Energie liefern als auch im Betrieb Leistungsspitzen abdecken. Der DSK soll in einem Volumen von max. 3 cm^3 eine Energie von 2 J und eine Leistung von 5 W liefern. Um den Mikrostrukturierungsprozess auf eine Ebene zu begrenzen, wurde eine kammartige Elektrodenstruktur gewählt, bei der die positive und negative Elektrode nebeneinander liegen. Als Elektrodenmaterial wurde hydratisiertes RuO_2 gewählt.

Im Berichtszeitraum wurde hydratisiertes RuO_2 als aktives Elektrodenmaterial durch einen pH kontrollierten Fällungsprozess mit NaOH aus $RuCl_3$ hergestellt. Mittels Einzelelektrodenmessungen wurde eine spezifische Kapazität von > 700 F/g demonstriert. Dieser Wert wird nur bei eine Kalzinierungstemperatur von um 150 ºC erreicht. Bei höheren Temperaturen nehmen die Kapazität ab und die Leitfähigkeit zu. Mit diesem Elektrodenmaterial wurde in H_2SO_4 das mögliche Spannungsfenster (Nennspannung des Kondensators) zu 1.0 V bestimmt. Bei dieser Nennspannung wurde eine ausreichende Zyklenstabilität demonstriert (Kapazitätsverlust < 4% nach 600 Zyklen). Die Selbstentladung ist relativ gross mit 30% Ladungsverlust nach 100 Stunden. Mit eine *Knopfzellenanordnung* wurde eine spezifische Energie von ca. 10 Wh/kg und eine spezifische Leistung von > 10 kW/kg – bezogen auf das Gewicht des RuO_2 – bestimmt.

Das Füllen der kammartigen Mikrostrukturen mit Kanalbreiten von 100 µm und Stegbreiten von 50 µm mit dem aktiven Elektrodenmaterial RuO_2 ist stark von den Oberflächeneigenschaften der Metallisierung und von den Benetzungseigenschaften der RuO_2 Lösung/Paste abhängig. Nach zahlreichen Versuchen wurde ein vielversprechendes Verfahren gefunden, bei dem Nafion als Binder verwendet wird. Es konnten an einer Ni metallisierten Struktur erste Zyklische Voltammogramme erfolgreich gemessen werden.

Um den Abstand der Elektroden möglichst klein zu halten und eine hohe Leistungsdichte zu erzielen wurde, bei einem ersten µSC-Design eine Metallisierung der Seitenwände vorgesehen. Die in der Mikrosystechnik eingesetzten Beschichtungsverfahren (PVD) sind nahe zu gerichtet, wodurch die Seitenwände zur Beschichtung ein konisches Profil aufweisen müssen. Der zum Strukturieren von Silizium verwendete DRIE Prozess ist für senkrechte Seitenwände optimiert. Durch ein Anpassen der Parameter durch die Firma Alcatel konnte ein konisches Profil erzeugt werden. Der

von Alcatel entwickelte Strukturierungsprozess zeigte ein unerwartet starkes unterätzen, welches dazu führte, dass Stege teilweise weggeätzt wurden. Des Weiteren ist das Profil leicht überhängend was die Metallisierung erschwert.

Das als Stromsammler bevorzugt eingesetzte Platin ist mit nasschemischem Ätzen nicht strukturierbar. Aus diesem Grunde muss für die Strukturierung ein Lift-Off Prozess verwendet werden. Der Lift-Off Prozess ist nur mit ausreichendem Yield einsetzbar wenn auch Stege und kein Überhang vorhanden sind.

Um trotz der aufgetretenen Schwierigkeiten ein Device für erste Messungen zu Verfügung zu haben, wurde die Prozess-Folge komplett umgestellt und ein galvanisch abgeschiedenes Nickel verwendet. Für zukünftig hergestellte Devices kann das Nickel durch ein galvanisch abgeschiedenes Pt ersetzt werden. Durch ein Anpassen der Aetzmaske und ein Optimieren der Prozesse sollte es möglich sein Stege in den geforderten Dimensionen zu erhalten.

Unterstützt vom BFE klärt die *MES DEA S.A.* aus Stabio TI die Machbarkeit einer ***Niedertemperatur-Zebra Batterie*** [21] ab. Die herkömmliche Zebrabatterie weist eine Betriebstemperatur von 270 – 350°C auf. Trotz nur minimalen thermischen Verlusten ist diese Temperatur für viele Anwendungen nachteilig resp. verunmöglicht sogar den Einsatz der Batterie. Da das System bezüglich Lebensdauer und Energiedichte über hervorragende Eigenschaften verfügt, versucht *MES DEA*, die Betriebstemperatur durch den Einsatz geeigneter organischer Lösungsmittel wesentlich abzusenken. Erste Versuche im Labor bestätigten die theoretische Machbarkeit – für deren Anwendung bedarf es aber noch wesentlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Nationale Zusammenarbeit

Das Programm Verkehr / Akkumulatoren koordiniert und vernetzt die Energieforschungsaspekte im Themengebiet. Die Zusammenarbeit mit dem ETH-Bereich, den Fachhochschulen, der Industrie und den Verbänden ist gut etabliert und es findet ein reger Erfahrungs- und Informationsaustausch statt. An einer inzwischen etablierten, jährlich stattfindenden Forschungstagung des BFE werden diese Koordination, die Vernetzung und der Informationsaustausch speziell gefördert. Im Berichtsjahr fand diese Tagung mit etwa 120 Teilnehmern am PSI in Villigen statt. Ein Tagungsband auf CD-ROM mit sämtlichen Präsentationen ist bei martin.pulfer@bfe.admin.ch erhältlich.

Internationale Zusammenarbeit

Das Projekt ***Hybrid- and Electric Vehicle Technologies and Programmes*** [22] (HEV) der Internationalen Energieagentur (IEA) befasst sich mit der Entwicklung und Verbreitung von Batterie- oder Brennstoffzellen betriebenen Elektrofahrzeugen und hybriden Fahrzeugen. Geleitet wird dieses Projekt vom Schweizer Chairman Urs Muntwyler. 2005 konnten die zwei Annexe *Elektrochemische Systeme* und *Hybridfahrzeuge* wieder neu lanciert werden. Von der Schweiz stark forciert wird ein weiterer neuer Annex *Elektrozweiräder* der vermutlich 2006 genehmigt und in Angriff genommen wird. Seit einem Jahr ist die Schweiz auch in einem weiteren IEA-Projekt *Advanced Motor Fuel* als Mitglied vertreten.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Herausragendes Resultat im Berichtsjahr war sicher der Weltrekord des Forschungsteam von Prof. Guzzella der ETH Zürich mit dem Experimentalfahrzeug PAC-Car II. National und insbesondere international sensibilisierte dieses Fahrzeug das Publikum für das Thema Energieeffizienz und zeigte gleichzeitig auch die Grenzen des Machbaren auf.

NewRide, das Promotionsprogramm für Elektrozweiräder erzielt zusammen mit seinen Partnern Wachstumsraten von ca. plus 20 % pro Jahr. Es verlässt so langsam das Stadium der Erprobung und erhält wegen der zunehmenden Wirkung nach und nach energiepolitische Bedeutung. Ökologisch und insbesondere ökonomisch stellen die 72 bestellten Busse Swisstrolley 3 der Neuentwicklung von Carrosserie Hess einen grossen Erfolg dar.

Für das Jahr 2006 sind nach dem Durchschreiten der budgetmässigen Durststrecke kaum spektakuläre Erfolge zu erwarten, zumal wichtige Projekte gerade erst vor kurzem gestartet werden konnten resp. gerade gestartet werden. Am ehesten ist für das Stadtfahrzeug REVA EURO, insbesondere in London, ein gewisser kommerzieller Erfolg zu erwarten (Elektro- und Hybridfahrzeuge sind in London nicht dem Road Pricing unterworfen).

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] G. Moreni (gianni.moreni@rapp.ch) U. Haefeli, ARGE Rapp Trans, *Zürich,* Interface, *Luzern:* ***Finanzielle Anreize für effiziente Fahrzeuge***, (JB), http://www.rapp.ch

[2] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, *Fischingen:* ***CleanerDrive*** (SB), http://www.e-mobile.ch.

[3] P. de Haan, (dehaan@env.ethz.ch), ETH-*Zürich*: ***Autoklassen – Wechselverhalten*** (SB), http://.www.ethz.ch

[4] M. Seifert, (m.seifert@svgw.ch), Verein des Schweizerischen Gas und Wasserfaches, *Zürich:* ***a) Erdgas SAM*** (JB), ◆ ***b) Busvergleichsstudie*** (SB) http://www.svgw.ch/

[5] S. Ulli (silvia.ulli@psi.ch) St. Lienin, (stephan.lienin@sustainserv.com), sustainsurv, *Zürich:* ***Erlebnisraum Mobilität der Pilotregion Basel*** (JB), http://www.novatlantis.ch

[6] H. Hofmann, (hofmann@ikaoe.unibe.ch) IKAÖ Universität *Bern:* ***NewRide*** *(JB),* http://www.newride.ch

[7] R. Kiener, (r.kiener@gmx.ch) SOKAW, Gemeinde *Wohlen:* ***e-rent*** (SB), http://www.mobilem.ch, http://www.buchmich.ch

[8] L. Guzzella, C. Onder, (guzzella@imrt.mavt.ethz.ch), ETH-*Zürich:* ***a) PALOS II Optimale Antriebssysteme für Leichtfahrzeuge*** (JB) ◆ ***b) Kraftstoffsparende Antriebssysteme*** (JB) ◆ ***c) Pac-Car*** (JB), http://www.ethz.ch

[9] Ch. Bach, (christian.bach@empa.ch), P. Soltic, (patrick.soltic@empa.ch), EMPA *Dübendorf:* ***Clever*** (JB), http://www.empa.ch/abt137

[10] M. Hoeckel, (michael.hoeckel@hti-bern.bfh.ch), FH *Bern/Biel:* ***Brennstoffzellen-SAM*** (SB), http://www.hta-bi.bfh.ch/E/Laboratories/FuelCell

[11] F. Sbarro, (sbarro@freesurf.ch), A.C.A. Ateliers d'Etudes, *Grandson:* ***Pneumatische Rekuperation*** (JB).

[12] A. Fuchs, (andreas.fuchs@hti.bfh.ch), FH *Bern:* ***a) Energiemanagementsystem*** (JB) ◆ **b)** ***Ultraleichtscooter*** (JB), http://www.hta-be.bfh.ch/

[13] M. Horlacher, (thomas.efler@bluewin.ch), Horlacher *Möhlin*: ***Livio21*** (JB), http://www.horlacher.com

[14] M. Schütz / D. Irany, (martin.schuetz@tribecraft.ch), Tribecraft, *Zürich:* ***Wetterschutz Fahrrad*** (SB), http://www.tribecraft.ch

[15] S. Maissen (s.maissen@bro.ch), Rent a Bike, *Therwil*: ***Citybike SWISS*** (JB); http://www.rentabike.ch

[16] A. Naef / H.-J. Gisler, (info@hess-ag.ch), Carrosserie Hess, *Bellach:* ***Swisstrolley3*** (SB), http://www.hess-ag.ch

[17] P. Schweizer, (pschweizer@pasol.ch), Pasol, *Titterten:* ***REVA EURO*** (JB), http://www.pasol.ch/

[18] J.-F. Urwyler (jean-francois.urwyler@hti.bfh.ch), FH *Biel*: ***MUPUM*** (SB), http://www.hti.bfh.ch

[19] A. Mathoy / P. Matt, (arno.mathoy@brusa.biz), Brusa AG, *Sennwald*: ***Coaster***, (SB), http://www.brusa.biz/company/g_c

[20] R. Kötz (ruediger.koetz@psi.ch), Paul Scherrer Institut, *Villigen*: ***Integrated micro-supercapacitors*** (JB), http://www.psi.ch

[21] C. Dustmann, (cdustmann@mes-dea.ch) MES-DEA, *Stabio:* ***Niedertemperatur-Zebra Batterie*** (JB) http://www.cebi.com

[22] S. Kleindienst Muntwyler (muntwyler@solarcenter.ch) Solarcenter Muntwyler, *Zollikofen*: ***IEA Implementing Agreement HEV*** (JB).

Referenzen

[23] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) BFE, *Bern:* ***Programme Verkehr und Akkumulatoren/ Supercaps 2004 – 2007***, http://www.bfe.admin.ch/themen/00507/00509/

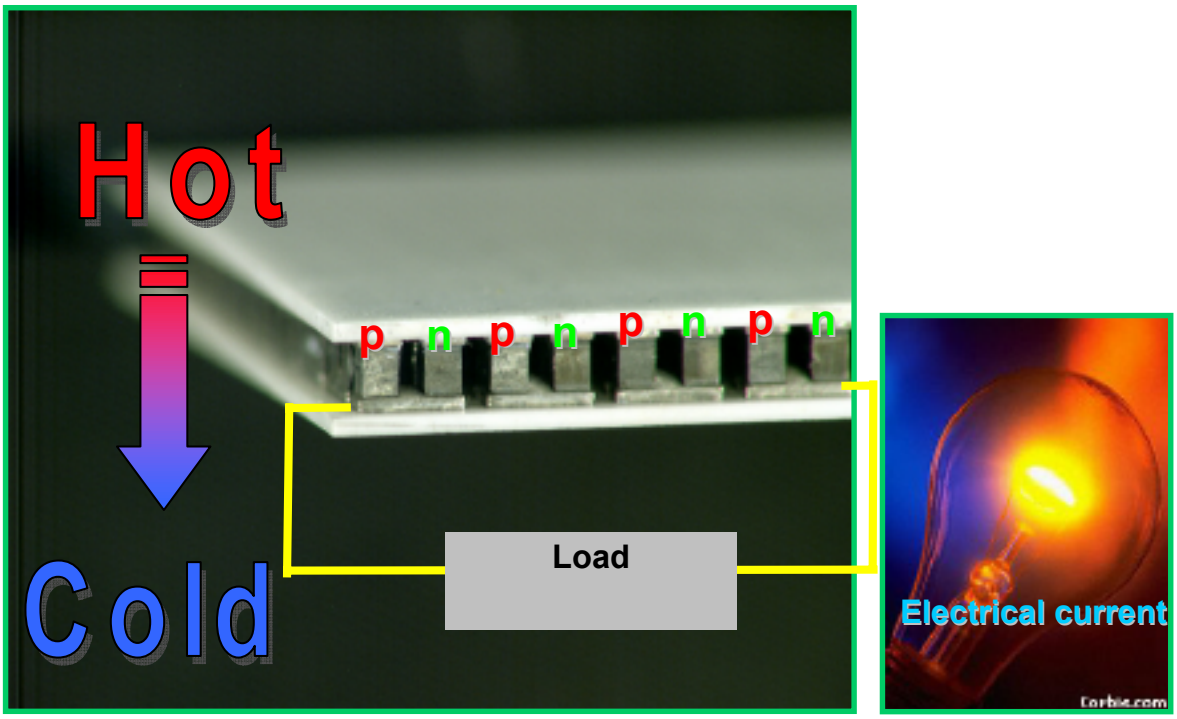
[24] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007,*** download unter: www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN
Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2005

PROGRAMM ELEKTRIZITÄT

Roland Brüniger

roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch



Thermoelektrische Stromerzeugung (Quelle: EMPA)

Dank dem Seebeck-Effekt kann ohne bewegte Teile aus Wärme direkt Strom erzeugt werden. In den Projekten *Thermoelektrische Kraftwerke* und *Geo-Thermopower-Materials* werden für Temperaturen kleiner als 400 Kelvin energieeffiziente Materialen und zweckmässige Applikationen analysiert.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

In den vergangenen Jahren war eine stetige Zunahme des Stromverbrauchs zu verzeichnen; allein zwischen 2000 und 2004 betrug dieser 7,3%. Dieses Wachstum erfolgte trotz der Zielsetzung von *EnergieSchweiz* [33], den Stromverbrauchszuwachs von 2000 bis 2010 auf max. 5% zu begrenzen. Es sind deshalb verstärkte Anstrengungen erforderlich. Hier setzt das Programm *Elektrizität* an, indem Grundlagen inkl. Umsetzungsinitiierung für einen sorgfältigen und effizienten Umgang mit der Elektrizität geschaffen werden. Das Programm gliedert sich in die beiden Hauptbereiche ***Technologien*** und ***Effiziente Anwendungen***.

Im Bereich ***Technologie*** bestand die Zielsetzung im Jahr 2005 darin, die ermutigenden Entwicklungen in den thermoelektrischen Materialwissenschaften mit der Initiierung konkreter Forschungsprojekte auf deren Machbarkeit zur direkten *Energiekonversion* Wärme-Elektrizität zu prüfen. Im Bereich der *Hochtemperatursupraleitung* gibt es zwar immer wieder Fortschritte im Materialbereich; die Schweizer Industrie hält sich aber primär aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen noch mit diesbezüglichen Aktivitäten zurück. Umso wichtiger ist es, dass eine minimale Kontinuität im Projekt- und Informationsbereich sichergestellt wird. Dies umfasst einerseits die Sicherstellung einer Fortführung des entsprechenden IEA-Implementing-Agreement und anderseits eine verstärkte Interaktion mit der Industrie. Ferner galt es, die technologische Machbarkeit bezüglich der *Druckluftspeichertechnologie* fortzusetzen. Schliesslich lag ein Schwerpunkt im Vorbereiten eines grossen, gesamtschweizerischen Projekts, in dem in einem ausgewählten *Netz* das Zusammenspiel zwischen dezentralen Erzeugungsanlagen und dem Niederspannungsnetz 1:1 untersucht wird.

Der Bereich ***Effiziente Anwendungen*** ist in mehrere Teilbereiche gegliedert. Das Themengebiet der *Informations- und Kommunikationstechnik* zeichnet sich dadurch aus, dass es sich weitgehend um einen globalen Massenmarkt handelt. Die Umsetzung gewonnener Erkenntnisse bedingt damit eine internationale Zusammenarbeit, um die gewünschte Breitenwirkung zu erzielen. Ein Schwerpunkt bestand deshalb darin, einerseits die in spezifischen Projekten gewonnenen Erkenntnisse konzentriert über die Landesgrenzen hinweg bekannt zu machen und anderseits internationale Aktivitäten auf die Schweiz zu übertragen. Insbesondere die internationalen Aktivitäten zur Effizienzverbesserung in den Bereichen Settop-Boxen, Breitbandgeräte und Netzgeräte waren national einzubringen. Ferner sollten Massnahmen initiiert werden, damit mit der zunehmenden Vernetzung im Haushalt der Stromverbrauch nicht übermässig ansteigt. Im *Gerätebereich* bestand die Zielsetzung für 2005 darin, bei ausgewählten Geräten die Grundlage für eine Effizienzsteigerung zu erarbeiten. Die Effizienz von Wasserdispensern und von USV-Anlagen stand dabei im Vordergrund.

Ein generelles Ziel bestand 2005 ebenfalls darin, über die Presse die Aktivitäten und Ergebnisse des Programms einem breiten Publikum bekannt zu machen und generell *umsetzungsorientierten Aktivitäten* verstärktes Gewicht beizumessen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG (HTSL)

Mit der Teilnahme am ***Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector*** [1] der Internationalen Energie Agentur (IEA) wird eine umfassende Information über die internationalen Aktivitäten auf dem Gebiet der HTSL gewährleistet. Ein erstes Informationstreffen war dem Thema der rotierenden Maschinen gewidmet. Von besonderer Wichtigkeit war der Bericht über das Thema *Cryogenic Dielectrics*, welches bisher ziemlich stiefmütterlich behandelt wurde, sich aber bei den ersten Erfahrungen mit supraleitenden Systemen als sehr wichtig erwiesen hat. An einem zweiten Informationstreffen waren das Hauptthema die VAR's (dynamische Wechselstrom-Kompensatoren, siehe Figur 1). Die Entwicklung dieser Maschinen stösst auf grosses Interesse.. Ebenfalls zeigte sich, dass die Supraleiter der zweiten Generation *(Coated Conductors)* grosse Fortschritte gemacht haben. Bereits wurden 260 Meter Band an einem Stück hergestellt. Erfreulich ist, dass das *IEA-Implementing Agreement* für eine weitere Periode von 5 Jahren weitergeführt wird. Die umfangreichen Informationen dieser IEA-Treffen wurden an alle in der Schweiz in der Supraleitung tätigen Forschungsinstitute und Industrien im Rahmen des alljährlich stattfindenden HTSL-Seminars vermittelt. Dieses Seminar stösst auf grosses Interesse, was durch wiederkehrende, hohe Teilnehmerzahlen untermauert wird.

Figur 1: *Komponenten eines 8 MVA-HTSL-Wechselstrom-Kompensators (AMSC)*

Mit dem Industrieprojekt ***Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Maschinen, insbesondere Generatoren*** [2] wurde untersucht, wo die Vor- und Nachteile einer grossen elektrischen Maschine mit HTSL-Wicklung liegen. Im Zentrum standen Turbogeneratoren im Bereich 50 bis 1´000 MW. Bei Grossgeneratoren scheint der sogenannte HTSL-Austauschrotor ein geeigneter Ansatz mit vertretbarem Risiko zu sein. Die Ergebnisse zeigen aber keine eindeutigen Marktanreize für einen HTSL-Rotor. Den erhöhten Betriebsrisiken steht eine Betriebskosteneinsparung durch kleinere Verluste gegenüber. Das Leitermaterial ist noch zu teuer, doch wird für das Jahr 2010 mit einer substantiellen Verbilligung gerechnet. Um dazu eine vertiefte, quantitative Aussage machen zu können, werden im Folgeprojekt ***Elektrische Maschinen, insbesondere Generatoren: Supraleiter-Technologie im Wettbewerb mit verbesserter, konventioneller Technologie*** [2] mögliche effizienzsteigernde Massnahmen für einen konventionellen Generator aufgelistet und unter Miteinbezug der Risiken mit dem HTSL-Generator untersucht. Die Ergebnisse werden 2006 vorliegen.

ENERGIE-KONVERSION

Bei der Nutzung der Geothermie sowie in anderen Bereichen fällt oft Wärmeenergie in einem Temperaturbereich von tiefer als 400K an, deren Nutzung ökologisch sinnvoll wäre. Eine effiziente thermoelektrische Umwandlung in Elektrizität stellt bei diesen Temperaturen eine interessante Lösung dar und könnte eine ökonomische Nutzung der Wärme ermöglichen. Sie erfordert aber die Entwicklung neuer Funktionsmaterialien, die einen grossen Seebeck-Koeffizienten, gute elektrische Leitfähigkeit sowie geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Im Projekt ***Geo-Thermopower (Geo-TEP) Material*** [3] wird diese Thematik auf der Material-Ebene untersucht. Übergangsmetalloxide mit perowskitartigen Strukturen können sowohl p- als auch n-leitende Halbleiter sein, die zum Teil eine grosse Thermokraft aufweisen. Ihre experimentell verifizierte, sehr gute thermische Stabilität in Luft zeigt, dass diese Substanzen für thermoelektrische Anwendungen hervorragend geeignet sind. Im Berichtsjahr wurden innovative Synthesemethoden für die Darstellung von feinkristallinen Pulvern entwickelt. Die Charakterisierung der Proben erfolgt mittels Pulver-Röntgendiffraktion, Elektronenmikroskopie und volumetrische Adsorptionsanalytik. Elektrischer Widerstand und Thermokraft der Proben sowie die thermischen Eigenschaften, wie z.B. Wärmekapazität, wurden ermittelt.

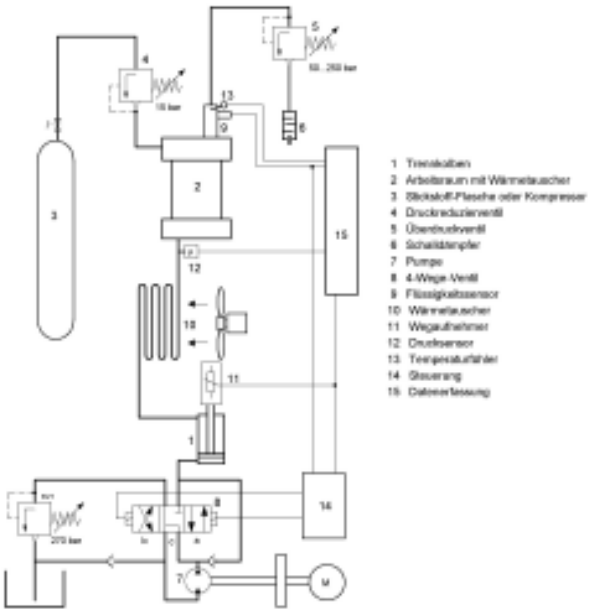
Parallel und eng mit der vorerwähnten Materialforschung verzahnt werden im Projekt ***Thermoelektrisches Kraftwerk*** [4a] aus Sicht der Anwendung verschiedene Szenarien untersucht, wie ein thermoelektrisches Kraftwerk zu realisieren wäre und welche minimalen Anforderungen an die Materialien und die thermischen Quellen gestellt werden müssten. Als mögliche Szenarien wurden die Erzeugung elektrischer Energie für Einfamilienhäuser, für grössere Wohneinheiten und für das thermoelektrische Kraftwerk definiert. In Abschätzungen, die auf einem einfachen Modell des thermoelektrischen Generators basieren, wurde für grössere Wohneinheiten das Potenzial einer tiefen Erdwärmesonde zur Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie untersucht.

SPEICHERUNG

Mehrere Studien haben aufgezeigt, dass die Druckluft-Speichertechnik vom Prinzip her geeignet ist, einen wesentlichen Beitrag für eine nachhaltige Energiewirtschaft zu leisten. Mit dem Projekt ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzeptes BOP-B*** [5] wird ein erfolgversprechendes Konzept (siehe Figur 2) mit geringen adiabatischen Verlusten überprüft. Vorversuche haben Optimierungen bei der Drucklufterzeugung ermöglicht, womit jetzt ein fortgeschrittenes Konzept bereitliegt, nach welchem der erste Prototyp gebaut wird. Der Motor/Generator wurde an einem Modell im Massstab 1:2 untersucht; anschliessend konnte ein effizienter Prototyp erstellt werden. Für die Wirkungsgradmessungen wurde eine spezifische Stromversorgung und eine neuartige Drehmoment-Messeinrichtung entwickelt und aufgebaut. Die Elektronik wurde bezüglich Wirkungsgrad analysiert und die Drehmoment-Messeinrichtung weiterentwickelt. Der Druckluftspeicher wird 2006 als Gesamtsystem zusammengesetzt, geprüft und ausgemessen.

ÜBERTRAGUNGS- UND VERTEILNETZ

Das Projekt ***Vision of Future Energy Networks*** [4b] hat die Erstellung von Szenarien für zukünftige Energiesysteme nach dem *Greenfield Approach* als Hauptziel. Die erarbeiteten Modelle zur Systemoptimierung wurden 2005 weiterentwickelt. Ferner wurden vertiefte Arbeiten in den Bereichen Speichertechnologie, kombinierte Ener-



Figur 2: *Schema Wärmetauscher des BOP-B-Speicherkonzepts (Brückmann Elektronik)*

gieübertragung von Strom und Gas und im Bereich der Zuverlässigkeitsanalysen durchgeführt. Im Jahr 2006 wird als zentraler Meilenstein die Anwendung der vorgeschlagenen theoretischen Konzepte auf die Fallstudie einer realen Kleinstadt (voraussichtlich Baden) erfolgen, welche die Praxistauglichkeit der entwickelten Instrumente aufzeigen soll.

Mit dem Projekt ***Steuerbare Speicher zur Optimierung des Energieflusses des Niederspannungsnetzes in DEA*** [6a] wurde untersucht, inwiefern ein Speicher für das Energiemanagement, für die Verbesserung der Netzqualität und für die Erhöhung der Versorgungssicherheit eingesetzt werden kann. Ferner wurde die Regulierung der Netzspannung mittels Simulationen untersucht. Ebenfalls wurden Alternativen zum gesteuerten Speicher, wie Notstrom- oder USV-Anlagen, Leitungsausbauten oder Energieübertragung über das Mittelspannungsnetz analysiert. Je nach Netzsituation konnten verschiedene Fälle untersucht und die jeweils optimalen Lösungen unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit definiert werden. Der gesteuerte Speicher ist vor allem im liberalisierten Strommarkt interessant, wenn ein Grossverbraucher bestrebt ist, sein prognostiziertes Lastverhalten möglichst genau einzuhalten, um die Beschaffung von Ausgleichsenergie zu vermeiden.

Im Rahmen des Projekts ***Effizienzsteigerung im Verteilnetz durch neue Netzkonfigurationen*** [6b] wurden die Dichte von Verteilstationen und die Erhöhung der Betriebspannung des Niederspannungsverteilnetzes auf deren Wirkung bezüglich Effizienz untersucht. Neben theoretischen Überlegungen wurden an realen Netzen Simulationen durchgeführt. Eine Erhöhung der Spannung hat zwar verringerte Leitungsverluste, hingegen wesentlich höhere Trafoverluste zur Folge. Eine Erhöhung der Stationsdichte bringt auf dem 400V-Spannungsniveau bezüglich Verluste, Jahreskosten und Spannungshaltung die besten Resultate.

Die Ergebnisse der zwei vorerwähnten Projekte fliessen in das Projekt ***Verteilte Einspeisungen im Niederspannungsnetz*** [7] ein. An einem realen Netz sollen die Auswirkungen vermehrter, verteilter Einspeisungen identifiziert werden. Damit soll technisches Wissen geschaffen werden, um das Verteilnetz auch bei zunehmenden, dezentral einspeisenden Energiequellen zu beherrschen. Sechs Elektrizitätswerke unterstützen das Projekt fachlich und finanziell. Erste Aktivitäten konnten definiert und gestartet werden.

Im Projekt ***Conception et intégration d'un logiciel FEM dans le simulateur numérique SIMSEN*** [8] wird eine neue Feldberechnungssoftware auf der Basis der Finiten Elemente für Synchronmaschinen in die bestehende Applikation *SIMSEN* (numerische Software für die Analyse von Systemen und variablen Antrieben) eingebunden. Damit kann das Verhalten von Synchronmaschinen am Netz besser nachgebildet werden. Nachdem die grundlegenden Arbeiten im 2005 ausgeführt wurden, sind für 2006 die Abbildung von sich sättigendem Material und die Simulation des Transformators vorgesehen.

Der vorliegende Fachbereich *Übertragungs- und Verteilnetz* wird per Januar 2006 aus dem Programm *Elektrizität* ausgegliedert und in ein eigenständiges Programm mit dem Namen *Elektrische Energiesysteme und Netze, NESS* übergeführt.

INFORMATIONS- UND KOMMUNIKATIONSTECHNIK

Der Anteil der Informationstechnik am Stromverbrauch in der Schweiz liegt heute bei etwa 10%. Weltweit werden viele Studien für einen rationelleren Elektrizitätseinsatz, insbesondere bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten durchgeführt und Massnahmen ergriffen, um diese Einsparpotentiale auch umzusetzen. Der Wissensstand und die Produkte verändern sich schnell, der Markt ist global und die Akteure vielfältig. Es ist aufwändig, die Übersicht zu bewahren und hier leistet das ***Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik*** [9] einen wertvollen Beitrag. Relevante Informationen im In- und Ausland werden gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Daneben werden umsetzungsorientierte Forschungsthemen analysiert und Forschungsprojekte evaluiert, konzipiert und teilweise selbst durchgeführt. Die neusten Erkenntnisse zu Effizienzpotenzialen bei Informations- und Kommunikationstechnologien wurden in einer zusammen mit *Novatlantis* [38]

organisierten öffentlichen Vorlesungsveranstaltung an der ETH vorgestellt.

Im Projekt ***Smarthome und Energieeffizienz*** [10a] wurde in einem neuen intelligenten Haus in Chur die Entwicklung des Strombezuges für die Vernetzung im Haushalt analysiert. Mit 8'750 Kilowattstunden pro Jahr ist der Bezug beinahe doppelt so gross wie in einem vergleichbaren, konventionellen Haushalt von 1992. Verschiedene Gerätekategorien, speziell die Beleuchtung und der Bereich Unterhaltung und Kommunikation, tragen zu dieser Zunahme bei. Bei den Anwendungen Weisse Ware und Energie & Klima ist der Strombezug tiefer als 1992. Der zusätzliche Strombezug der Geräte, die der Vernetzung dienen, ist deutlich geringer, als im früher untersuchten FutureLife-Haus in Hünenberg. Trotzdem verbleibt ein hohes Einsparpotential. Durch eine energieeffiziente Beleuchtung und insbesondere durch ein funktionierendes Energiemanagement bei vernetzten Geräten könnte der Strombezug des Gebäudes um 1'700 kWh oder 20% reduziert werden.

Um die Effizienz bei vernetzten Haushalten zu erhöhen, werden im Projekt ***Home Automation System*** [11] Sensoren, Aktoren und Steuergerät für eine energieeffiziente, adaptive Steuerung im Haushaltsbereich entwickelt. Die Arbeiten an den Sensoren und Aktoren wurden 2005 abgeschlossen. Anschliessend wurden diese in zwei Haushalten installiert um zu prüfen, ob die Komponenten und die adaptive Steuerung die Erwartungen erfüllen. Ergebnisse werden 2006 erwartet.

Immer häufiger trifft man fest installierte Beamer in Sitzungs- und Wohnzimmern an, die dauernd mit der Netzspannung verbunden sind. Die Leistungsaufnahme in diesem Zustand ist mit 6 bis 17 Watt nicht unerheblich. Mit dem Projekt ***Energieeffizienzpotenzial von fest installierten Beamern*** [10b] werden Bestand und Zuwachs dieser Gerätekategorie untersucht und verschiedene Szenarien für die Verbrauchsentwicklung in den nächsten Jahren erarbeitet. Die Studie wird in enger Zusammenarbeit mit dem Branchenverband *SWICO* und der *Energie Agentur Elektrogeräte (eae)* durchgeführt.

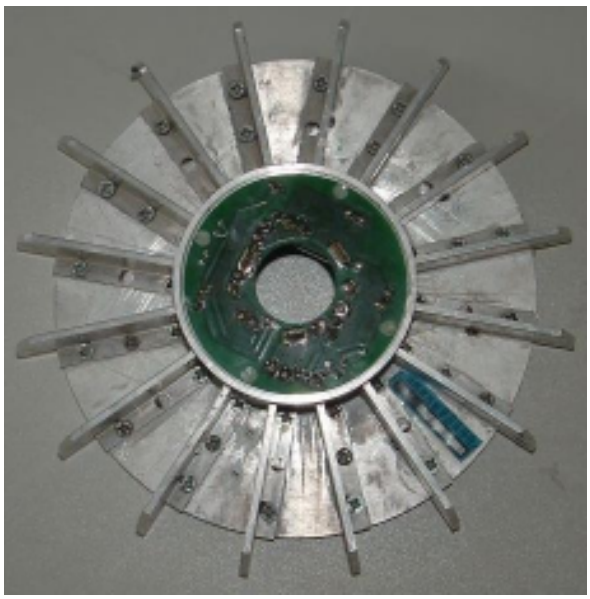
Kleingeräte bis etwa 15 W Leistung, z. B. Telefone für das Internet, Web-Kameras, Hubs, Festplatten, Musikendgeräte usw., können bei einer entsprechenden technischen Ausrüstung die elektrische Energie auch über das Ethernet-Datenkabel beziehen. Diese Technik wird als Power over Ethernet (PoE) bezeichnet. Im Projekt ***Energieeffiziente Stromversorgung mittels Power over Ethernet*** [10c] wurden energetische Analysen durchgeführt und zusammengefasst. Gemäss Simulationsberechnungen ist PoE bei Leistungen bis etwa 8 bis 9 W gegenüber dezentralen, hocheffizienten Schaltnetzteilen die effizientere Lösung. Falls dezentral keine effizienten Schaltnetzteile eingesetzt werden, ist PoE in jedem Fall die effizientere Alternative.

MOTOREN / ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Im Projekt ***Elektrizitätsverbrauch und Einsparpotenzial von Aufzügen*** [12] wurde einerseits der Elektrizitätsverbrauch der ca. 150'000 Aufzugsanlagen in der Schweiz auf rund 300 GWh/a abgeschätzt, was etwa 0.5% des schweizerischen Elektrizitätsverbrauchs entspricht. Dazu erfolgten Messungen an 33 Aufzügen verschiedener Hersteller in der ganzen Schweiz. Neben Messungen im Betrieb wurde die Leistungsaufnahme im Standby sowie jene der Beleuchtung gemessen. Bezüglich Energieeffizienz wurde erkannt, dass die Unterschiede beim Standby-Verbrauch sehr gross sind. Bei Aufzügen mit relativ kleinen Fahrtenzahlen (Wohnbauten) macht der Standby-Anteil bis über 75% aus. Somit liegt in der Verminderung des Standby-Verbrauchs das grösste Sparpotenzial, welches technisch relativ gut umsetzbar sein dürfte. Es wird vorgeschlagen, einerseits die technische Reduktion des Standby-Verbrauchs durch die Hersteller anzustossen und anderseits die Vermeidung ineffizienter Konzepte und Vorgaben mittels eines Leitfadens für Architekten, Planer und Besteller sicherzustellen.

Im Projekt ***Integraldrive II*** [13] bestand das Ziel darin, einen integrierten Motor-Umformer auf Asynchronmotor-Basis mit bedarfsoptimierter Energieaufnahme zu entwickeln, der kosten- und volumenmässig alle bekannten Lösungen für drehzahlverstellbare Antriebe unterbietet (siehe Figur 3 und 4). Das vorgegebene Ziel konnte erreicht werden und als Anwendung bietet sich diese Technologie für Kleinantriebe in grosser Stückzahl mit modifiziertem Läufer im Bereich 100 bis 1000 W oder für zurzeit noch ungeregelt betriebene Lüfterantriebe im Bereich 3 bis 20 kW an.

Figur 3: *Rotorelektronik, Elektronikgehäuse des Integraldrives II (IDS AG)*



Figur 4: *Kühlstern mit eingebauter und vergossener Elektronikeinheit des Integraldrives II (IDS AG)*

Mit dem internationalen Projekt ***Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber*** [14a] soll die Nutzung des Energiesparpotentials bei elektrischen Antrieben mit einer komfortablen Applikation verbessert werden. Im vergangenen Jahr wurden die vorhandenen Dokumente und Tools in einer Web-Site und in einer Broschüre zusammengefasst und einer breiteren Öffentlichkeit (mehrsprachig) bekannt gemacht.

Lebenszykluskosten bei elektrischen Antrieben belegen, dass der grösste Anteil davon bei den Stromkosten liegt. Effiziente Motoren sind deshalb meist auch wirtschaftlich. Mit dem Projekt ***Beschaffung von Motoren unter Vollkostenbetrachtungen*** [15a] wird dieser Sachverhalt gemeinsam mit der Industrie aufbereitet, und eine Musterausschreibung inkl. Kosten-Software soll die Einkäufer dazu bringen, effiziente Motoren zu beschaffen.

Im Projekt ***Energiesparmöglichkeiten mit intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern*** [16] werden die Energiesparmöglichkeiten und die Wirtschaftlichkeit von lastabhängigen Stern-Dreieck-Schaltern untersucht. 2005 erfolgten erste Messungen, die 2006 ausgewertet werden. Mit den neu gestarteten ***Massnahmen zur Ausschöpfung des Energiesparpotenzials bei Schrittmotorenansteuerungen*** [17a] wird in Fortführung eines früheren Projekts der Schrittmotorenmarkt bezüglich der Energiespartechnologie sensibilisiert und das bestehende Funktionsmuster Richtung Prototyp weiterentwickelt.

Neue Antriebskonzepte wie Linearmotor oder *High-Torque* Motoren lassen es zu, hydraulische und pneumatische Antriebe wesentlich energieeffizienter zu realisieren. Im Projekt ***Ersatz von pneumatischen und hydraulischen Antrieben: Potenzialstudie*** [17b] wird anhand von bestehenden Anlagen in mehreren Industriebetrieben eine Potenzialabschätzung durchgeführt, die aufzeigt, wie viel Strom im Falle einer direkten Umwandlung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie eingespart werden kann. Erste Grundlagenarbeiten bezüglich des Vorgehens für die Potenzialerfassung sind durchgeführt worden. Die ***Energieeinsparungen bei Ersatz von Getriebemotoren durch FU-Antriebe*** [14b] sollen unter Berücksichtigung sowohl technischer wie auch wirtschaftlicher Randbedingungen untersucht und quantifiziert werden. Eine Liste der wichtigen Unterscheidungsmerkmale ist erarbeitet worden und als nächstes werden Marktdaten beschafft und eine Fallstudie zur Verifizierung durchgeführt.

Nachdem im Projekt ***Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1 kW*** [18a] erste Funktionsmuster (siehe Figur 5) und die Messdaten zur Verfügung standen, konnten drei namhafte Industriepartner für das Projekt gewonnen werden. 2005 wurde ferner ein effizienter Mikroprozessor entwickelt. Damit entfällt der getaktete DC / DC-Wandler und die Antriebselektronik wird kompakter. 2006 erfolgen Tests mit der neuen Steuerung inkl. Wirkungsgradmessungen.

Figur 5: *Funktionsmuster Integral-Sparmotoren (Circle Motor AG)*

Mit dem neu gestarteten Projekt ***Wirtschaftlichkeit, Anwendung und Grenzen von effizienten Permanentmagnetmotoren*** [18b] wird gemeinsam mit 2 Fachhochschulen eine Gegenüberstellung des Permanentmagnetmotors zur Asynchronmaschine vorgenommen, um die energetischen Vorteile und die Grenzen von effizienten Permanentmagnetmotoren zu bestimmen. Dabei werden sowohl technische als auch materialorientierte und wirtschaftliche Aspekte miteinbezogen.

LICHT / LEUCHTEN

Im Projekt ***Environmental friendly high efficient light source*** [19] wird eine neuartige Lichtquelle

auf der Basis eines Glaskolbens mit verdampftem Sulphat, das von Mikrowellen angeregt wird, untersucht und entwickelt. Ziel ist eine Effizienz von > 100 Lm/W. Erste Funktionsmuster sind entwickelt worden und Tests laufen.

GERÄTE

Im Projekt ***Energieeffizienz von USV-Anlagen*** [15b] wurden verschiedene, energiebezogene technische Grundlagen bezüglich Effizienz von USV-Anlagen (Planergrundlagen, Merkblatt, Messgrundlagen, etc.) erarbeitet. Damit dies auch international anerkannt und umgesetzt wird, wurden die relevanten Dokumente ins Englische übersetzt.

DIVERSES

In der Schweiz existieren nach der Einführung des neuen Zivilschutzkonzepts noch rund 3´000 unterirdische Schutzanlagen. Diese müssen wegen der möglichen Schimmelbildung und der Gefahr von radioaktivem Radon oder Methan mit frischer Luft gespült und im Normalfall mechanisch entfeuchtet werden, damit minimale Anforderungen an das Raumklima erfüllt werden. Im Projekt ***Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen*** [20] wurde durch optimale Ausnützung der Differenzen des Feuchtigkeitsgehalts zwischen Anlageninnerem und der Umgebung der Stromverbrauch der mechanischen Entfeuchtung substantiell reduziert. Das Projekt zeigt, dass damit der Energieverbrauch pro Anlage um rund 3´000 kWh pro Jahr reduziert werden kann, was hochgerechnet auf alle Anlagen in der Schweiz eine Einsparung von ca. 9 GWh ergibt. Die Betreiber sind involviert worden, womit eine Umsetzung eingeleitet wurde.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen der etablierten **Trendwatching-Gruppen** treffen sich regelmässig Vertreter der einschlägigen Industrie, Hochschulen und Forschungsstätten. Damit steht eine nationale Informations- und Diskussionsplattform für Fachleute zur Verfügung, die sich bewährt hat und anerkannt ist. Die vor zwei Jahren etablierte Gruppe im USV-Bereich, die sich mit der Ausarbeitung von Grundlagen für eine europäische USV-Vereinbarung *(Code of Conduct)* beschäftigt hat, hat ihre Arbeiten abgeschlossen und die Weiterbehandlung erfolgt nun auf europäischer Ebene.

Das Projekt *Materials with Novel Electronic Properties (MANEP)* des **Schweizerischen Nationalfonds** umfasst insgesamt 17 Institute und Industrien und 8 Gruppen beschäftigen sich theoretisch oder experimentell mit HTSL-Supraleitern.

Die gute Zusammenarbeit mit der **Industrie** konnte in verschiedenen Bereichen (z.B. Aufzugsindustrie, Settop-Boxen, ADSL-Modem, Detailhandel) weitergeführt werden. Die Konferenz *Effiziente Elektroantriebe* wurde gemeinsam mit *Swissmem* und der *Energieagentur der Wirtschaft (EnaW)* getragen. Ebenfalls wurde eine *Working Group Wasserdispenser* etabliert, in der gemeinsam mit den vier namhaften Branchenleadern die Grundlagen und der Inhalt für eine freiwillige Branchen-Vereinbarung erarbeitet werden. In der nationalen Druckluft-Kampagne, die in die Aktivitäten von *EnergieSchweiz* eingebettet ist, wurden acht einschlägige Industrien miteingebunden. In mehreren Projekten konnten immer wieder *Energieversorgungsunternehmen* für eine Mitarbeit und Mitfinanzierung gewonnen werden. Schliesslich wird ein enger Kontakt mit dem Programm *EnergieSchweiz* gepflegt. So haben die Anregungen der Programmleitung bezüglich Gestaltung der zweiten Hälfte von *EnergieSchweiz* dazu geführt, dass *Motoren/Antriebe* thematisiert und entsprechende Aktionen geplant werden.

Beide Eidg. Technischen **Hochschulen** (Zürich, Lausanne) werden soweit zweckmässig in die Forschungsaktivitäten miteinbezogen und der Einbindung von **Fachhochschulen** wird ebenfalls grosse Bedeutung beigemessen. So haben die Fachhochschule Bern/Biel im Verteilnetzbereich, die Fachhochschulen Westschweiz (Sion), Ostschweiz (Chur) und Zentralschweiz (Horw/Luzern) im Motoren-/ Leistungselektronikbereich, die Fachhochschule Westschweiz (Yverdon) im Lichtbereich sowie die Fachhochschule Nordwestschweiz im Druckluft-Bereich Projektarbeiten geleistet. Ferner bestehen Kontakte zur Fachhochschule Zürich–Winterthur und zu St. Gallen. Das etablierte **Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik** an der ETH Zürich leistet weiterhin einen wichtigen Beitrag zur nationalen (wie auch internationalen) Zusammenarbeit. Das **Druckluft-Kompetenzzenter** ist noch im Aufbau und 2006 wird eine erste Bilanz gezogen, ob und mit welchem Fachwissen, Angebot und Image sich eine derartige Institution im Markt behaupten kann.

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten konnten bestehende Kontakte zu weiteren **Förderinstitutionen** wie dem *Energiesparfonds des EWZ*, dem *Stromsparfonds Baselstadt*, der westschweizer *Recherche-Développement-Formation (RDF),* dem *Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)* und der KTI gepflegt werden. Zudem sind erste Kontakte mit dem neu etablierten *Swiss Electric*

Research Programm der schweizerischen Stromverbundunternehmen, hergestellt worden.

In mehreren Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen **Energieagenturen** *EnaW*, *eae* und *S.A.F.E* [36] gepflegt. In den Projekten werden, wenn möglich, **Branchenverbände** (z.B. *swissT.net, SWISSMEM, SWICO, VSE*) eingebunden. Schliesslich erfolgen auch Informationen und Koordinationen mit anderen BFE-Forschungsprogrammen.

Internationale Zusammenarbeit

Internationale Kontakte werden nach wie vor sowohl in direkter Zusammenarbeit in Projekten als auch durch Teilnahme an internationalen Konferenzen und Workshops gepflegt.

Die Schweiz wird am in Vorbereitung stehenden IEA-Implementing Agreement ***Electricity Networks R&D*** teilnehmen. Ebenfalls - im Rahmen des EU-Programms *Intelligent Energy Europe* - am Projekt ***Improving the Energy Efficiency of Server Application.***

Eine neue internationale Zusammenarbeit ist im Rahmen des ***6. EU-Rahmenprogramms*** im Gange (Projekt STRP-505724-1 HIPERMAG); während 3 Jahren werden MgB_2-Bänder und -Drähte mit dem Ziel erforscht, Anwendungen bei 20 Kelvin zu entwickeln. Durch die Teilnahme am IEA-Programm ***Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector*** werden die weltweiten Aktivitäten auf diesem Gebiet verfolgt. Das Programm des ***Superconducting European Network, SCENET II*** (GTC1-2001-43047) umfasst mehr als 80 verschiedene europäische Gruppen (Nodes) aus Hochschulen und Industrie, die sich mit Supraleitung befassen. Die Schweiz ist mit 2 Standorten vertreten und ist Mitglied des *Steering Committee*. Leider waren die Versuche erfolglos, eine Fortführung von *SCENET* zu erreichen, womit dieses effektive Instrument zur Zusammenführung von europäischen Wissenschaftlern Mitte 2006 endet.

Die EU hat in der schnelllebigen Welt der Kommunikations- und Informationstechnologie vorerst den Weg der Freiwilligen Vereinbarung gewählt und sogenannte ***Code of Conducts (CoC)*** sind in den Bereichen *Settop-Boxen, Broadband Devices* und *External Power Supply* entstanden. Sowohl bei der Entstehung als auch in der kontinuierlichen Verbesserung dieser *CoC* wird die Schweiz jeweils eingeladen und kann ihre entsprechenden Erfahrungen einbringen. Im USV-Bereich hat die Schweiz alle Grundlagen für eine Brachenvereinbarung erarbeitet. Da eine Umsetzung für diese Geräte nur auf internationaler Ebene sinnvoll ist, ist es erfreulich, dass der schweizerische Vorschlag von der EU aufgenommen wurde. Auch die weiteren, schweizerischen Arbeiten im Gebiet der **Informations- und Kommunikationstechnik** sind international abgestützt und koordiniert.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen ***Energieagenturen*** (Dänemark, Deutschland, Österreich, etc.) verhelfen immer wieder zu inspirierenden Anregungen. Ferner werden unter anderem Kontakte mit der ***Europäischen Kommission***, der ***IEA (International Energy Agency)***, der ***EPA (Environmental Protection Agency)*** und dem ***LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)*** in den USA sowie mit der französischen ***ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)*** gepflegt.

Durch die Arbeiten im europäischen ***Motor Challenge Programm*** konnten gute internationale Beziehungen etabliert werden. Mit der Beauftragung des deutschen Fraunhofer Instituts wird das dort vorhandene Fachwissen, welches im deutschen Programm *druckluft-effizient* aufgebaut worden ist, in die Schweiz transferiert. Die gute europäische Zusammenarbeit im Motorenbereich drückt sich auch dadurch aus, dass die Programmleitung ins *Programme Committee* der internationalen Konferenz ***Energy Efficiency in Motor Driven Systems EEMODS´05*** berufen wurde. An der Konferenz selber war die Schweiz mit 5 Präsentationen vertreten. Gleichermassen ist die Schweiz aktiver Partner im europäischen *SAVE*-Projekt ***Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung von Motorenbetreibern***.

Schliesslich wird durch die Schweizer Teilnahme am ***Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen*** [32] (siehe P+D-Projekte) der Anschluss an die internationale Forschergemeinde unterstützt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte / Umsetzungsaktivitäten

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten sind mit geeigneten Massnahmen möglichst effizient umzusetzen. Dazu sind oftmals umsetzungsorientierte resp. angewandte Forschungsarbeiten erforderlich, die marktnah sind und Resultate in den Marktbereich überführen. Die folgenden Arbeiten haben diese Zielsetzung und sind deshalb sehr umsetzungsnah.

INFORMATION / KOMMUNIKATION

Weltweit ist die Vernetzung in vollem Gange. Internet- und Telekommunikations-Dienste verschmelzen zunehmend. Die damit einhergehende Digitalisierung bringt eine rasante Verbreitung von Kommunikationsgeräten, sprich Breitband-Modems und Settop-Boxen und eine ebenso rasche Zunahme des Strombedarfes mit sich. Die Europäische Kommission (EC) hat auf diese Entwicklung reagiert und partnerschaftliche, freiwillige Vereinbarungen, so genannte *Code of Conducts (COC)* mit Herstellern und Dienstanbietern erarbeitet. Im Rahmen des ***Workshops „Energieeffizienz bei Settop-Boxen“*** [21a] wurden die Grundlagen geschaffen, dass mit der Branche eine analoge Vereinbarung in der Schweiz getroffen werden kann. Dazu wurden zwei Veranstaltungen mit ausgewählten Branchenvertretern durchgeführt. Anschliessend wurde in enger Zusammenarbeit mit der *Energie Agentur Elektrogeräte eae* eine schweizerische Vereinbarung ausgearbeitet. Diese liegt nun bereinigt vor und es ist wahrscheinlich, dass sie anfangs 2006 durch die relevanten Branchenvertreter und das BFE unterzeichnet werden kann.

In der Schweiz dürften über 100’000 Server in KMU-Betrieben in Betrieb sein. Heisse Sommer und immer höhere Ansprüche an die Leistungsfähigkeit der IT-Infrastruktur führen dazu, dass vermehrt Probleme mit Überhitzung der Server-Räume auftreten. Ohne sachkundige Beratung werden viele dieser Räume mit Klimageräten ausrüsten, obwohl über weite Teile des Jahres eine freie Kühlung genügen würde. Ziel des Projektes ***Merkblatt für eine effiziente Kühlung von KMU-Servern*** [21b] ist es ein Merkblatt zu erarbeiten, das Geschäftsführern und IT-Verantwortlichen in KMU-Betrieben hilft, eine energieeffiziente Kühlung des Server-Raumes zu realisieren.

MOTOREN/ ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Rund 750 GWh Elektrizität werden in der Schweiz durch etwa 150’000 Druckluftanlagen verbraucht, was 1,5% des nationalen Stromverbrauchs ausmacht. Zur Umsetzung eines berechneten Einsparpotentials von gegen 300 GWh laufen mehrere parallele Aktivitäten. Mit den ***Vorarbeiten zum Start der Kampagne Druckluft effizient Schweiz und begleitenden Arbeiten zum Aufbau eines Druckluftkompetenzzenters*** [22a] konnten die erforderlichen Grundlagen geschaffen werden, um in einer 2006 anlaufenden und in *EnergieSchweiz* eingebetteten ***Kampagne Druckluft Schweiz*** [22b] das bestehende Fachwissen breitenwirksam und gezielt umzusetzen. Acht schweizerische Industriepartner tragen diese schweizweite Kampagne mit. Ergänzend steht ein ***mehrsprachiges internetgestütztes Benchmarking für Druckluftanlagen*** [22c] zur Verfügung. Mit dem Aufbau eines ***Druckluftkompetenzzenters*** an der HTA Luzern [23] soll eine neutrale Anlaufstelle für Fragen zur Anwendung der Drucklufttechnik etabliert werden. Nachdem 2005 zum Aufbau des Fachwissens mehrere Druckluftanalysen durchgeführt wurden, die Lehre miteinbezogen wurde und auch publizistische Aktivitäten erfolgten, wird 2006 mit einer umfassenden Standortbestimmung die Stossrichtung des Kompetenzzentrums festgelegt. Im Projekt ***Optimierung der Steuerluftversorgung bei der Valorec Services AG*** [24] wurde ein Strombedarf für die Drucklufterzeugung von etwa 6’500 MWh/a identifiziert. Das maximal eruierte Potenzial der Energieeinsparung beträgt 1’800 MWh/a oder 28% des aktuellen Energiebedarfs. Für bestehende Anlagen können 2/3 des Potenzials mit einfachen Rückzahldauern zwischen 1 und 4 Jahren erreicht werden. Hierfür ist eine Teilerneuerung der Verdichter mit dem Ziel einer besseren Teillasteffizienz notwendig, kombiniert mit der Realisierung einer Verbundsteuerung. Die Umsetzung ist für 2006 vorgesehen.

Die EU hat im Rahmen von SAVE das *Motor Challenge Programm* gestartet. Die Schweiz nimmt daran als *assoziierter Partner* teil, was bedeutet, dass entsprechende Informationen ausgetauscht und Koordinationen anlässlich von Sitzungen erfolgen. Diese Aktivitäten laufen im Rahmen des Projekts ***Promotion und Koordination mit dem EU - Motor Challenge Programme*** [25]. Als nationaler Partner wurde zur Umsetzung im Januar 2005 eine Motoren-Fachtagung gemeinsam mit *SWISSMEM* und der *EnAW* mit Erfolg durchgeführt. In verschiedenen weiteren Veranstaltungen konnte ebenfalls das Thema Antriebs-Effizienz präsentiert werden. Auf der etablierten Homepage wurden verschiedene Informationen publiziert und mit einem neuen, elektronischen Newsletter ergänzt.

In der zweiten Etappe von *EnergieSchweiz* wird die Umsetzung im Bereich Antriebe mit grösserem Gewicht verfolgt. Als Vorbereitung und Unterstützung dienen die kürzlich gestarteten Projekte ***Technische Grundlagen effizienter Antriebssysteme*** [26a] und ***Massnahmen zum Stromsparen bei Elektromotoren: Marktanalyse*** [27]. Das Erstere soll strukturiert die Informationen über technisch effiziente Antriebssysteme zusammentragen und das Zweite definiert die anzusprechenden Zielgruppen.

GERÄTE

Immer häufiger trifft man Wasserspender an. Für die Kühlung wird elektrische Energie benötigt. Der Landesverbrauch beträgt heute ca. 4,5 GWh, wobei je nach Zuwachsrate bis ins Jahr 2010 der Verbrauch auf 42 GWh ansteigen könnte. Das technische Einsparpotenzial liegt bei über 50%, weshalb mit der Branche ***Grundlagen für eine***

Branchenvereinbarung bei Wasserdispensern [21c] erarbeitet wurden. (Unterzeichnung der Vereinbarung anfangs 2006). Im Projekt haben die vier wichtigsten Anbieter in der Schweiz mitgewirkt.

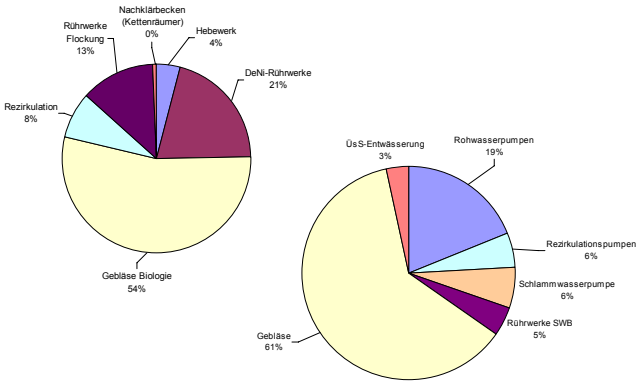
Aufbauend auf den entwickelten USV-Grundlagen [15] wurde im Projekt ***Erarbeitung eines Code of Conduct für USV-Anlagen*** [26b] gemeinsam mit Industrievertretern eine erste Version einer freiwilligen Branchenvereinbarung erarbeitet und der europäischen Branche unter Miteinbezug der EU präsentiert. Im Folgeprojekt ***Weiterentwicklung des Code of Conduct für USV-Anlagen mit europäischen Gremien*** [26c] werden diese Arbeiten 2006 mit der Zielsetzung fortgeführt, dass eine europäische Effizienzvereinbarung unterzeichnet wird.

Im Anschluss an die Vorstudie *Effizienzdeklaration für Kühlmöbel im Detailhandel,* bei der eine erste Abschätzung des jährlichen Stromverbrauchs ca. 1´000 GWh ergab, soll nun das gesamtschweizerische Einspar-Potenzial mit dem Projekt ***Gewerbliche Kühlung im Detailhandel*** [28] aufgrund der vorhandenen Daten der beiden Branchenführer zuverlässig abgeschätzt werden. Basierend auf diesen Zahlen soll anschliessend versucht werden, die europäische Branche gemeinsam mit der EU bezüglich der Energieeffizienz anzusprechen.

DIVERSES

Aufgrund der Tatsache, dass ein mutmassliches Einsparpotential von ca. 38 GWh in der Schweiz bei Kehrichtverbrennungsanlagen vorhanden ist, wurde mit dem Projekt ***Anleitung mit Checkliste zur Energieoptimierung von Kehrichtverbrennungsanlagen*** [31] eine Zusammenstellung möglicher Ansätze zur energetischen Optimierung sowie ein Massnahmenkatalog mit Checklisten zu den einzelnen Anlagenbereichen ausgearbeitet.

Ab Oktober 2006 darf Klärschlamm nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden, sondern muss umweltverträglich verbrannt werden. Als Vorstufen zur thermischen Entsorgung stehen die mechanische Entwässerung sowie die Trocknung des Klärschlammes im Vordergrund. Im Projekt ***Energetische Optimierung der Klärschlammaufbereitung*** [29] werden die verschiedenen Verfahren der Klärschlammaufbereitung aus energetischer Sicht untersucht, damit die Erkenntnisse anschliessend durch *EnergieSchweiz* in der Praxis verbreitet werden können. Nachdem die verschiedenen Trocknungsverfahren energetisch miteinander verglichen wurden, werden nun in drei Kläranlagen Messungen durchgeführt.



Figur 6: *Verteilung des Energieverbrauches der biologischen Reinigungsstufe des Wirbelbettverfahrens (links) und Festbettverfahrens (rechts)*

Mit dem ***Messprogramm energetisch optimierter Belebungsverfahren auf ARA*** [30] werden die häufigsten Klärverfahren energetisch ausgemessen. Im Jahr 2005 wurden für die beiden Verfahren *Wirbelbett* und *Festbett* der Energieverbrauch (siehe Fig. 6) und die Frachten des biochemischen Sauerstoffbedarfes mit einem Vergleich der Reinigungsleistungen zuverlässig erfasst. Die Ausmessung des *Membranverfahrens* erfolgt 2006, womit alle Vergleichsgrundlagen zur Verfügung stehen und auch Energie-Optimierungsmassnahmen formuliert werden können.

Im internationalen Projekt ***Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen*** (RES: Reversible Energy Storage System) [32] wird im Rahmen eines Pilotprojektes auf Gran Canaria das Zusammenspiel von erneuerbaren Energien in autonomen Netzen geprüft und aufgrund einer dezentralen Stromerzeugung eine Wasserstoff-Speicherung ausgetestet. Die Arbeiten sind auf EU-Ebene zurzeit allerdings unterbrochen.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Im Bereich ***Technologie*** konnten erfreulicherweise sowohl im applikatorischen als auch im materialwissenschaftlichen Bereich zwei abgestimmte Projekte zur thermoelektrischen Energiekonversion gestartet werden. Ebenfalls positiv war, dass mit Unterstützung der Schweiz die IEA das Implementing Agreement im Bereich der Hochtemperatursupraleitung (HTSL) um 5 Jahre verlängert und die Schweiz mit dem Vizepräsidium aktiv mitmacht. Leider haben die diversen Gespräche mit der Industrie nicht die gewünschten HTSL-Projektaktivitäten erbracht. Dies soll 2006 erneut versucht werden, wobei die ermutigenden Erfolge im Materialbereich förderlich sein dürften. Die technologische Machbarkeit bezüglich der Druckluftspeicherung wurde fortgesetzt und Zwischen-

ergebnisse stimmen zuversichtlich. Erfreulich war zudem, dass mit 8 Energieverteilunternehmungen der Grundstein für ein grosses, gesamtschweizerisches Projekt, in dem in einem ausgewählten Netz das Zusammenspiel zwischen dezentralen Erzeugungsanlagen und dem Niederspannungsnetz 1:1 untersucht wird, gelegt werden konnte.

Bei den ***effizienten Anwendungen*** konnten die internationalen Aktivitäten zum *Code of Conduct* bezüglich Settop-Boxen soweit vorangetrieben werden, dass eine helvetisierte Branchenvereinbarung nun vorliegt; eine Unterzeichnung ist 2006 vorgesehen. Bei positivem Ausgang wird für 2006 als Ziel vorgesehen, analoge Bestrebungen für *Breitbandgeräte* umzusetzen. Gleichermassen war es erfreulich, dass im Wasserdispenser-Bereich mit den Branchenleadern die Grundlagen zu einer Vereinbarung geschaffen werden konnte und diese ebenfalls voraussichtlich 2006 unterzeichnet wird. Die schweizerischen Arbeiten bezüglich den USV-Anlagen wurden in der EU positiv aufgenommen und in einem Treffen mit der europäischen Branche präsentiert. Es dürften aber noch einige Anstrengungen erforderlich sein bis eine europäische Vereinbarung in Griffweite kommt. Positiv war auch, dass mit dem Integraldrive nun ein effizienter und kostengünstiger Motor zur Verfügung steht und es ist zu hoffen, dass dessen Markteinführung erfolgreich wird. Mehrere Projektergebnisse (u.a. ein Merkblatt) liefern die Grundlagen, damit mit der zunehmenden Vernetzung im Haushalt der Stromverbrauch nicht übermässig ansteigt. Entsprechende Aktivitäten sind 2006 fortzusetzen.

Rückmeldungen bestätigten, dass mit einem ausführlichen Artikel in der Handelszeitung diverse Informationen einem grossen Interessenkreis bekannt gemacht werden konnten. Ergänzend wurden diverse Fachartikel in der einschlägigen Fachpresse platziert. Für 2006 ist den ***umsetzungsorientierten Aktivitäten*** unverändert starkes Gewicht beizumessen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] R. Flükiger, (rene.flukiger@physics.unige.ch), UNIVERSITÉ DE GENÈVE, *Genève*: ***Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector*** (JB)

[2] R. Joho (reinhard.joho@power.alstom.com), ALSTOM, *Birr*: a) ***Hochtemperatur-Supraleitung in elektrischen Maschinen, insbesondere Generatoren*** (SB) • b) ***Elektrische Maschinen, insbesondere Generatoren: Supraleiter-Technologie im Wettbewerb mit verbesserter, konventioneller Technologie*** (JB)

[3] A. Weidenkaff (anke.weidenkaff@empa.ch) , EMPA, *Dübendorf*: ***Geo-Thermopower (Geo-TEP)- Materials*** (JB)

[4] K. Fröhlich, G. Andersson (froehlich@eeh.ee.ethz.ch), ETH *Zürich:* a) ***Das thermoelektrische Kraftwerk*** (JB) • b) ***Vision of Future Energy Networks*** (JB)

[5] P. Brückmann (brueckmannelektronik@bluewin.ch), BRÜCKMANN ELEKTRONIK, *Davos*: ***Machbarkeit des Druckluftspeicherkonzepts BOP-B*** (JB)

[6] M. Höckel, (hkm1@bfh.ch), BERNER FACHHOCHSCHULE - HTI, *Biel*: a) ***Steuerbare Speicher zur Optimierung des Energieflusses in Niederspannungsnetzen mit DEA*** (SB) • b) ***Effizienzsteigerung im Verteilnetz durch neue Netzkonfigurationen*** (SB)

[7] P. Bühler, G. Schnyder (peter.buehler@aew.ch), AEW ENERGIE AG, *Aarau*: ***Vorprojekt VEiN: Verteilte Einspeisungen im Niederspannungsnetz*** (JB)

[8] J.-J. Simond, (jean-jacques.simond@epfl.ch) EPF, *Lausanne:* **Conception et intégration d'un logiciel FEM dans le simulateur numérique SIMSEN** (JB)

[9] B. Aebischer, (baebischer@ethz.ch), CEPE, ETH, *Zürich*: ***Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik*** (JB) www.biblioite.ethz.ch

[10] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, *Niederrohrdorf*: • a) ***Smarthome und Energieeffizienz*** (SB) • b) ***Energieeffizienzpotenzial von fest installierten Beamern*** (JB) • c) ***Energieeffiziente Stromversorgung mittels Power over Ethernet*** (SB)

[11] T. Schumann, (info@adhoco.com), ADHOCO AG, *Winterthur*: ***Home Automation System*** (JB)

[12] J. Nipkow, (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, *Zürich*: ***Elektrizitätsverbrauch und Einsparpotenzial von Aufzügen*** (SB)

[13] A. Stoev, A. Dittrich (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, *Zürich*: ***Integraldrive II: Integrierter Motor-Umformer mit bedarfsorientierter Energieaufnahme*** (SB)

[14] R. Tanner, (tanner@semafor.ch), SEMAFOR INFORMATIK & ENERGIE AG, *Basel*: a) ***Promot: Ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung für Motorenbetreiber*** (JB) • b) ***Energieeinsparungen bei Ersatz von Getriebemotoren durch FU-Antriebe*** (JB)

[15] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, *Hünenberg*: a) ***Beschaffung von Motoren unter Vollkostenbetrachtung*** (SB) • b) ***Energieeffizienz von USV-Anlagen*** (SB)

[16] R. Gloor (gloor@energie.ch), GLOOR ENGINEERING, *Sufers*: ***Energiesparmöglichkeiten mit intelligenten Stern-Dreieck-Schaltern*** (JB)

[17] S. Berchten (berchten@hispeed.ch), BERCHTEN ENGINEERING, *Kloten*: a) ***Massnahmen zur Ausschöpfung des Energiesparpotenzials bei Schrittmotorenansteuerungen*** (JB) • b) ***Ersatz von pneumatischen und hydraulischen Antrieben: Potentialstudie*** (JB)

[18] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), Circle Motor AG, *Gümligen*: a) ***Funktionsmuster eines Integral-Sparmotors im Leistungsbereich < 1 kW*** • b) ***Wirtschaftlichkeit, Anwendung und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren*** (JB)

[19] G. Courret (gilles.courret@heig-vd), HEIG-VD, *Yverdon*: ***Environmental friendly high efficient light source*** (JB)

[20] A. Weitnauer, (adrian.weitnauer@weitnauer-messtechnik.ch), WEITNAUER MESSTECHNIK, *Näfels*: ***Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen*** (SB)

Liste der P+D-Projekte / Umsetzungsprojekte

[21] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), ENCONTROL GMBH, *Niederrohrdorf*: a) ***Workshop Energieeffizienz bei Set-Top-Boxen*** (SB) • b) ***Merkblatt für eine effiziente Kühlung von KMU-Servern*** (JB) • c) ***Grundlagen für eine Branchenvereinbarung bei Wasserdispensern*** (JB)

[22] P. Radgen, (peter.radgen@isi.fhg.de), FRAUNHOFER INSTITUT, SYSTEMTECHNIK UND INNOVATIONSFORSCHUNG, *Karlsruhe*: a) ***Vorarbeiten zum Start der Kampagne Druckluft effizient Schweiz und begleitende Arbeiten zum Aufbau eines Druckluftkompetenzzenters*** (SB) • b) ***Kampagne Druckluft Schweiz*** (JB) • c) ***Umsetzung eines mehrsprachigen internetgestützten Benchmarkings von Druckluftanlagen*** (SB)

[23] B. Stadelmann, (bstadelmann@hta.fhz.ch), HTA LUZERN, *Horw*: ***Aufbau des Druckluft Kompetenzzenters an der HTA Luzern, Phase 1*** (JB)

[24] R. Dott, (r.dott@fhbb.ch), FHBB-IFE, *Muttenz*: ***Optimierung der Steuerluftversorgung bei der Valorec Services AG*** (SB)

[25] J. Nipkow, (juerg.nipkow@arena-energie.ch), ARENA, ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIE-ALTERNATIVEN, *Zürich*: ***Promotion und Koordination des EU Motor Challenge Programme*** (JB) www.motorchallenge.ch

[26] G. Schnyder, (gilbert.schnyder@sing.ch), SCHNYDER INGENIEURE AG, *Hünenberg*: a) ***Technische Grundlagen effizienter Antriebssysteme*** (JB) • b) ***Erarbeitung eines Code of Conduct für USV-Anlagen*** (SB) • c) ***Weiterentwicklung des Code of Conduct für USV-Anlagen mit europäischen Gremien*** (JB)

[27] W. Baumgartner (w.baumgartner@basics.ch), BASICS AG, *Zürich*: ***Massnahmen zum Stromsparen bei Elektromotoren: Marktanalyse*** (JB)

[28] A. Frölich, (andreas.frölich@mgb.ch), MIGROS GENOSSENSCHAFTS BUND, *Zürich*: ***Gewerbliche Kühlung im Detailhandel*** (SB)

[29] H. Vetter, (winterthur@holingerag.ch), HOLINGER AG, *Winterthur*: ***Energetische Optimierung der Klärschlammaufbereitung*** (JB)

[30] B. Kobel, S. Kempf, (stefan.kempf@rysering.ch), RYSER INGENIEURE AG, *Bern*: ***Messprogramm energetisch optimierter Belebungsverfahren auf ARA*** (JB)

[31] S. Egli, (s.u.a.eng@bluewin.ch) S&A Engineering AG, *Schaffhausen*: ***Anleitung mit Checkliste zur Energieoptimierung von Kehrichtverbrennungsanlagen*** (SB)

[32] A. Stoev, (a.stoev@idsag.ch), IDS AG, *Zürich*: ***Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy sectors using Hydrogen***

Referenzen

[33] ***Internetseite von EnergieSchweiz*** und dem BFE www.bfe.admin.ch

[34] ***Internetseite von Swiss Electric Research*** (Organisation der schweizerischen Stromverbundunternehmen) www.swiss electric-research.ch

[35] ***Internetseite des Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL)*** (dort sind auch Links zu nationalen Forschungsstätten zu finden) www.psel.ch

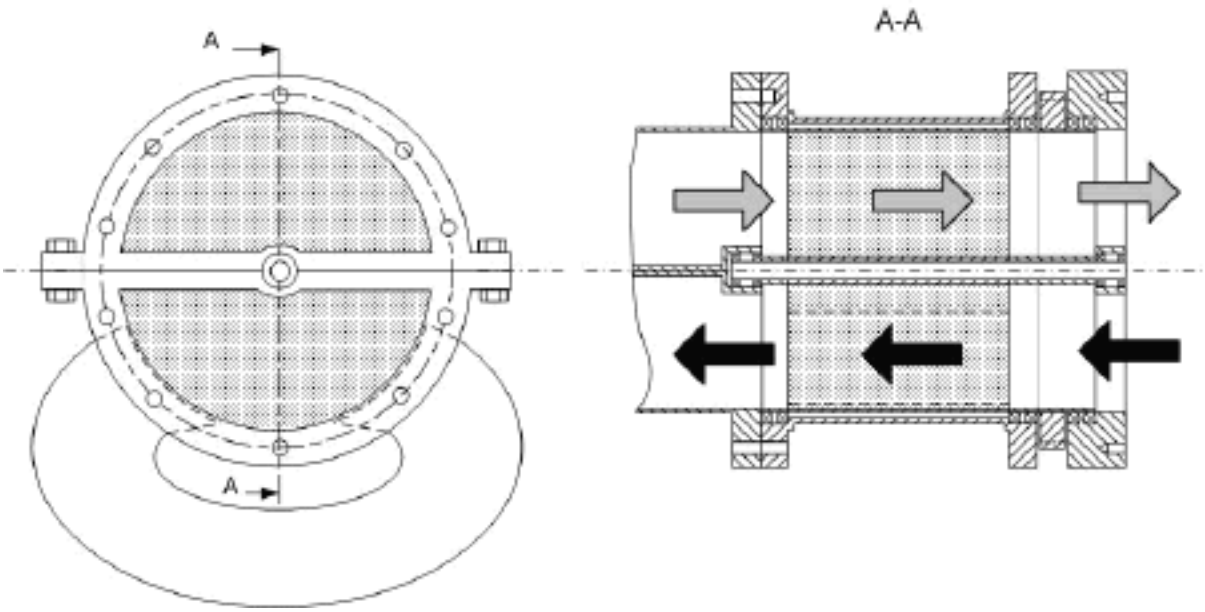
[36] ***Internetseite der Energieagenturen*** www.energieagentur.ch und www.energie-agentur.ch und www.eae-geraete.ch

[37] ***Internetseite des Forschungsprogramms www.electricity-research.ch***. Download von Zusammenfassungen und Schlussberichte durchgeführter Forschungsarbeiten

[38] ***Internetseite von Novatlantis*** www.novatlantis.ch

UMGEBUNGSWAERME, WÄRME-KRAFT-KOPPLUNG, KÄLTE

Thomas Kopp, Max Ehrbar, Fabrice Rognon
tkopp@hsr.ch , ehrbar.max@bluewin.ch , fabrice.rognon@bfe.admin.ch



Magnetokalorischer Effekt in Versuchswärmepumpe

Ein magnetokalorischer Wärmepumpen-Prozess wird am einfachsten durch einen rotierenden porösen Zylinder ermöglicht. Es laufen vier Phasen ab: Aufheizen im Magnetfeld (1), Wärmeabfuhr durch Fluid (2), Abkühlung bei Verlassen des Magnetfeldes (3) und Wärmezufuhr durch Fluid (4).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Immer noch benötigt die Bereitstellung von Wärme in der Schweiz einen Anteil von rund 75 % der gesamten Nutzenergie. Wärme für Raumheizung und Warmwasserbereitung wird zu 90 % aus fossilen Brennstoffen erzeugt. Dabei werden Kohlendioxid und Schadstoffe produziert. Die Emission dieser Schadstoffe kann durch die Substition mit Wärmepumpen und Wärme-Kraftkopplungsanlagen um bis zu 50 % gesenkt werden.

Elektrisch angetriebene Wärmepumpen reduzieren den Verbrauch von fossilen Energieträgern und den CO_2-Ausstoss, sofern die elektrische Energie CO_2-neutral mit Wasserkraft oder Kernenergie erzeugt wird. Auch wenn die Elektrizität aus modernen thermischen Kombikraftwerken (Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 58 bis 60 %) stammt, kann eine Reduktion um 40 % erreicht werden. Mit dem Einsatz von dezentralen Wärme-Kraftkopplungsanlagen in Kombination mit Wärmepumpen lassen sich Reduktionen von 30 bis 50 % erreichen [27].

Das Hauptgewicht der Aktivitäten des Forschungsprogramms bleibt deshalb bei der Verbesserung der Wirkungsgrade und bei der Erweiterung des Einsatzbereiches und der Akzeptanz [28].

Wärmepumpen, WKK-Anlagen und Kälteanlagen haben heute ein hohes technisches Niveau erreicht. Trotzdem zeigen theoretische Analysen noch ein Verbesserungspotential auf, das jedoch aus ökonomischen Einschränkungen oder aus Unwissen der Produzenten noch zuwenig genutzt wird. Die Forschung hat die Aufgabe, diese Möglichkeiten aufzuzeigen [29]. Steigende Preise für fossile Brennstoffe erhöhen die Umsetzung dieser theoretischen Möglichkeiten in der Praxis.

Bei den Pilot- und Demonstrationsanlagen werden seit 2002 vor allem Grossanlagen von Wärmepumpen, kombinierte Anlagen für Heizung und Kühlung und Abwasser als Wärmequelle für Wärmepumpen gefördert. Die Förderung besteht (resp. bestand) aus Finanzbeiträgen und Messaufträgen zum Nachweis der energetischen und betrieblichen Qualität einer Projektes. Im Zuge des Entlastungsprogrammes 2003 des Bundesrates wurden diese Mittel gestrichen und das Programm wird seit Ende 2004 herunter gefahren. Neue Anlagen kommen seit 2004 nicht mehr dazu. Die letzten Anlagen werden im Jahr 2007 aus der Programmaufsicht entlassen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

WAERMEPUMPEN

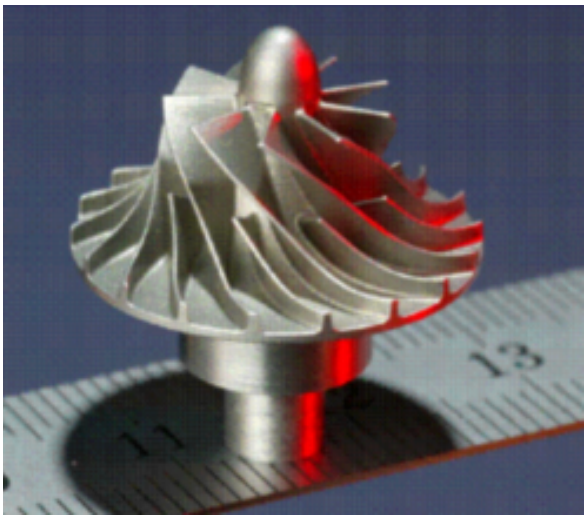
Wärmepumpen werden in Gebäuden zum Heizen und zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Es sind auch reine Warmwasser-Wärmepumpen auf dem Markt, die Elektroboiler ersetzen können. Das Projekt ***Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe*** [1] untersucht die optimalste Variante der Wärmezufuhr aus der Wärmepumpe in den Boiler. Durch konkrete Messungen wird belegt, ob die interne Zufuhr oder die Zufuhr über einen externen Wärmetauscher wirtschaftlichere Ladungszeiten ergibt.

Das Projekt ***Pulsbreitenmodulation (PBM) für Kleinwärmepumpen, Phase 4: Erweiterung der PBM-Regler für Kombianlagen*** [2] untersuchte die Regelstrategie, die Wärmepumpe während vorgegebenen Zeitabschnitten zu betreiben und dadurch Energiepakete in das Gebäude zu transportieren. Die Bestimmung des Zeitpunktes und der Zeitdauer dieser Energiepakete erfolgte anhand von 3 verschiedenen Strategien. Das beste Resultat, eine 10%-ige Kostenreduzierung bei gleichbleibendem Komfort wurde mit einem modellbasierten Pulsbreitenmodulations-Regler erreicht.

Wie eingangs beschrieben könnte eine sofortige, massive Reduktion der CO_2-Emissionen erreicht werden, wenn alte, sanierungsbedürftige Heizsysteme durch Wärmepumpen ersetzt würden. Leider erfordern die zu beheizenden Gebäude wegen schlechter Isolation hohe Vorlauftemperaturen. Da aber häufig die Radiatorenflächen sehr klein dimensioniert sind, sind auch nach Umsetzung von Zusatzisolationsmassnahmen und dem Ersatz der alten Fenster immer noch höhere Vorlauftemperaturen notwendig. Deshalb muss auch noch der aus physikalischer Sicht ungünstige Fall Wärmepumpe mit hohem Temperaturhub für Sanierungen weiter bearbeitet werden. Da mit einer konventionellen Kompression nur beschränkte Temperaturhube verwirklicht werden können, müssen zweistufige Lösungen realisiert werden. In früheren Arbeiten des Programms wurde gezeigt, dass der Einsatz von zwei Kompressoren in den Kreisläufen mit Oelmigrationsproblemen verknüpft ist. Das Oel wird aus der Hochdruckstufe verdrängt und sammelt sich in der Niederdruckstufe. Deshalb können nicht einfach zwei Kompressoren hintereinander geschaltet werden. Für den Sanierungsmarkt wurde die ***Geregelte Wärmepumpe PIONEER : Geregelte Luft-Wasser-Wärmepumpe für Sanierungen von Oel- und Elektroheizungen*** [3] entwickelt. In dieser Wärmepumpe wurde ein neuartiger zweistufiger Kompressor und eine konsequente Anwendung der Drehzahlregleung eingebaut. Im Bericht wird bei einer Vorlauftemperatur von 58 °C und einer

Lufttemperatur von -10 °C ein COP von 3.55 und eine Heizleistung von 13 kW genannt. Die Heizleistung kann dank der Drehzahlregelung im Bereich 1 zu 6 angepasst werden.

Ebenfalls ein hoher Temperaturhub wird im Projekt ***Compresseur Radial pour Pompe à Chaleur bi-étagée, Phase 2*** [4] angestrebt. Hier wird ein miniaturisierter Turboverdichter eingesetzt. Die Wärmepumpe arbeitet mit R-134a. Der Turboverdichter ist mit Gaslagern gelagert, sodass im ganzen Kreislauf kein Oel benötigt wird. Durch die kleinen Abmessungen des Turborades (Figur 1) mit einem Durchmesser von 20 mm wird eine hohe Drehzahl von ca 200'000 rpm benötigt. Der Antrieb erfolgt direkt, indem der Rotor des Elektromotors auf der Kompressorachse angeordnet wurde und benötigt dadurch eine elektronische Ansteuerung, die ebenfalls entwickelt werden musste.



Figur 1: *Kompressorrad des Turboverdichters mit einem Durchmesser von 20 mm Das Rad wurde mit einem Hochgeschwindigkeitsfräser mit Durchmesser 1 mm aus einem Vollzylinder vorgefräst und mit einem Feinfräser mit Durchmesser 0.5 mm feinbearbeitet [4]*

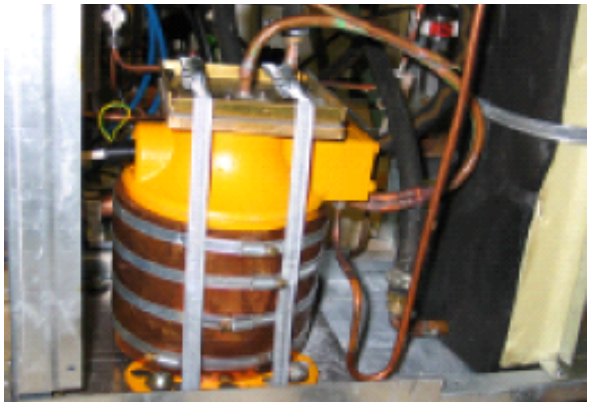
Dieses Projekt bietet neben der Verbesserung der Wärmepumpen grosse Chancen aber auch Herausforderungen für die Schweizer Industrie, insbesondere für die Branchen Feinmechanik und Elektronik.

Im Projekt ***Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen und Kältemaschinen*** [5] wurde hauptsächlich die Klimatisierung von Gebäuden untersucht. Es zeigte sich, dass auch bei guten Leistungszahlen der Kältemaschine, der Nutzen des Gesamtsystems durch eine unsachgemässe Kälteverteilung im Gebäude stark verschlechtert wird. In dieser Arbeit wurden die Verluste durch eine Exergieanalyse quantifiziert. Die Resultate dieser Arbeit müssen nun vor allem den Gebäudeplanern vermittelt werden [30].

Die Methoden der physikalischen Leistungsmessung von Wärmepumpen sind in verschiedenen Normen definiert und international verschieden, was einen Vergleich der Testresultate stark erschwert. Im IEA -Projekt ***Test procedure and seasonal performance calculation for residential heat pumps with combined space and domestic hot water heating*** [6], [7], wurde zuerst eine Uebersicht erarbeitet, die zeigte, dass sowohl die alternative Methode (entweder Warmwasser oder Heizung) als auch die kombinierte Methode (Warmwasser und gleichzeitig auch Heizung) im Markt vorhanden sind. In einigen Ländern, unter anderen auch in der Schweiz, existieren aber nur Testverfahren für die alternative Methode. Um den Testaufwand minimal halten zu können, wurden auch Berechnungsmethoden für den Jahresnutzungsgrad verglichen und erweitert. Das ursprünglich anvisierte Ziel einer weltweiten Anpassung an eine gemeinsame Norm konnte nicht erreicht werden, hingegen wurde durch die intensiven Diskussionen der europäischen, amerikanischen und japanischen Normen erreicht, dass zukünftige Test- und Berechnungsmethoden auf einer gemeinsameren Basis etabliert werden. Die Schweiz lieferte den Beitrag ***Rechenmethode für den Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen-Kompaktgeräten und Validierung*** [8]. In den modernen nach dem MINERGIE oder MINERGIE-P errichteten Gebäuden werden Wärmepumpen-Kompaktgeräte eingesetzt, die neben dem Heizbedarf auch das Warmwasser und die Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung in einem Gerät vereinen. Diese Gebäude benötigen einen vergleichsweise geringen Energiebedarf. Deshalb musste eine angepasste Testmethode erarbeitet werden. Das Projekt untersuchte 2 Kompakt-Wärmepumpen, wobei eine in einem MINERGIE- und die andere in einem MINERGIE-P-Gebäude eingesetzt waren. Der Vergleich zwischen Feldtests und Berechnungsverfahren zeigte eine Abweichung von <6%. Auch hier sind die treibenden Temperaturgefälle in den Wärmetauschern im Vergleich zu den kleinen zu produzierenden Temperaturunterschieden von grosser Bedeutung, sodass relativ kleine Jahresnutzungsgrade ermittelt wurden. Auch die Energie für Hilfsaggregate wie Ventilatoren oder Steuerung fallen um so mehr ins Gewicht, je kleiner die abzugebenden Heizenergie-Wärmemengen sind. Es zeigte sich (wieder einmal), dass die heutigen Wärmepumpen nur noch bessere Wirkung erzielen können, wenn sie zusammen mit dem zu beheizenden System optimiert werden.

Der globale Klimawandel ist nachweislich durch Emissionen von FCKW und von CO_2 stark beeinflusst, wenn nicht sogar verursacht. In Wärmepumpen und Kälteanlagen sind in der Vergangenheit FCKW-haltige Arbeitsmedien eingesetzt worden, da sie gut geeignete physikalische Eigenschaften

aufweisen. Heute ist klar, dass chlorhaltige Stoffe für den Ozonabbau in der oberen Athmosphäre verantwortlich sind, deshalb sind chlorhaltige Arbeitsmedien heute verboten. Die HFKW und FKW verursachen aber auch noch einen Anstieg des Treibhauseffektes. Dieses Schadenpotential kann im GWP-Faktor (Greenhouse Warming Potential) quantifiziert werden. Schon heute sollten nur noch Stoffe mit sehr kleinem GWP eingesetzt werden. Zur Verbesserung des umweltfreundlichen Einsatzes von Wärmepumpen können zwei Richtungen eingeschlagen werden: Erstens die Minimierung von Undichtigkeiten in den Anlagen und die Maximierung des Kältemittelrückflusses bei Reparaturen und Servicetätigkeiten und zweitens der Umstieg auf umweltneutrale Arbeitsmedien wie Ammoniak, Propan und Kohlendioxid. Weltweit ist eine enorme Aktivität in der Erforschung von Einsatzmöglichkeiten von CO_2 zu beobachten. In der Schweiz konzentriert sich die Forschungsaktivitäten auf CO_2 und Ammoniak. Es können aber auch Aktivitäten mit Propan beobachtet werden, neben wenigen kleineren Anlagen wurde 2005 eine grössere Propananlage im Schulhaus Limmat in Zürich [9] in Betrieb genommen. Im Projekt ***CO_2-Wärmepumpe*** [10] wurde in Zusammenarbeit einer schweizer Forschungsgruppe und einem deutschen Wärmepumpenhersteller eine Wärmepumpe für Heizungswasser und Warmwasser (s. Figur 2) entwickelt und untersucht. Die Wärmepumpe soll in einem Standard-Minergie-P-Haus (Passivhaus) eingesetzt werden. Aus einer ersten theoretischen Kreislaufoptimierung wurde klar ersichtlich, dass das CO_2 nur für die Brauchwassererwärmung geeignet ist. Für den Einsatz in Niedertemperatur-Heizsystemen eignet es sich nur, wenn die Rücklauftemperaturen extrem tief sind. Im Projekt hat es sich auch gezeigt, dass die Komponenten-Lieferanten bei CO_2-Komponenten noch nicht auf dem gleichen Stand sind wie bei den Komponenten für andere Arbeitsmedien. Es fehlen noch ausgereifte Produkte mit guten Wirkungsgraden.

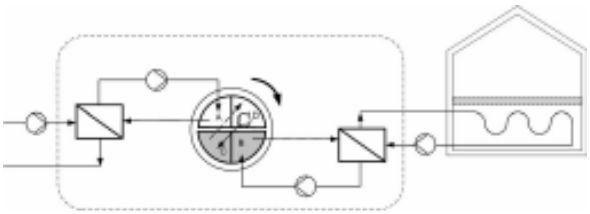


Figur 2: *Verdichter TN 1416 von Danfoss im CO_2-Wärmepumpen-Prototyp. Der Verdichter wurde auf der Oberseite und am Mantel gekühlt. Für die Tests wurde der Verdichter isoliert [10].*

CO_2 wird wegen seinem vergleichsweise tief liegenden kritischen Punkt weltweit als Ersatz-Arbeitsmedium für Hausheizungen überschätzt. Es ist aber sehr gut geeignet für die Produktion von Heisswasser. Daraus könnte sich in Zukunft eine Trennung des Wärmepumpeneinsatzes ergeben: CO_2-Wärmepumpen für die Trinkwasser-Bereitung und Wärmepumpen ohne CO_2 für Heizungen, insbesondere Niedertemperatur-Heizungen. In Japan produzieren mehrere Firmen CO_2-Wärmepumpen für die Warmwasser-Bereitung. Diese sind aber in der Schweiz noch nicht käuflich, hingegen werden auch hier Warmwasser-Wärmepumpen mit Uebergangs-Arbeitsmedien wie R-134a angeboten. Im Projekt ***Mesures des données énergétiques d'une pompe à Chaleur air/eau au CO_2 (R744) pour préparation d'eau chaude sanitaire dans un hôpital*** [11] wird eine CO_2-Warmwasser-Wärmepumpe im Spital Le Locle untersucht. Diese Wärmepumpe entlastet den bestehenden Gaskessel und liefert mit einer Leistung von 60 kW Warmwasser von 80 °C bei variablen Aussentemperaturen von -20 bis +35 °C. Beim Betrieb dieser Wärmepumpe wurde festgestellt, dass zuwenig Energie aus der Luft bezogen werden konnte und dass der ursprüngliche Aufstellungsort wegen Lärmsensitivität ungeeignet ist. Die Wärmepumpe musste auf das Dach gezügelt werden. Die Resultate sind permanent auf der Website www.pac-co2.com abrufbar. Im Projekt ***Ammoniak-Kleinwärmepumpe für hohen Temperaturhub*** [12] konnte die Eignung von Ammoniak auch für kleinere Wärmepumpen nachgewiesen werden. Es wurde ein zweistufiger ölfreier Verdichter der Firma Haug AG St.Gallen eingesetzt, wobei die Wellenenergie aus dem Elektromotor mit einer Magnetkupplung an den Kompressor übertragen wurde. Der gemessene COP war nur im Betriebspunkt B-20/W60 höher als vergleichbare Wärmepumpen weil der eingesetzte Elektromotor falsch ausgelegt wurde und in einem ungeeigneten Betriebspunkt arbeiten musste. Die Versuche sollen an der FH Rapperswil mit einem besseren Elektromotor teilweise wiederholt werden. Im Projekt wurde auch eine Ammoniakfalle getestet, die auf adsorptiver Basis Ammoniak aufnehmen kann. Sobald die Komponentenhersteller vermehrt auch Komponenten für kleinere Leistungen und das Arbeitsmedium Ammoniak auf den Markt bringen, werden Kleinwärmepumpen mit Ammoniak im Markt Fuss fassen. Die bisher durchgeführten Projekte zeigen deutlich, dass Ammoniak auch in Kleinwärmepumpen einsetzbar ist.

Die ganze Problematik mit den Arbeitsmedien könnte schlagartig eliminiert werden, wenn der Vorschlag einer magnetischen Wärmepumpe realisiert werden könnte. Schon im letzten Jahrhundert wurde der magneto-kalorische Effekt gefunden, der mittels starken Magnetfeld-Aenderungen

thermische Effekte ergibt. Durch die Erfolge in der Erforschung der supraleitenden Materialien waren bezüglich Magnetisierbarkeits-Wirkungsgraden sehr grosse Fortschritte erzielt worden. Im Projekt ***Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz*** [13] soll die Anwendbarkeit der magnetischen Wärmepumpe für schweizerische Verhältnisse *Fussbodenheizung* und *Heizung und Warmwasser-Produktion in einem Sanierungsgebäude* untersucht werden (s. Figur 3). Die Arbeiten finden national [31] und international [32] grosse Beachtung und führten auch zu mehreren Patentanmeldungen. Diese Forschungsaktivität könnte zu einem radikalen Umbruch in der Wärmepumpen-Herstellung führen, denn das hier verwendete Grundprinzip der Produktion von Wärme einer anderen Temperatur als der Umgebungstemperatur ist sehr verschieden von den klassischen Clausius-Rankine-Methoden.



Figur 3: *möglicher Einbau einer magnetischen Wärmepumpe in eine Fussboden-Heizung [13]*

Alle Wärmepumpen benötigen zugeführte Wärme (Wärmequelle). Diese stammt bekanntlich aus den *unendlich* grossen Reservoirs Umgebungsluft und Erdwärme. Theoretische Analysen [29] zeigen, dass der Transport aus dem Quellenmedium an den Verdampfer der Wärmepumpe besonders sorgfältig erfolgen muss, will man nicht zu starke Wirkungsgrad-Einbussen verzeichnen. Somit müssen die Vorgänge bei der Nutzung der Wärmequellen Luft und Erdwärme weiter erforscht werden. Schätzungen zeigen, dass durch Verbesserung der Vorgänge bei der Wärmequelle eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades von 10 % möglich scheinen. Im Projekt ***Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern Phase 3: technische Umsetzung, Labor- und Feldversuche*** [14] wurden die Abtaumethoden: Ventilatorabtauung, Umluftabtauung, Abtauung mit direkter Wärmeentnahme aus dem Senkenkreis mittels Glykol-Wasser-Zwischenkreis im Vergleich zu den klassischen Methoden ‚Prozessumkehr' und ‚Heissgasabtauung' untersucht. Die Resultate zeigen eine Verminderung des elektrischen Energieaufwandes für das Abtauen von 75 bis 80 %. Auch die klassische Abtaumethode ‚Heissgasabtauung' wurde vertieft untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass mit einer Saugdruckregelung die Abtauleistung um etwa 30 % gesteigert werden kann. Aus den Feldanalysen von 8 Anlagen zeigte sich auch, dass viele Abtausteuerungen nicht optimal eingestellt sind. Manche Verbesserungen wie zum Beispiel die Ventilatorabtauung oder die optimierte Abtausteuerung können mit wenig technischem Aufwand und kostengünstig realisiert werden.

Im ***Projekt LOREF 2: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung*** [15] werden die im Projekt LOREF 1 gefundenen Effekte in die Praxis umgesetzt. Die wichtigsten Massnahmen zur Effizienzsteigerung der Luft/Wasser-Wärmepumpe sind eine verbesserte Geometrie des Luftkühlers und eine optimierte Ventilatorcharakteristik. Auch der Abtauprozess muss in die Konzeptionierung des Kühlers einbezogen werden. Besonders in den heiklen Betriebszuständen bei Aussentemperaturen zwischen 2 und 7 °C muss versucht werden, eine homogenere und kompaktere Frostablage zu erreichen. Dies wird stark beeinflusst von der Luftströmungsverteilung und von der Verteilung des Kältemittels im Luftkühler. Die mit den Arbeiten betraute Projektgruppe setzt auch Exergieanalysen ein, um die realen Verluste aufzuspüren. Es wurde (wieder einmal) erkannt, dass nur eine integrale Optimierung aller Komponenten der Wärmepumpe zu einem stark effizienteren Betrieb führen kann. Es ist geplant, den optimierten Luftkühler mit einem Luftkühler aus dem Markt experimentell auf dem gebauten Versuchsstand zu vergleichen.

Viele neuere Anlagen entnehmen die Wärme mittels Erdsonden aus der Erde. Damit wird der im Vergleich zur Aussenluft viel gleichmässigere saisonale Temperaturverlauf ausgenützt. Um den Qualitätsstandard zu halten existiert seit Jahren ein Gütesiegel für Wärmepumpen und ein Gütesiegel für Erdwärmesonden. Seit dem 1. Januar 2005 wurde eine Druckprüfung ein Bestandteil des Gütesiegels Erdwärmesonden. Damit wird erreicht, dass den Bauherrschaften keine lecken Erdwärmesonden übergeben werden. Das Projekt ***Anpassen der Druckprüfung nach DIN V 4279-7 für Erdwärmesonden aus Polyethylen*** [16] bearbeitete die Vorgehensweise und die Testmethodik bei der Druckprüfung der Erdwärmesonden.

In der Schweiz sind etwa 85'000 kleinere Wärmepumpen mit einem Leistungsbereich unter 30 kW in Betrieb. Seit einiger Zeit werden aber auch grössere Wärmepumpen bis 500 kW gebaut und betrieben. Hier ergibt sich ein neues Geschäftsfeld für Contractor-Firmen. Alle Grosswärmepumpen sind speziell engineerte Anlagen, die auf den konkreten Fall ausgelegt sind. Es zeigt sich, dass die Standardisierung noch weitgehend fehlt und dass offenbar immer wieder Auslegungs-Fehler auftreten, denn die Leistungszahlen der Grosswärmepumpen sind kleiner als diejenigen der in

Serien gebauten kleineren Wärmepumpen. Das Projekt ***Grosswärmepumpen Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen und Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte*** [17] untersucht Grosswärmepumpen mit einer Heizleistung zwischen 140 und 530 kW. Als Wärmequellen wurde Grundwasser, gereinigtes und ungereinigtes Abwasser und Erdwärme verwendet. Die Arbeitsmedien waren R134a und R407c. Es zeigte sich, dass neben der Qualität der Wärmepumpe auch die Methode der Energieverteilung und der Wartungsaufwand eine bedeutende Rolle spielen. Auch die Tatsache, dass einige Anlagen bei etappierter Gebäudeerstellung und damit auch bei kleinerer momentanen Bedarfsmengen im Teillastbetrieb schlechter arbeiten, ist bedeutsam. Es ist bekannt, dass Grosswärmepumpen ein grosses Reduktionspotential an CO_2 und Einsparung von fossilen Brennstoffen ermöglichen, sie können aber betreffend Qualitätssicherung und Wirkungsgrad noch verbessert werden.

WAERME-KRAFT-KOPPLUNG

Wie eingangs erwähnt, bietet die Kombination von Wärmepumpen und Wärme-Kraft-Kopplung eine schnell realisierbare Variante der Reduktion von fossilen Brennstoffen und CO_2-Emissionen. Leider lässt die Kostensituation der fossilen Brenn- und Treibstoffe auch mit der in diesem Jahr erfolgten massiven Preiserhöhung die Verbreitung von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen in grossem Stil noch nicht zu. Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen sind technisch auf einem hohen Stand und werden heute schon in Nischen wie zum Beispiel Klärgas-Verstromung eingesetzt. Die anderen im Markt erhältlichen Produkte Gas- oder Dieselmotor plus Generator werden aber nach wie vor eher als Notstromaggregate verkauft. Diese Produkte eignen sich nicht für den Dauerbetrieb. Im Berichtsjahr konnte aus verschiedenen Gründen leider kein Forschungsprojekt unterstützt werden.

KAELTE

Der Bedarf an Kälteenergie in Kühlräumen im Gewerbe und im Handel ist um ein Vielfaches grösser als die Nutzwärmemenge, welche mit Wärmepumpen für Heizzwecke produziert wird. Damit ist auch das Investitionsvolumen für Kälteanlagen bedeutend grösser als die Investitionen für Wärmepumpen. Obwohl der gleiche physikalische Prozess apparativ umgesetzt wird, werden alle Anlagenkomponenten für Wärmepumpen und für Kälteanlagen für den Einsatzzweck der Kälteanlagen optimiert. Es existiert ein grosses internationales Angebot an Kältetechnik-Komponenten. Ausser den Haushaltskühlschränken werden die meisten Kälteanlagen als Einzelanfertigungen geplant und gebaut. Da sich viele Anlagnebauer gegenseitig konkurrenzieren, ist die Gewinnmarge angespannt.

Da der Bedarf an Kälteenergie in der heutigen Zeit gross ist und die grundlegende Technologie die gleiche ist wie bei Wärmepumpen, wurde im Forschungsprogramm,vor etwa 5 Jahren beschlossen, auch Verbesserungen in der Kältetechnik zu bearbeiten. Im Jahr 2004 konnte dann das Projekt ***Hocheffiziente zweistufige Verdampfung in einer Kälteanlage*** [18] gestartet werden, das nun Mitte 2005 abgeschlossen werxden konnte. Das Projekt untersuchte eine Idee der Firma BMS-Energieanlagen AG, die spezifische Verdampfungsenergie mit einer internen Unterkühlung zu vergrössern. Ein Vergleich in der Kälteanlage eines Supermarktes zwischen dem neuen Prinzip und einer herkömmlichen Kälteanlage zeigte eine Energiereduktion von 11 %. In der Folge dieses Erfolgs waren weitere Projekte im Bereich *Kälte* geplant, diese konnten aber leider wegen den erfolgten Budgetkürzungen nicht umgesetzt werden. Die Resultate des Projektes [5] können ebenfalls im Bereich Klimakälte umgesetzt werden. Aus diesem Grund wurde auch die Besprechung des Schlussberichtes in einem grösseren Workshop mit 15 eingeladenen Branchen-Spezialisten besprochen. Die Aktivitäten im Bereich Kälte sollen intensiviert werden, wobei auch auf gute Kontakte zum Schweizerischen Verein für Kältetechnik aufgebaut werden soll.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die Mitarbeit von privaten Firmen in den meist sehr anwendungsnahen Projekten beteiligt sich die Privatwirtschaft intensiv an der Forschungstätigkeit. Das Engagement reicht dabei von einer Mitarbeit in einer Begleitgruppe bis zur Uebernahme von erheblichen finanziellen Beiträgen. Da die Projektleiter häufig an einer Fachhochschule tätig sind, besteht eine besonders intensive Beziehung zu Fachhochschulen. Die Projekt-Themen wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn häufig können innerhalb der BFE-unterstützten Projekte auch kostengünstige Semester- und Diplomarbeiten integriert werden. Die Fachhochschulen leisten hier mit ihrer Mitarbeit auch einen sehr kostengünstigen Beitrag zur Wissensvermehrung, denn häufig werden die Kosten für Versuchsmaterial oder Infrastruktur nicht voll auf die Projekte umgelegt. Auch die vielerorts vorhandenen Gerätepools dürfen kostengünstig, zum Teil kostenlos, für BFE-Forschungsprojekte genutzt werden. Viele Institute an den Fachhochschulen bilden eigentliche Kompetenzzentren,

auch wenn sie im Sinne der offiziellen Bezeichnung für Kompetenzzentren zu klein sind. Dafür wird an diesen Instituten ohne grossen Overhead sehr effizient gearbeitet. Auch mit dem LENI der EPFL und mit dem IMRT der ETH Zürich besteht eine konstruktive Zusammenarbeit.

Interessierte Fachkreise werden durch Publikationen der Projektleiter und der laufenden Publikation der Ergebnisse auf der Internetseite des Programms www.waermepumpe.ch und auf der Berichtsseite des BFE http://www.energieforschung.ch/energieforschung/suche/index.html?lang=de orientiert. An Workshops über abgeschlossene Forschungsprojekte werden ausgewählte Personen aus Industrie und Markt orientiert. An der diesjährigen ***12. UAW-Tagung*** [31] wurden, wie immer im traditionellen zweijährigen Rhythmus, die neusten Forschungsarbeiten in kürzeren Uebersichtsbeiträgen präsentiert. Der grösste Hörsaal der FHI Burgdorf war dabei bis auf den letzten Platz besetzt.

Mit den Verantwortlichen der Kommission für Technologie und Innovation KTI besteht ein reger Gedankenaustausch. Dabei wird die Förderung der verschiedenen Projekte durch die KTI und das BFE abgesprochen.

Mit dem Energieforschungsfonds der schweizerischen Gasindustrie FOGA und dem Forschungsfonds der schweizerischen Erdölvereinigung FEV werden gute Kontakte gepflegt. Der FOGA förderte im Berichtsjahr die Verbreitung und die Verbesserung von gasbetriebenen Wärmepumpen. Auch wurde ein spezielles Programm zur Evaluation von Gasmotor-Wärmepumpen gestartet, das auch vom BFE eng verfolgt wird. Die Entstehung des neuen Forschungsfonds der Elektrizitätswirtschaft wird sehr begrüsst. Wir erhoffen uns eine erhebliche Stärkung von Forschungsprojekten im elektrischen Energiesektor.

Es wurde mit Genugtuung zur Kenntnis genommen, dass der Stromsparfonds der Stadt Zürich und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel Stadt sich durch namhafte Beiträge an 2 BFE-Projekten [5] und[10] beteiligten.

Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe unseres Programms. In der *Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz* arbeiten das BFE, Branchenverbände von Planern und Anbietern von Wärmepumpen, Elektrizitätswerke und Dienststellen von Kantonen zur Verbreitung zuverlässiger, effizienter und preiswerter Wärmepumpen zusammen. Die Anliegen der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie werden durch den WKK-Fachverband wahrgenommen. Die Anliegen der Kältebranche werden durch den *Schweizerischen Verein für Kälte SVK* vertreten.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgte auch im Jahr 2005 vorwiegend durch eine aktive Mitarbeit im Heat Pump Programm HPP der Internationalen Energieagentur IEA. Diese aktive Rolle wird durch den von der Schweiz initiierten und Ende 2005 abgeschlossenen Annex 28 [6] unterstrichen, in dem die FH Muttenz den Operating Agent stellte. Neben der Schweiz beteiligten sich die Länder Österreich, Kanada, Deutschland, Frankreich, Japan, Norwegen, Schweden und die USA. Noch nie zuvor konzentrierten sich im Heat Pump Programm 9 Länder auf ein gemeinsames Thema. Die gute Zusammenarbeit und die effiziente Führung durch den Operating Agent C. Wemhöner führten zur Ausarbeitung eines neuen Projekt-Vorschlages, der Ende 2005 als Annex 32 ***Economical heating and cooling systems for low energy houses*** akzeptiert wurde. Wiederum liegt die Rolle des Operating Agent bei der FH Muttenz. Im September 2005 wurde ein von den mitgliedern des HPP erarbeitetes Grundsatzpapier ***How Heat Pumps can help to address today's key Energy Policy Concerns*** [33] publiziert. In diesem dokument werden die energiepolitischen Möglichkeiten des Einsatzes von Wärmepumpen in einem weltweiten fokus dargestellt.

In den wichtigen europäischen Normengremien vertritt die Schweiz ihr Anliegen. Die FWS ist Mitglied der European Heat Pump Association EHPA, wobei der schweizerische Vertreter auch Miglied der Begleitgruppe des Forschungsprogramms ist. Die im dreijährigen Turnus stattfindende ***Heat Pump Conference*** fand 2005 in Las Vegas statt [34]. 225 Teilnehmer trafen sich zum konstruktiven Gedankenaustausch darunter auch eine starke Delegation von 12 Teilnehmern aus der Schweiz. Diese stellten dem interessierten Publikum ihre Aktivitäten in 2 Vorträgen und 6 Postern vor. Der Programmleiter stellte in einem Uebersichtsvortrag die vom BFE-Programm unterstützten Wärmepumpen-Projekte vor. Obwohl im EU-Projekt SHERPA unter Leitung der Gruppe Greth in Grenoble keine schweizer Forschungsgruppe beteiligt ist, besteht doch ein reglemässiger Gedankenaustausch mit gegenseitigen Besuchen mit dem Projektleiter Dr.Bernard Thonon. Die schweizerischen Aktivitäten im Bereich Ammoniak und CO_2 fanden grosse Beachtung.

Die Internetseite des Forschungsprogramms www.waermepumpe.ch [35] findet mit über 90 % der Zugriffe aus dem Ausland auch international grosse Beachtung.

Das Ziel des Projekts ***Wärmenutzung aus Abwasser, Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen*** [18] war die Schaffung belastbarer Daten der Wärmegewinnung aus ungereinigtem und gereinigtem Abwasser für Wärmepumpent. Ziel war ein Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen. Er beschreibt die Wärmeentnahme aus Schmutzwasserkanälen und zeigt verschiedene ausgeführte Anlagen auf. Das Zusammenwirken von Wärmeentnahme und Abwassertemperaturen wird aufgezeigt. Es werden Faustformeln für die Dimensionierung der Abwasserentnahmeanlagen angegeben. Ein wichtiges Kapitel ist dem Einfluss der Abkühlung des Schmutzwassers durch die Wärmeentnahme auf die biologischen Funktionen der Abwasserreinigung gewidmet. Des weiteren werden Untersuchungen zur Verschmutzung des Wärmetauschers im Abwasserkanal durch Biofilmbildung angeführt, sowie verschiedene Bauformen von Kanalwärmetauschern diskutiert. Im letzten Abschnitt werden rechtliche Fragen zur Wärmeentnahme dargestellt und Hinweise für vertraglich festzuhaltende Abmachungen gegeben.

Das Projekt ***Heizen und Kühlen mit Abwasser, Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden*** [19], befasste sich ebenfalls mit der Wärmegewinnung aus ungereinigtem und gereinigtem Abwasser für Wärmepumpen. Der entstandene Leitfaden wendet sich aber vor allem an Bauherren und Gemeinden. Auf 32 Seiten werden in leicht verständlicher Sprache die Möglichkeiten und Besonderheiten der Wärmenutzung aus Abwasser und der Kühlung mit Abwasser dargelegt und an Beispielen aus dem In- und Ausland illustriert.

Nutzung von Abwasser-Wärme aus der ARA Uster mittels kalter Fernwärme [20]. In Uster werden drei Wohnsiedlungen in unmittelbarer Nähe zur Kläranlage mit Wärmepumpen und Wärmebezug aus dem gereinigtem Abwasser der ARA beheizt (kalte Fernwärme genannt). Die Anlage wurde im Contracting durch die Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) erstellt und betrieben. Zwei Anlagen arbeiten monovalent, die dritte Anlage bivalent mit Ölkessel. Die installierte Wärmepumpenheizleistung beträgt 656 kW und die Wärmebezugsleistung aus dem Abwasser 499 kW. Das Brauchwarmwasser wird ebenfalls mit den Wärmepumpen bereitgestellt. Dank dem geringen Höhenunterschied zwischen ARA und den Wärmepumpen in den Wohngebäuden und der relativ nahen Lage zur ARA sind die Pumpenleistungen für die Förderung des gereinigten Abwassers bescheiden, was zu Jahresarbeitszahlen von 3.13, 4.16 und 4.14 (jeweils Mittelwerte von 1 bis 3 Jahren) geführt hat. Die tiefste Arbeitszahl resultiert von der mit Hubkolbenkompressoren bestückten Anlage. Die beiden anderen Anlagen weisen Scroll-Verdichter auf (siehe Fig. 1 auf der Titelseite). Die Wärmepumpen werden drehzahlvariabel betrieben. Die Rückspülfilter für das gereinigte Abwasser müssen jährlich einmal manuell gereinigt werden. Die Investitionskosten für die Wärmeentnahme-Einrichtung aus dem Abwasser betragen Fr. 1663 pro kW installierter Bezugsleistung.

Wärmepumpe mit Grundwasser für die Wohnüberbauung Mosermatte Münsingen [21]: In der Wohnüberbauung Mosermatte, Münsingen, werden im Endausbau 49 Wohnungen (16 Reihen-EFH, 2 EFH, 3 MFH) zentral mit einer bivalenten Wärmepumpen- und Heizkesselanlage beheizt und mit Brauchwarmwasser versorgt (Fig. 4 und 5). Zum Berichtszeitpunkt waren rund 80% der geplanten Wohneinheiten angeschlossen. Die Wärmepumpe bezieht die Quellenwärme aus dem Grundwasser. Die Auslegeleistung der Wärmepumpe beträgt 120 kW, die gesamte Wärmebedarfsleistung 360 kW. Die gemessene Leistungszahl liegt bei 3.17 (inklusive Nebenantriebe) und damit etwa im Durchschnitt anderer Gross-Wärmepumpen. Die Investitionskosten belaufen sich inkl. Planerhonorar auf Fr. 352'000 für die Wärmepumpen mit Quellenanlage oder Fr. 2933 pro kW installierter Heizleistung der Wärmepumpe. Für die Quellenanlage wurden Fr. 108'000 oder Fr. 900 pro installierter kW Heizleitung verbaut, was sehr günstig ist.

Fig. 4: *Heizkesselanlage (ca. 360 kW Nennleistung) mit Warmwasserspeicher. Die Wärmepumpe befindet sich links um die Ecke hinter dem Heizkessel.*

Wärmekollektiv Bremgarten, Sanierung und Erweiterung [22]: Im Jahre 1984 entstand ohne Bundesunterstützung in der Gemeinde Bremgarten/BE ein Wärmekollektiv, dessen Wärmepumpen (Gesamtheizleistung 3000 kW, Heizleistung der Wärmepumpen 1400 kW) aus der

Fig. 5: Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle, ca. 120 kW Nennleistung.

ARA Region Bern durch eine offene Leitung mit gereinigtem Abwasser als Wärmequelle versorgt wurden. Da das System nicht befriedigte, wurde eine umfangreiche Sanierung durchgeführt. Es wurde insbesondere die offene Abwasserleitung durch den Einbau einer Rücklaufleitung zu einem geschlossenen System umgebaut. Diverse weitere Massnahmen verbesserten die Redundanz und Betriebstauglichkeit des Systems. Gleichzeitig wurden auch verschiedene bestehende Wärmepumpen ersetzt. Das Abwassersystem ist mit Sauberwasser gefüllt. Die Abwassertemperaturen betragen im Mittel 12°C, können aber bis auf 7°C absinken. Die Kosten der Sanierung der Abwasseranlage belaufen sich auf rund 1.75 Mio. Franken oder ca. 1880 Fr. pro installierte kW Wärmeentnahmeleistung. Die sanierte Anlage ging Ende September wieder in Betrieb.

Wärmenutzung aus der Kanalisation zur Beheizung und Kühlung der Uhrenfabrik IWC mittels Wärmepumpe [23]: Bei der Sanierung der Heizanlage der Uhrenfabrik IWC in Schaffhausen wurde die Gelegenheit genutzt, den in rund 105 m Entfernung vorbei fliessenden Abwasserkanal (Schmutzwasser) im Heizmodus als Wärmequelle und im Kühlmodus als Wärmesenke für die Wärmepumpe zu nutzen (ungereinigtes Abwasser). Im Heizmodus werden dem Abwasser rund 80 kW Wärme entzogen und im Kühlmodus etwa 260 kW zurückgegeben. In diesem Projekt interessierte vor allem die Nutzung des ungereinigten Abwassers für Heiz- und Kühlzwecke. Die Abwassertemperatur lag zwischen 12 und 14 K. Zwischen der Wärmepumpe und dem Abwasserwärmetauscher läuft ein Zwischenkreislauf, der die Wärme im Heizmodus vom Abwasser zur Wärmepumpe und im Kühlmodus von der Wärmepumpe zum Abwasser transportiert (Fig. 7). Im Heizmodus liegen die Temperaturen des Zwischenkreises bei 7/11 °C (Vor-/Rücklauf) und im Kühlmodus bei ca. 45/26 °C. Der Kanalwärmetauscher ist in der Sohle des Abwasserkanals eingebaut (Fig 6). Er besteht aus rostfreiem Stahl und weist eine Fläche von 42 m^2 auf. Der k-Wert zwischen dem Zwischenkreislauf und dem Abwasser beträgt etwa 450 W/(m2*K). Das Abwasser wird beim Minimaldurchfluss von 125 l/min im Heizmodus um etwa 0.15 K abgekühlt und im Kühlmodus um etwa 0.5 K aufgeheizt. Die Wärme-Leistungszahlen liegen im Heizmodus zwischen 2.9 und 3.2, und die Kälteleistungszahlen zwischen 2.2 und 2.9. Die Kosten für die Wärmeentnahme/Rückgabe-Anlage im Abwasserkanal inklusive Zwischenkreis zur Wärmepumpe belaufen sich auf 296'000 Franken (inkl. Planungshonorar). Dies sind 7050 Franken pro m^2 Wärmetauscherfläche, resp. 3700 Franken pro kW installierter Wärmeentnahmeleistung, resp. 1138 Franken pro kW installierter Wärmerückgabeleistung. Die Anlage zeigt, dass das Abwasser ein stabiles und gut nutzbares Wärmepotential darstellt.

Fig. 6: Wärmetauscher in der Sohle des Abwasserkanals zur Entnahme von Wärme aus dem ungereinigten Abwasser (Bild IWC)

Fig. 7: Zu- und Wegleitung des Zwischenkreislaufs (Wärmetransportleitung) zwischen Wärmepumpe und Kanalwärmetauscher (Bild IWC)

Beim Projekt ***Sanierung der Heizanlage im Studienzentrum Gerzensee mittels Wärmepumpe und Erdwärmesonden*** [24] handelt es sich um die Sanierung einer bestehenden Heizanlage. Die

bestehende bivalente Heizanlage für Heizung und Brauchwarmwasser mit einer Auslegeheizleistung von etwa 300 kW mit einem Spitzenlastkessel und 8 Luft-Wasser-Wärmepumpen wurde durch einen neuen Heizkessel und zwei Sole-Wasser-Wärmepumpen ersetzt. Der Sanierungserfolg ist durchschlagend. Die beiden Wärmepumpen decken neu nicht nur über 90 % des Wärmebedarfs (statt 56 %) der alten Wärmepumpen, sondern sparen sogar absolut noch Strom. Mit der Errichtung eines Erdwärmesondenfeldes als Wärmequelle für die Wärmepumpe wurde auch die Gelegenheit benutzt, für einen Teil der Räume eine passive Kühlung einzubauen. Etwas ungünstig liegen die Kosten. Der Autor hat berechnet, dass es eines Ölpreises von etwa 130 Fr./l bedarf, um Kostengleichstand mit einem reinen Ölkessel zu erhalten. Dies ist allerdings teilweise darauf zurückzuführen, dass der Anteil der Wärmepumpe an der Wärmedeckung (zu) hoch ist. Dies geschah jedoch auf ausdrücklichen Wunsch der Bauherrschaft. Beim ähnlichen Konzept in der Anlage [21], beträgt die Auslegeleistung der Wärmepumpe nur 1/3 der Auslegeleitung des Gesamtsystems. Trotzdem deckt die Wärmepumpe etwa 85 % des Wärmebedarfs.

Bei der ***Sanierung und Optimierung der Wärmepumpenanlage im Haus Kristall, Oberwald*** [25] wird als Wärmequelle Wasser aus dem Furkatunnel eingesetzt. Nach diversen Schwierigkeiten mit der ersten Wärmepumpe (u.a. starker Leistungseinbruch wegen Kompressorschadens) wurde diese ersetzt. Leider trat schon kurz nach Inbetriebnahme ein kapitaler Schaden am Verdampfer auf (Durchgang zwischen Kälteseite und Quellenwasser), der das ganze Projekt stark verzögerte. Dadurch wurde auch die Erfolgskontrolle in Form einer Messkampagne verzögert. Da das Projekt aus planerischen und energetischen Gründen von hohem Interesse ist, wurde mit der Bauherrschaft vereinbart, dass die Messungen bis ins Jahr 2006 fortgesetzt werden. Dazu wurden seitens des BFE spezielle Messwünsche bezüglich der Quellenanlage eingebracht.

Pompe à chaleur sur sondes géothermiques pour chauffer et refroidir une PME. Installation de chauffage et de climatisation des bureaux et des ateliers de l'entreprise Roger Seematter SA à St-Légier [26]: L'entreprise Roger Seematter SA est active dans les domaines de la laverie industrielle, de la réfrigération commerciale et de la climatisation. Lors de la conception de ses nouveaux locaux, l'entreprise a soigné le concept énergétique. L'étude énergétique du bâtiment a rapidement démontré que, parallèlement aux besoins de chauffage, il était nécessaire d'assurer un rafraîchissement des locaux administratifs en raison du nombre de postes de travail prévu. Comme les PAC réversibles du marché ne fonctionnent qu'en chauffage ou en refroidissement, R. Seematter SA a créé une installation adaptée à ses besoins simultanés ou alternés de 27 kW chaud et 21 kW froid. Une PAC standard a été modifiée par l'ajout de deux échangeurs au niveau du condenseur. Elle est couplée à 3 sondes géothermiques de 150 m chacune. Un stock d'eau chaude à 50 °C et un stock d'eau froide à 10 °C assurent la couverture permanente des besoins. L'eau chaude sanitaire est accumulée à 55 °C dans un troisième stock. Le coefficient de performance annuel en chauffage seul est de 3.7 à 3.8. En mode combiné, il est de 3.3. Les surcoûts d'investissement nets de 80'000.- sont compensés en moins de 7 ans par les économies annuelles nettes de 12'000.-, sans compter le gain appréciable de place par l'absence de citerne à mazout et de machine de froid.

Production d'électricité par ORC à partir des rejets de chaleur du site de méthanisation de Châtillon/GE. Deux machines thermiques à fluide organique de Rankine (ORC) valorisent l'énergie thermique des moteurs de cogénération à biogaz. La première machine (ORC1) est équipée d'une turbine scroll, la deuxième (ORC2) en comprend deux en parallèle. Chaque turbine a une puissance électrique de 7 kW à 3'000 t/min. L'ORC1 a une puissance électrique de 7 kW et l'ORC2 de 14 kW. Le rendement escompté est de 6 à 7% avec un rejet de chaleur à 100 °C. Le fluide utilisé est le R134a qui est vaporisé à haute pression par la chaleur du moteur puis détendu dans la turbine scroll, qui est en fait un compresseur du même nom modifié pour la circonstance. Le programme de mesure a rencontré de nombreux problèmes. Pas à cause des ORC mais des pannes répétées du digesteur et donc à l'indisponibilité des moteurs de cogénération. Vu le faible temps de fonctionnement et de mesure possible, on s'est concentré sur l'ORC1. Finalement, avec une source chaude de 95 °C, la machine a délivré 5 kW électrique avec un rendement moyen de 6.3%. Le rendement maximal mesuré s'élève à 6.6%, toujours avec une source chaude à 95 °C. Le rendement théorique maximal étant de 17%, la machine atteint donc le rendement exergétique respectable de 40%, ce qui correspond aux objectifs fixés. Les problèmes techniques de nature mécanique sont maîtrisés. Par contre, la régulation doit être optimisée, notamment la gestion du démarrage en fonction du fonctionnement des moteurs et de la protection contre le gel dans le circuit de refroidissement des ORC. Comme un moteur peut désormais fonctionner en continu, les mesures continuent. Le rapport final est attendu pour début 2007.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Im Jahr 2005 wurden wiederum die im CORE-Konzept aufgelisteten Ziele beharrlich verfolgt. Zudem wurden einige neue Forschungsarbeiten lanciert und stehen jetzt in Bearbeitung, die langfristige Ziele verfolgen. Hier dürfen besonders die Arbeiten an der magnetischen Wärmepumpe genannt werden. Im Berichtsjahr waren leider die Ende 2004 erfolgten Budgetkürzungen massiv spürbar. Mehrere interessante Projektvorschläge konnten mangels Finanzierung nicht begonnen werden. Wir hoffen ganz klar auf eine spürbare Verbesserung in den kommenden Jahren. Die Wärmepumpen-Industrie erfreut sich einer grossen Nachfrage aus dem Markt. Diese angenehme Situation führt allerdings dazu, dass viele Firmen mit der Umsetzung der Produktion stark ausgelastet sind und neue Entwicklungen etwas zurückstellen. Hier wünschen sich die Programmleiter mehr freie Kapazität auf Seiten der Wirtschaftspartner, sodass sich die Forschung und Weiterentwicklung nicht zu stark auf die Forschungsinstitute alleine konzentrieren muss. Anfangs 2006 konnten wiederum mehrere Forschungsprojekte bewilligt werden, über die unter anderem auch an der UAW-Tagung 2007 berichtet werden wird. Die Programmleitung ist überzeugt, dass die Erfolgsstory und die Weiterverbreitung der Wärmepumpen in der Schweiz weitergehen wird. Mit zunehmenden Preisen der fossilen Energieträger und oder mit einer konsequenten Durchsetzung der Möglichkeiten zur CO_2-Reduktion wird auch die Verbreitung der dezentralen WKK-Anlagen grösser werden.

Das Ziel bei den P+D-Projekten, Grosswärmepumpenanlagen vermehrt zu fördern, wurde umgesetzt. Dies gilt auch für die spezielle Förderung von Abwasserwärmenutzung und von kombinierten Anlagen für Heizung und Kühlung. Von den im Jahre 2005 laufenden Projekten basierten 5 auf der Nutzung von gereinigtem und ungereinigtem Abwasser. Zwei Anlagen waren kombinierte Heiz-/Kühlanlagen mit Wärmepumpen. Alle Projekte erfüllten die in sie gesteckten Erwartungen. Zusätzlich gab es eine Fülle von Erfahrungswerten für die zukünftige Planung mit dem Ziel, die energetische Qualität anzuheben und die Kosten zu reduzieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Publikationsnummern in Klammern)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] H.R. Gabathuler, P.Mayer, Th.Baumgartner, (gabathuler.ag@bluewin.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT GABATHULER / BAUMGARTNER, *Diessenhofen:* ***Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe*** (JB)

[2] Bianchi M. et al., INSTITUT FÜR MESS- UND REGELTECHNIK ETH ZÜRICH, *Zürich:* ***Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpen Phase 4: Erweiterung der PBM-Regler für Kombianlagen*** (SB).

[3] P. von Böckh, H.J.Eggenberger, M.Borer, Th.Borer, (hj.eggenberger@solartis.com), ARBEITSGEMEINSCHAFT Fachhochschule beider Basel FHBB Muttenz und Solartis GmbH Füllinsdorf, *Füllinsdorf:* ***Geregelte Wärmepumpe PIONEER: Geregelte Luft-Wasser-Wärmepumpe für Sanierungen von Oel- und Gasheizungen*** (SB) (250035)

[4] Jürg Schiffmann, Daniel Favrat, Alex Molyneau, (jurg.schiffmann@epfl.ch), LENI-EPFL und Offtech SA, *Lausanne*: ***Compresseur Radial pour Pompe à chaleur bi-étagée, Phase 2*** (SB 250093)

[5] Beat Wellig et al. (beat.wellig@ebp.ch) Ernst Basler und Partner AG *Zürich*: ***Verdoppelung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen und Kälteanlagen*** (SB).

[6] Carsten Wemhöner, Thomas Afjei, (thomas.afjei@fhnw.ch) University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, Institute of Energy in Building, Muttenz : ***Final Report IEA HPP Annex28 Test procedure and seasonal performance calculation for residential heat pumps with combined space and domestic hot water heating***. (can be ordered from Heat Pump Centre www.heatpumpcentre.org) .

[7] Carsten Wemhöner, Thomas Afjei, (thomas.afjei@fhnw.ch) University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, Institute of Energy in Building, Muttenz : ***Final Report IEA HPP Annex28 Test procedure and seasonal performance calculation for residential heat pumps with combined space and domestic hot water heating*** (Zusammenfassung, in deutscher Sprache)

[8] Carsten Wemhöner et al. (thomas.afjei@fhnw.ch), University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, Institute of Energy in Building, Muttenz and University of Applied Sciences Lucerne HTA Test Center HLKS, Luzern: ***Calculation method form the seasonal performance of heat pump compact units and validation*** (SB)

[9] Patrick Renold , (patrick.renold@hbd.stzh.ch), Hochbauamt der Stadt Zürich, *Zürich:* ***Wärmepumpe mit Propan im Schulhaus Limmat*** (persönliche Mitteilung)

[10] Markus Friedl, Kai Schiefelbein, (markus.friedl@awtec.ch), awtec AG für Technologie und Innovation, *Zürich* und Stiebel eltron GmbH& Co.KG, *Holzminden (D):* ***CO_2-Wärmepumpe*** (SB 250095).

[11] Patrice Anstett, Hugo Anstett, (info@pac-co2.com),Pac-co2.ch / Recherche et Développment, *Neuchâtel:* ***Mesure des données énergétiques d'une pompe à chaleur air/eau au CO_2 (R744) pour préparation d'eau chaude sanitaire dans un hôpital*** (JB).

[12] Damian Stauffer, Christian Savino, Thomas Kopp (tkopp@hsr.ch), Arbeitsgemeinschaft Hochschule Rapperswil, *Rapperswil* und UNEX Wärmetauscher AG, *Wallisellen*: ***Kleinwärmepumpen für hohen Temperaturhub*** (SB)

[13] Peter W. Egolf, Osmann Sari, (peter.egolf@eivd.ch), Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud (EIVD), *Yverdon:* ***Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz*** (JB)

[14] Max Ehrbar, Stefan Bertsch, Stefan Schwendener, Peter Hubacher, Carlos Bernal, Beat Hubacher, (he-ko@bluewin.ch) , ARBEITSGEMEINSCHAFT Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, *Buchs* und Hubacher Engineering, *Engelburg:* ***Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampofern, Phase 3: technische Umsetzung, Labor- und Feldversuche*** (SB 250092).

[15] Heinrich Huber, Karl Hilfiker, Rashid Sahinagic, Louis Berlinger, Martin Imholz, (hjhuber@hta.fhz.ch), HOCHSCHULE FUER TECHNIK + ARCHITEKTUR LUZERN (HTA), *Horw:* ***LOREF2: Luftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung*** (JB)

[16] Ernst Rohner, (ernst.rohner@geowatt.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT GEOWATT AG und ENGEO AG, *Zürich und Arnegg:* ***Anpassen der Druckprüfung nach DIN V 4279-7 für Erdwärmesonden aus Polyethylen*** (SB 250094).

[17] Peter Hubacher, Max Ehrbar, (he-ko@bluewin.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT HUBACHER ENGINEERING, *Engelburg* und ENERTEC AG, *Sargans:* ***Grosswärmepumpen: Energetische und planerische Analyse von 10 Anlagen und Vergleich der verschiedenen Anlagenkonzepte*** (SB 250092)

Liste der P+D-Projekte

[18] R. Buri, B. Kobel: ***Wärmenutzung aus Abwasser – ein Leitfaden für Inhaber, Betreiber und Planer von Abwasserreinigungsanlagen und Kanalisationen***, Energie in Infrastrukturanlagen (www.infrastruktur.ch, www.energieforschung.ch), (SB)

[19] E.A. Müller, F. Schmid: ***Heizen und Kühlen mit Abwasser, Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden***, **energie**schweiz, Bezug: Bundesamt für Bauten und Logistik, BBL, 3003 Bern, www.bundespublikationen.ch, Bestellnummer 805.691.d (SB)

[20] E. Betscha: ***Nutzung von Abwasser-Wärmeaus der ARA Uster mittels kalter Fernwärme***, Schlussbericht November 2006, **energie**schweiz, Bezug (ab Februar 2006): Bundesamt für Energie, BFE, 3003 Bern, www.energieforschung.ch (SB 250086)

[21] S. Lanz: ***Wärmepumpe mit Grundwasser für die Wohnüberbauung Mosermatte Münsingen, Erfolgskontrolle,*** Schlussbericht November 2005, BFE, Bezug (ab Februar 2006): Bundesamt für Energie, BFE, 3003 Bern, www.energieforschung.ch (SB 250076)

[22] B. Eggen: ***Wärmekollektiv Bremgarten/BE, Sanierung und Erweiterung***, Zwischenbericht November 2005, beim BFE. (JB)

[23] A. Gründler: ***Wärmenutzung aus der Kanalisation zur Beheizung und Kühlung der Uhrenfabrik IWC mittels Wärmepumpe,*** Schlussbericht November 2005, BFE, Bezug (ab Februar 2006): Bundesamt für Energie, BFE, 3003 Bern, www.energieforschung.ch (SB 250075)

[24] P. Kuhn: ***Sanierung der Heizanlage im Studienzentrum Gerzensee mittels Wärmepumpe und Erdwärmesonden***, Schlussbericht Dezember 2005, BFE, Bezug (ab Februar 2006): Bundesamt für Energie, BFE, 3003 Bern, www.energieforschung.ch (SB)

[25] M. Ehrbar: ***Sanierung und Optimierung der Wärmepumpenanlage mit Gebirgswasser im Haus Kristall, Oberwald***. Jahresbericht 2005 (JB)

[26] M. Luthi, R. Seematter, ***Pompe à chaleur sur sondes géothermiques pour chauffer et fefroidir une PME***, rapport final (SB), décembre 2004.

Referenzen

[27] Martin Zogg, Energie- und Verfahrenstechnik, Oberburg: ***Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend***, aus Gas-Wasser-Abwasser gwa82(2002)12, 907/912 download ab [35]

[28] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007*** (CORE-Konzept) download ab http://www.energieforschung.ch/energieforschung/suche/index.html?lang=de

[29] Thomas Kopp, Leiter BFE-Forschungsprogramm UAW, FH Rapperswil, *Rapperswil*: ***Potenzial für Wirkungsgradsteigerungen an Wärmepumpen***, in Wärmepumpen-Forschung: Wärmequellen, Komponenten, Arbeitsmedien (12. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des BFE, 22. Juni 2005, HTI Burgdorf), download ab [35]

[30] Beat Wellig, Beat Kegel, Martin Meier, Heinz Richter, Ernst Basler und Partner AG, *Zürich*: ***Doubling the Seasonal Performance Factor (SPF) of chilled Water Systems with small Temperature Lift*** in proceedings Clima 2005 (9. – 12. october 2005) Lausanne

[31] ***12. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte*** des BFE, 22. Juni 2005, HTI Burgdorf), download ab [35]

[32] ***International Congress of Magnetic Refrigeration***, 27. – 29. September 2005, Montreux.

[33] IEA HPP, ***How Heat Pumps can help to address today's key Energy Policy Concerns***, document prepared by The Heat Pump Program Implementing Agreement, can be downloaded from www.heatpumpcentre.org

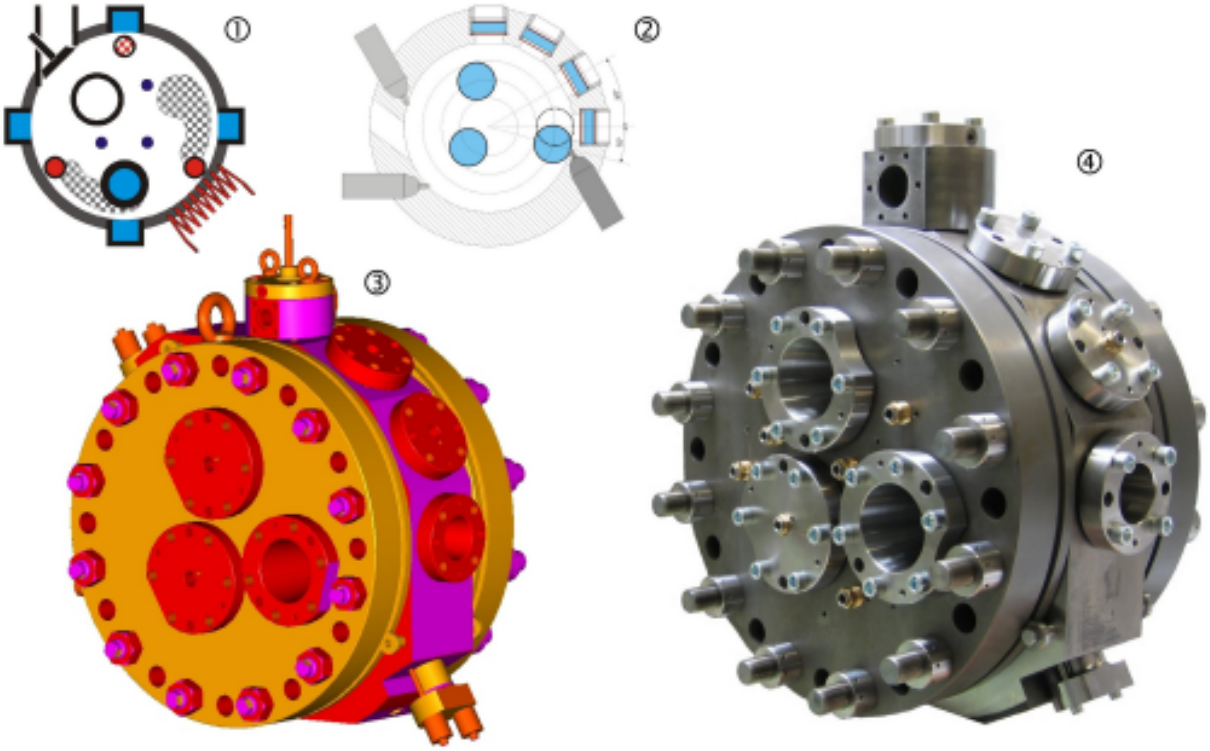
[34] ***8th International Heat Pump Conference***, 30.5. to 3.6.05, Las Vegas, proceedings can be ordered via www.heatpumpcentre.org

[35] ***Internetseite des Forschungsprogramms:*** *www.waermepumpe.ch/fe* Rubrik *Berichte:* Download von Zusammenfassungen und von ausführlichen Schlussberichten durchgeführter Forschungsarbeiten, Rubrik *Publikationen:* Download von Publikationen des Programmleiters.

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN
Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2005

PROGRAMM FEUERUNG UND VERBRENNUNG

Alphons Hintermann
alphons.hintermann@bfe.admin.ch



Experimentelle Daten für grosse 2-Takt-Schiffsdieselmotoren

Im EU-Projekt HERCULES [16] werden neue Technologien für schadstoffemissionsarme Schiffsdiesel-Motoren der Leistungsklasse von mehreren MW pro Zylinder entwickelt. Entsprechend gross sind die von der ETH-Zürich beim Industriepartner Wärtsilä in Winterthur aufgebauten Versuchsträger (3 t Gewicht und 1,5 m Ø) zur Messung relevanter experimenteller Daten. Die Zeit von der ersten Skizze zum fertigen Versuchsträger dauerte 18 Monate (zur Umsetzung vom Plan zum fertigen Produkt s. Bilder 1-4). Gleichzeitig wurde das komplexe System für die Steuerung der gesamten Apparatur und die Datenerfassung der globalen Messgrössen konzipiert und gefertigt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Verbrennungstechnologien werden weltweit noch lange die Energieumwandlungsprozesse dominieren. Der Anteil an Erdöl im Primärenergieverbrauch wird zwar zurückgehen, in absehbarer Zukunft und in zunehmendem Masse aber durch Erdgas, Biomasse, synthetische Brennstoffe (Designer Fuels) und Wasserstoff abgelöst werden. Trotzdem werden fossile Energieträger in den kommenden Dekaden weiterhin einen Grossteil unseres Energiebedarfs abdecken. Auch bei künftig geändertem Brennstoffspektrum werden Effizienzsteigerung und Schadstoffminimierung die zentralen Ziele in der Verbrennungsforschung und der Technologieentwicklung bleiben.

Die internationale Verbrennungsindustrie erarbeitet die notwendigen Grundlagen zur Verbesserung ihrer Produkte immer weniger in den betriebseigenen Forschungslaboratorien und kauft sich dieses Wissen vermehrt von kompetenten Hochschulinstituten ein. Hauptgrund ist die kostenintensive Forschung: Die Löhne einer international kompetitiven und überkritischen Forschergruppe und die Kosten für die notwendigen Arbeitsinstrumente (Verfügbarkeit von Rechenleistung und -Rechencodes sowie der notwendigen Versuchsträger zur Validierung) sind für die Industrie an der Grenze des heute Machbaren.

Mit dem Programm *Verbrennung* ist das BFE seit 1988 bemüht, durch kontinuierliche Unterstützung kompetenter Hochschulgruppen deren Schlagkraft in der Forschung und Attraktivität bei Industriepartnern zu erhöhen. Vor allem an den ETH-Zürich (*Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV), Laboratorium für Thermodynamik in neuen Technologien (LTN), Institut für Fluiddynamik (IFD),* und *Seminar für angewandte Mathematik (SAM)) sowie am PSI* wurden die Grundlagen moderner Verbrennungstechnologien sukzessive erarbeitet, vertieft und zeitverzögert mit unterschiedlichem Erfolg in käufliche Produkte umgesetzt. Seit über einer Dekade leisten diese Institute international anerkannte Beiträge zur simultanen Verbesserung der Energieeffizienz technischer Verbrennungssysteme sowie zur Reduktion deren Emissionen. Die seit Beginn des Programms konsequente **Fokussierung der Forschung auf experimentelle Messtechnik, numerische Simulation und Schadstoffreduktion mit optimaler Energieeffizienz** hat sich bewährt. Modellierung gilt heutzutage bei allen namhaften Technologieentwicklern als der Schlüssel zur Optimierung der Verbrennungstechnologien. Die Fokussierung ist ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsprogramms ***Verbrennung*** gemäss dem ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004-2007*** [38].

Nebst technischen Fortschritten wurden im Berichtsjahr folgende organisatorischen Ziele anvisiert:

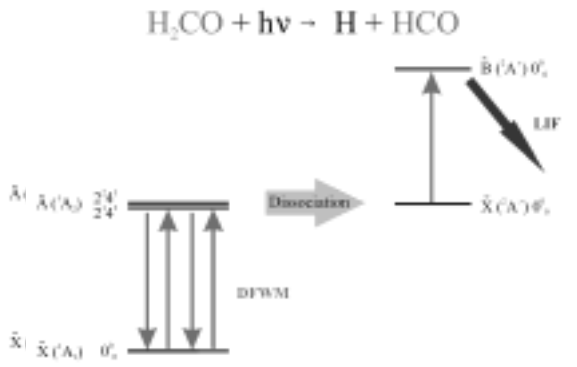
- Verbesserte Integration der Fachhochschulen ins Pogramm und verstärkte Umsetzung von Forschungsergebnissen durch neue KTI-Projekte,
- Inbetriebnahme des neuen Einhubtriebwekes am LAV
- Fertigstellung des Versuchsträgers zum EU-Projekt HERCULES (siehe Titelbild)
- Vernetzung der Aktivitäten der ETH Zürich, PSI und EMPA mit den Fachhochschulen und Verstärkung der Kommunikation des Programms nach aussen durch das *ERCOFTAC Annual Meeting* sowie durch die *SVV-Jahrestagung*.
- Druchführung des IEA-*Taskleader-Meeting* in Zürich

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

OPTISCHE MESSMETHODEN

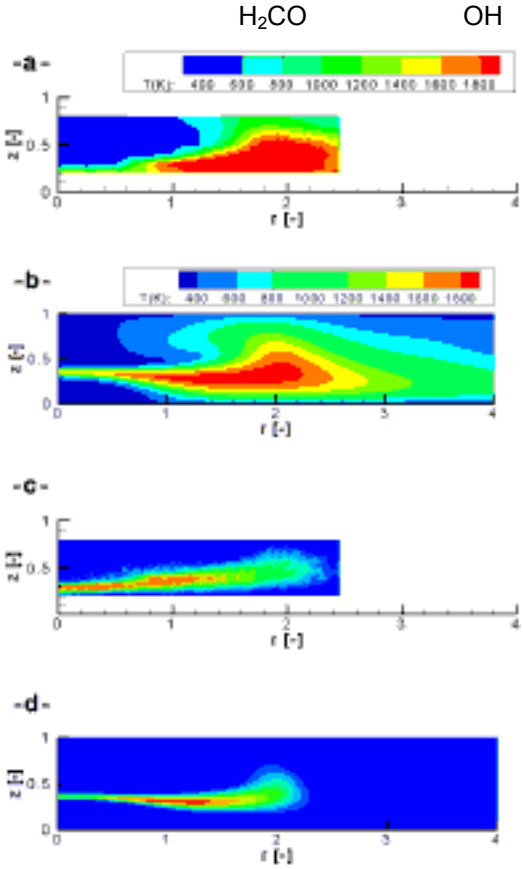
Die Datenbeschaffung für die Validierung von numerisch modellierten Verbrennungsprozessen stellt eine grosse Herausforderung sowohl an die Messmethoden als auch an die Versuchsträger dar. Letztere müssen meist eigens konstruiert werden (siehe Titelbild), um komplexe Vorgänge wie beispielsweise die Brennstoffverdampfung bei der Einspritzung experimentell mit genügender Genauigkeit untersuchen zu können. Optische Messmethoden spielen eine Schlüsselrolle bei der Untersuchung der Grundlagen reaktionskinetischer Verbrennungs-Phänomene. Beispielsweise zeigen OH-PLIF-Messungen, dass die Flammenposition nicht vom Druck in der Brennkammer von Gasturbinen abhängt, obwohl nach chemisch-kinetischen Gesichtspunkten der Gesamt-Reaktionsumsatz – und damit die Flammengeschwindigkeit – mit höherem Druck reduziert werden müsste. Die gewonnenen Resultate lassen sich als Druckunabhängigkeit der turbulenten Flammengeschwindigkeit interpretieren und haben damit wesentliche Implikationen für die zukünftige Auslegung von Gasturbinen-Brennern und -Brenn-kammern, die bei noch höherem Druck (> 30 bar) betrieben werden sollen, als dies heute üblicherweise der Fall ist. Im optimalen Zünden von Verbrennungsgemischen liegt ein wesentliches Potential zur Effizienzsteigerung der Verbrennung und zur Senkung der Emissionen, sowohl bei der motorischen Verbrennung als auch bei der Verbrennung in Gasturbinen. Daher ist es wichtig, die bei der Zündung ablaufenden Prozesse sowohl theoretisch als auch experimentell sehr genau zu analysieren.

Die PSI-Gruppe *Reaktionsanalyse* hat langjährige Erfahrung zur Messung von Reaktionskonstanten wichtiger Zwischenprodukte in Flammen und mit BFE-Mitteln die dazu notwendigen spektroskopischen Methoden entwickelt. Neben Formaldehyd spielen Peroxylradikale eine wesentliche Rolle beim Zünden brennbarer Gemische. Sie bestimmen das Zündverhalten und beeinflussen die Speziation der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung weiterer Reaktionen. Im Projekt ***Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion*** [1] bildet die Untersuchung der Rolle dieser Radikale in einer *kalten* Flamme (< 1000° K) den Fokus. Die vorher entwickelten resonanten, nichtlinearen spektroskopischen Methoden, wie PHOFEX und fs-CARS [23], werden gegenwärtig im Rahmen zweier, vom SNF unterstützen, Dokorarbeiten weiterhin angewendet. Sie werden im Hinblick auf die kommenden Peroxyl-Untersuchungen weiterentwickelt und modifiziert. Für die Darstellung von Peroxylen müssen die Laborinstrumente mit geeigneten Quellen für Radikale ausgerüstet werden. Diese Aufgabe ist nicht theoretisch, sondern nur im Experiment lösbar. Die bisher durchgeführten spektrometrischen Messungen zeigen, dass zwar Alkyl-Radikale in genügend grosser Menge herstellbar sind, wegen Assoziation von O_2 resultierenden Alkylperoxylen jedoch noch nicht beobachtet werden können. Der Nachweis von Alkylperoxylen grösser als CH_3O_2 mag daran scheitern, dass die entsprechenden Ionen evtl. nicht stabil sind und sofort nach der Ionisation dissoziieren (Fig. 1). Nur für die Stabilität des CH_3O_2-Ion gibt es bisher eine experimentelle Evidenz. Für den Nachweis der Peroxylen werden daher noch indirekte massenspektrometrische Methoden (Nachweis der Peroxyl Fragmente) oder spektroskopische Methoden entwickelt werden müssen



Figur 1: *PHOFEX Spektren resultieren durch Scannen von DFWM Laserdaten in spezifischen predissociating vibratorischen Bandspektren von Formaldehyden. Mit simultan messbaren LIF-Daten können Zustandsspezifische Information über den Dissoziationsprozess gewonnen werden.*

Die PSI-Gruppe *Verbrennungsdiagnostik* befasste sich im Projekt ***Quantitative Laser Induced Fluorescence (LIF) in Combustion*** [2] mit der Anwendung von LIF sowohl bei Labor- als auch bei Gasturbinenbrennern. Im Berichtsjahr wurden verschiedene Laser-basierte Methoden zur Messung von komplementären Informationen über Temperatur- und Dichteverteilungen wichtiger Radikale entwickelt. Insbesondere konnten aus eindimensionalen Raman-Streumessungen 2-dimensionale Temperatur- und Radikaldichteverteilungen dargestellt werden. Unabhängig davon wurden am LAV numerische Rechnungen in sehr guter Übereinstimmung (Fig. 2) mit dem Experiment durchgeführt [24, 25].

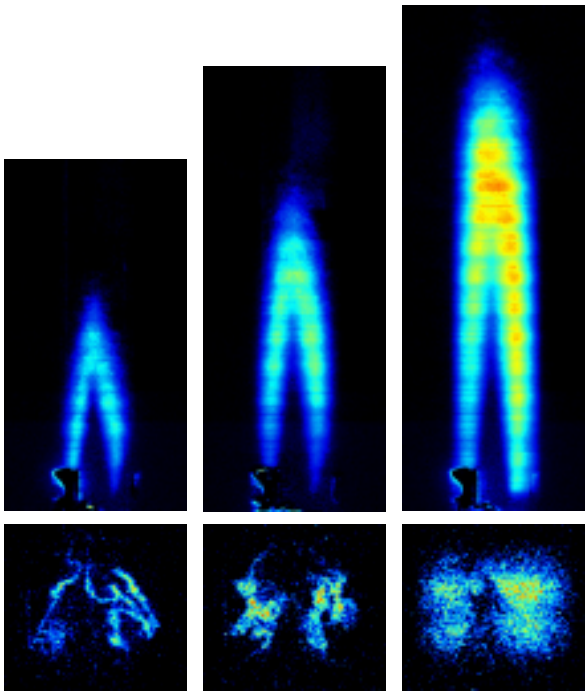


Figur 2: *Vergleich von experimentellen und berechneten Temperaturverteilungen (a, b) und von OH-Radikal-Verteilungen in Wasserstoff/Luft Diffusionsflammen (c,d). (Quelle PSI).*

Die in den Projekten [2] und [3] erarbeiteten experimentellen Grundlagen sind von hoher Relevanz im P+D-Projekt [10] und im KTI-Projekt [17]. Eine weitere Projektaufgabe besteht darin, an einem speziellen Laborbrenner, Gegenstromflammen von Methan/Luft und Wasserstoff/Luft detailliert experimentell zu untersuchen. Die auch für reale Brenner typischen Verhaltensmuster wie Flammenlöschen/-wieder Zünden und Übergänge zwischen verschiedenen Flammenstrukturen werden an den Modell-Flammen ausgemessen

und die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen untersucht. Numerisch berechnete Voraussagen über lokales Auslöschen von Flammen und deren Stabilisierung durch geeignete Massnahmen konnten inzwischen experimentell bestätigt werden. Die sehr enge Zusammenarbeit [32] zwischen den PSI-Experimentatoren und den Modellierern vom LAV der ETH-Zürich ist einer der Erfolgsfaktoren bei dieser Aufgabe.

Die für Flammensimulation von sehr mageren Flammen verwendeten Mechanismen konnten mangels experimenteller Daten noch nicht getestet werden. Im neu gestarteten Projekt ***Laserdiagnostik in sehr mageren Flammen*** [3] sind Laborexperimente geplant, die spezifischen Fragestellungen nachgehen, die bei der Untersuchung von sehr mageren Flammen mit Luftzahlen λ bis zu 2,5 auftreten (Fig. 3).



λ: 1.4 1.8 2.2

Figur 3: *Gemittelte und repräsentative Einzelpuls CH_2O LIF-bilder in einer turbulenten vorgemischten Flamme ($T_{preheat}$ = 773 °K) für verschiedene Luft/Brennstoff Verhältnisse λ.*

Die wichtigsten Zielsetzungen des Projekts sind: Erstens, der Vergleich der Eignung der Minoritätsspezies CH_2O, CHO und CH_3O, und der Majoritätsspezie CO zur Visualisierung der Flammenzone mittels LIF bei magerer bis sehr magerer, turbulenter, vorgemischter Verbrennung. Zweitens, der Aufbau eines laminaren Brenners für vorgemischte Flammen für Luftzahlen deutlich grösser als 1.6, sowie Untersuchungen zur Quantifizierbarkeit von CH_2O LIF Messungen in mageren, laminaren Vormischflammen.

NUMERISCHE SIMULATION VON VERBRENNUNGSPROZESSEN

Das Projekt ***Large Eddy-Simulation(LES) in der turbulenten Verbrennung*** [4] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen Vier ETHZ-Institute: *SAM, IFD, LAV* und *LTNT* arbeiteten an effizienten Rechencodes zur Simulation von turbulenten reaktiven Strömungen und optimierten ihre eigenen Rechencodes. Obwohl die Fortschritte zur Berechnung einzelner Flammen erfolgreich und Validierungen mit experimentellen Daten in guter Übereinstimmung waren, ist zur Zeit ein detaillierter Vergleich der einzelnen Rechencodes untereinander nicht möglich und bedarf noch weiterer Arbeiten.

Direkte numerische Simulation kann sehr detaillierte und genaue Resultate in grosser räumlicher und zeitlicher Auflösung liefern, welche auf andere Weise nur schwer erhalten werden können. Diese Genauigkeit muss allerdings mit einem grossen Rechenaufwand bezahlt werden, welcher die Anwendung von effizienten numerischen Algorithmen und Parallelisierung für Simulationen von Strömungen mit hohen Reynoldszahlen unabdingbar macht. Im Projekt ***Direkte numerische Simulation (DNS) der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen*** [5] wurden die Simulationswerkzeuge des LAV verbessert und den ausgebaut. Die Algorithmen des alten seriellen 2-D/axialsymmetrischen Codes wurden in einen parallelen 3-D Code für nicht reaktive Strömungen implementiert, welcher effiziente Lösungsverfahren verwendet und dessen Rechenleistung auf verschiedenen parallelen Systemen sehr gut mit der Anzahl verwendeter Prozessoren skaliert. Simulationen mit detaillierter Chemie und detaillierten Transporteigenschaften wurden durch die Verknüpfung mit den *Chemkin Bibliotheken* ermöglicht, und ein paralleler Integrator für steife Systeme wurde für die effiziente, implizite Integration der Spezies- und Energieerhaltungsgleichungen in den Code integriert. Dieser parallele Code wird für die Untersuchung von Strömungen in frühen turbulenten Bereich verwendet werden und dient als Basis für die Erweiterungen zur Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation), mit welcher turbulente Flammen modelliert werden können. Was die Anwendungen anbelangt, wurden die Untersuchungen von Verbrennungsinstabilitäten weitergeführt, welche stark von einer Vielzahl von Parametern abhängen und für deren Erklärung und Verständnis eine Kombination von experimentellen und numerischen Resultaten nötig ist. Die seriellen und parallelen Codes wurden für die Simulation der transienten Veränderungen der Flammcharakteristik (Diffusions-/Edgeflamme) in Gegenstrahlbrennern, als auch für die Simulation von zellularen oder pulsierenden Flamminstabilitäten in Jet-Diffusionsflammen nahe der Auslöschung, eingesetzt. Zusätzlich werden momentan mit dem

parallelen Code Simulationen der Interaktion von vorgemischten Flammen unterschiedlicher Dicke mit Turbulenz von unterschiedlicher Intensität und charakteristischer Wirbelgrösse durchgeführt. Die so generierten Resultate werden in die Entwicklung von Modellen für turbulente Verbrennung einfliessen [27,28].

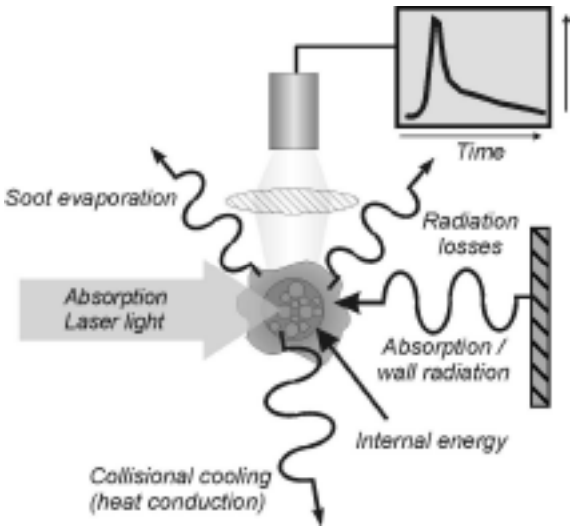
Im Projekt ***Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich*** [6] wird eine neue Annäherung für die rechengestützte Strömungsdynamik im Mikrometer-Skalenbereich hergeleitet. Die Annäherung basiert auf die Entwicklung sogenannten Boltzmann Gitter-Modellen (*Lattice Boltzmann Method*) der Boltzmann kinetischen Gleichung. Sowohl die thermischen, als auch die isothermischen Modellen können dargestellt werden. Im Berichtsjahr wurden:

- Das Modell für mehrphasige Strömungen entwickelt, und für die zwei-komponenten Mischungen von Gasen implementiert und getestet.
- Ein rechnerisch effizientes drei-dimensionales Modell für isotherme Strömungen entwickelt und an mehreren *benchmark*-Problemen getestet. Dieses Modell zeigt numerische Stabilität und ist deshalb sehr wichtig bei hohen Reynoldsche Zahl Simulationen. Durch die speziellen Modifikationen von Randbedingungen) ist es gelungen, effiziente Simulationen in Angriff zu nehmen [29].
- Ein drei-dimensionales thermisches Modell entwickelt und realisiert in einigen Benchmark Strömungen.

Theoretische Fragen sind dabei vollständig geklärt, wie der Herleitung von Lattice Boltzmann Methode aus den molekularen Theorien (Boltzmann kinetischen Gleichung), genauso wie praktische Fragen der effektiven Anwendung. Das mikroskopisch abgeleitete thermische Modell verbessert im Wesentlichen die früheren Ergebnisse der isothermalen Modelle. Diese Modelle ersetzen kostspielige mikroskopische Simulationtechniken wie kinetisches Monte-Carlo und/oder molekulare Dynamik für niedrige Mach- und moderate Knudsen-Zahlen. Damit eröffnen sich Möglichkeiten, Strömungen in Mikrokanälen und porösen Medien effizient zu rechnen, was für zukünftige Komponenten von Energiewandlern (Reformer, Katalysatoren, Mikrobrenner, Brennstoffzellen usw.) von grosser Bedeutung ist.

SCHADSTOFFREDUKTION UND -ASPEKTE

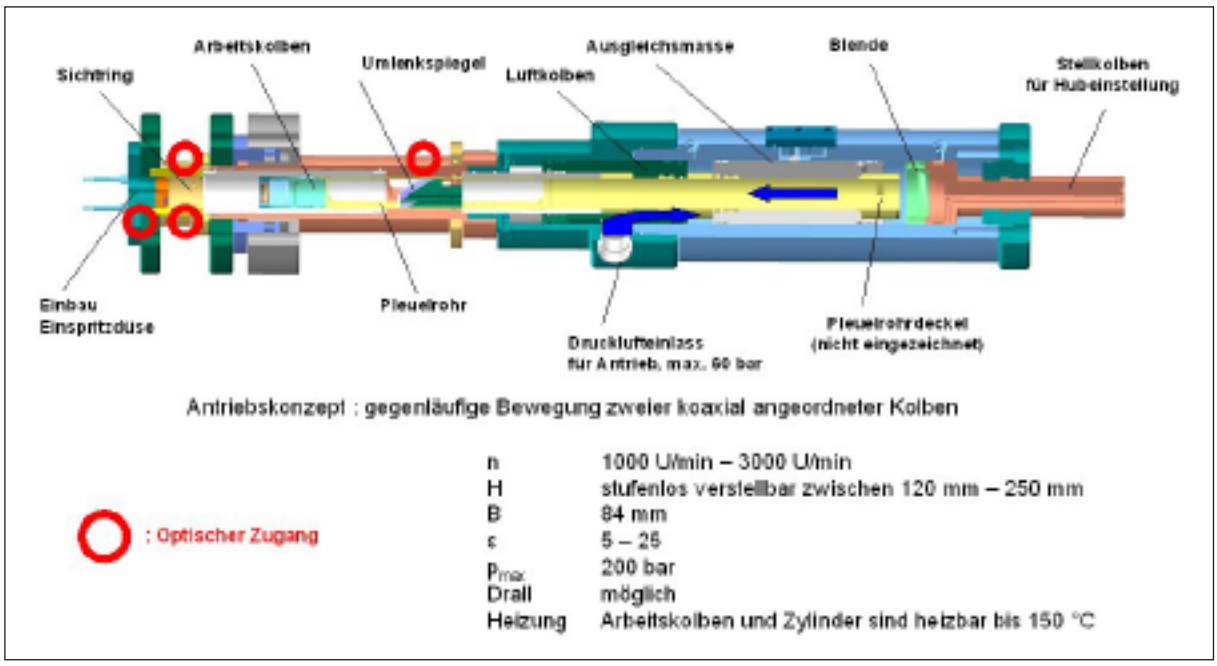
Die Grössenbestimmung der im Dieselmotor erzeugten Russteilchen ist von grossem Interesse für die Charakterisierung des Verbrennungsprozesses bei gegebenen äusseren Betriebsbedingungen (Druck, Temperatur, Brennstoff). In einem Vorgängerprojekt wurde an der Hochtemperatur-/Hochdruckzelle (HTDZ) des PSI ein Experiment zur *in-situ* Teilchengrössenbestimmung sowie zur Zwei-Farben zeitaufgelösten laserinduzierte Inkandeszenz (2-color TIRE-LII), aufgebaut. Im Projekt ***Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressures*** [7] werden experimentelle LII-Signalkurven aus der Hochdruck-Einspritzkammer und einem Dieselmotor zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einspritzbeginn in einem Druckbereich von 0.3-7 MPa wurden bezüglich der Bestimmung mittlerer Teilchenradien und deren Grössenverteilung mittels einer vollständigen *least-squares* Kurvenanpassung und einer *Quick-fi*-Methode ausgewertet. Die ermittelten Teilchenradien zeigen merkliche Unterschiede, je nachdem, welches von 3 in der wissenschaftlichen Literatur zitierten Sub-Modellen zur Beschreibung des Abkühlungsprozesses des Teilchenensembles nach der laser-induzierten Aufheizung Verwendung fand. Die ebenfalls getestete Radienermittlung mit Hilfe der *Quick-fi*-Methode hat sich aufgrund geringer Empfindlichkeit der Abklingzeiten gegenüber externen Parametern als nicht praktikabel erwiesen. Die Ergebnisse stellen



Figur 4: *Energie- und Massenflüsse in einem laser-aufgeheizten Russteilchen-Ensemble und LII-Messprinzip*

einen wichtigen Beitrag zur augenblicklichen Diskussion der LII-Russdiagnostik (Fig. 4) dar, insbesondere in den wenig untersuchten Bereichen der Verbrennung bei hohen Drücken. Die Erfahrungen aus dem Betrieb und der Entwicklung optischer Messverfahren an der HTDZ am PSI kommen in einem Arbeitspaket des EU-Projekts ***HERCULES*** [16] beim anwendungsnahen Prüfstand (Titelbild) der Firma *Wärtsilä* zur Gemischbildung und Verbrennung in 2-Takt-Schiffsdieselmotoren zum Einsatz.

Im Projekt ***Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays***



Figur 5: *Betriebsparameterbereiche des neuen Einhubtriebwerks (EHT)*

mit Verbrennung [8] werden spezifische Experimente durchgeführt, um die Komplexität des Verbren-nungsprozesses und der Emissionen von direkt einspritzenden Dieselmotoren besser zu verstehen. Dazu ist ein gutes Verständnis der Russbildung und -oxidation wesentlich. Diese Vorgänge werden mit bildgebenden (2-D) optischen Methoden in der HTDZ des LAV untersucht. Die Ergebnisse dienen auch zur Validierung von Modellrechnungen, die die Voraussage von Russemissionen erlauben.

Die Experimente zur Untersuchung der Bildung von PM-Emissionen (***Particulate Matter***) wurden unter konstantem Zustand (Druck und Temperatur) des Versuchsträgers durchgeführt, wobei unter konstanten Einspritzzeiten der Einspritzdruck der Common-Rail-Einspritzung variiert wurde. Als optische Verfahren wurde ein auf einer Zweifarbenpyrometrie beruhendes 2-D-Verfahren zur Bestimmung der Russtemperatur und des KL-Faktors (Mass für den Russ-Volumenanteil) sowie die *Back Diffused* Laser Technik (BDL) zur Bestimmung des Russ-Volumenanteils eingesetzt. Im Vergleich ergibt das BDL-Verfahren einen höheren Russ-Volumen-Anteil als der pyrometrisch bestimmte KL-Faktor. Dies ist dadurch zu erklären, dass mit der Pyrometrie nur der heisse leuchtende Anteil des Russes erfasst wird, während mit dem BDL-Verfahren auch kältere nicht leuchtende Anteile einbezogen werden.

Durch Auswerten von gemessenen Verbrennungsdrücken und optischen Signalen wurde der Zündverzug bestimmt. Messungen bei 40 bar Zellendruck, 790 K Zellentemperatur und 3 ms Einspritzzeit zeigen mit steigendem Einspritzdruck (500 bar, 1000 bar, 1300 bar) einen abnehmenden Zündverzug und abnehmenden KL-Faktor wobei die Russtemperatur zunimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei steigendem Einspritzdruck der Brennstoff besser zerstäubt und schneller und intensiver mit Luft vermischt wird, was sich auch durch einen höheren Anteil der vorgemischten Verbrennung zeigt.

Das Projekt ***Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeits-Prozesse*** [9] wurde durch die Deutsche Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) und dem BFE finanziert. Es hat auf dem Gebiet der Simulation zur Erstellung von chemischen, reduzierten Reaktionsmechanismen von stochastischen Mehrzonenmodellen und zur Kopplung der reduzierten Chemie mit dreidimensionalen-reaktiven-fluid-mechanischen Simulation geführt. Diese Modelle ermöglichen die Einsicht in den Brennraum, um Verbrennungsphänomene für neue Brennverfahren verstehen zu können. Die verwendeten Reaktionsmechanismen repräsentieren die Chemie zweier Kraftstoffe. Der erste, n-Heptan, hat dieselähnliche Zünd- und Verbrennungseigenschaften. Der zweite, n-Butan, hat Zünd- und Verbrennungseigenschaften zwischen Benzin und Diesel. Dies ermöglicht die Untersuchung von technischen Möglichkeiten mit alternativen Kraftstoffen. Die reduzierte Chemie wurde anhand von detaillierten Reaktionsmechanismen validiert und zeigte trotz ihrer Vereinfachung eine sehr gute Übereinstimmung. Die Verbrennungsmodelle wurden mit Messungen von der Universität Stuttgart und der Fachhochschule Dresden validiert und zeigten ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Parallel zu den numerischen

Arbeiten [30] wurden experimentelle Untersuchungen am Ein hubtriebwerk durchgeführt. Nach aufwändigen Modifikationen im ersten Berichtshalbjahr konnte mit dem EHT, welches seit August 2004 am Institut im Einsatz steht, ein Prüfstand realisiert werden, um unter definierten Bedingungen von T, p und λ sowie qualitativ abhängig vom Homogenisierungsgrad, Zündzeitpunkte sowie Zündorte zu bestimmen (Fig. 5).

Zahlreiche Versuche mit n-Butan, n-Heptan und Dieselkraftstoff konnten durchgeführt werden. Messungen mit n-Heptan (dieselähnlich) zeigten einen Beginn der Wärmeumsetzung unabhängig vom Verbrennungsluftverhältnis. Allerdings spielt der Homogenisierungsgrad, resp. der Einspritzzeitpunkt eine entscheidende Rolle. Der direkte Vergleich von Messungen mit konventionellem Dieselkraftstoff und n-Heptan zeigt, dass der Zustand im Brennraum bei Beginn der Wärmeumsetzung praktisch identisch ist. Die unterschiedlichen Verdampfungseigenschaften führen zu einem tieferen Umsetzungsgrad bei Dieselkraftstoff. Mittels der schnellen CMOS High-Speed Kamera konnten Aufnahmen der OH- und CH-Chemilumineszenz realisiert werden. Als grosser Erfolg und als Auszeichnung für die bisherige geleistete Arbeit kann die vom LAV gewonnene FVV-Ausschreibung für das Projekte ***Homogene Dieselverbrennung*** gewertet werden.

Nationale Zusammenarbeit

Die zur Realisierung von Null-Emissions-Verbrennungssystemen notwendige Grundlagenforschung [1 - 9] kann nur an Hochschulen erarbeitet werden. Das LAV und das LTNT der ETH-*Zürich,* das PSI und die EMPA nehmen hier – nicht zuletzt dank enger Zusammenarbeit und gemeinsam ausgelegten Prüfständen – eine internationale Spitzenposition ein. In enger Zusammenarbeit dieser Institutionen mit Motorenherstellern in der Schweiz (*Liebherr Machines SA, Iveco* und *Wärtsilä NSD*) sowie mit dem Gasturbinenhersteller *ALSTOM POWER* wird in KTI- und EU-Projekten eine rasche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis gewährleistet. Insbesondere wurde, mit Einbezug der CORE und im Hinblick auf eine mögliche Stromversorgungslücke nach Schliessung von zwei Kernkraftwerken um das Jahr 2020, das neue Programm ***Kraftwerk2020*** konzipiert. Es soll im Jahr 2006 operativ werden.

Die umsetzungsnahen **KTI-Projekte** profitieren von den BFE-Vorleistungen an den Hochschulen. Im Projekt ***Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brenner*** [17] wurde mit zweidimensionaler laserinduzierter Fluoreszenz und Chemilumineszenz angewendet, um Verbrennungsinstabilitäten in kommerziellen Gasturbinenbrennern zu untersuchen. Nachgewiesen wurde, dass die Brennstoffkonzentration durch die Fluktuation des Schalldrucks moduliert ist. Damit konnte ein Rückkoppelungsmechanismus identifiziert werden, der zu thermoakustischen Instabilitäten in Gasturbinenbrennern führt. Diese Erkenntnisse werden zur Verbesserung der laufenden Generation von *Alstom*-Gasturbinen dienen. Im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen wurde das Projekt ***Grundlagen der H_2-Reformat-Zumischung am Ottomotor*** [18]. Hier erarbeiten die FH-Biel, das LAV und der Industrie-Partner *Robert Bosch GmbH* Beiträge zur weiteren Absenkung der Emissionen sowie zur Erhöhung des Wirkungsgrades im Teillastbereich.

Die Zusammenarbeit der Hochschulinstitute mit Fachhochschulen durch KTI-Projekte intensivierte sich im Berichtsjahr. Die EMPA entwickelt im Projekt ***Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner*** [20] langzeitstabile Materialien, die beim Industriepartner umgesetzt werden. Das Projekt ist Teil einer umfassenden Zusammenarbeit der EMPA mit einem deutschen Konsortium. Mit Einbezug der ETHZ und ETHL entwickelt die FHBB im KTI/FEV-Vorhaben ***CATVAP-Burner*** [21] neue Katalysatoren für den Einsatz der CATVAP-Technik in Öl- und Gasbrennern, die später vom Industriepartner gefertigt und in seinen Brennern eingesetzt werden sollen.

Im neuen KTI-Projekt ***Weiterentwicklung des Pluto-Brenners als Sturzbrenner in der Heizunit ThermMix®*** [22] arbeiten die Fachhochschule NW Schweiz in Muttenz und das LTNT eng mit der Firma *Toby AG* in Solothurn, zusammen. Der *Pluto-Brenner*, ein Ölverdampfungsbrenner im Leistungsbereich 5 - 15 kW, mit guten Marktchancen, soll punkto Schadstoffemissionen weiter verbessert werden. Die Modellierungserfahrungen des LTNT sollen dabei direkt in die Entwicklungsschritte des *Pluto-Brenners* einfliessen und die notwendigen Schritte in Richtung billigerer Produktion einleiten.

Im Projekt ***Sticore*** der Firma *awtec* geht es um die Entwicklung einer Stirling-Maschine für den Betrieb mit Erdgas und Heizöl. Das BFE finanzierte im Berichtsjahr das Teilprojekt ***Brennerentwicklung Öl & Gas*** [23]. Nach einer breiten Suche nach möglichen Brennertechnologien, die die sehr spezifischen Anforderungen für den Einsatz bei Stirling Motoren erfüllen können, wurde ein Vorverdampfungsbrenner und ein Porenbrenner für eine detaillierte Konzeptstudie ausgewählt und wichtige Hinweise für die Thermodynamik, Dimensionierung und Konstruktion des Brenners erarbeitet.

Der Vernetzung von Hochschulforschung mit den Fachhochschulen und der Privatwirtschaft diente

die Tagung des ***Schweizerischen Vereins für Verbrennungsforschung (SVV)*** vom 30. September 2005 die unter dem Motto ***Anwendungsorientierte Verbrennungs-Forschung in der Schweiz*** [35] an der Fachhochschule beider Basel in *Muttenz* abgehalten wurde.

Internationale Zusammenarbeit

Das Jahrestreffen der ***European Research Community on Flow Turbulence and Combustion*** *(ER-COFTAC)* und des *Leonhard Euler Kompetenzzentrums für Messtechnik, Verbrennung und Schadstoffformation* wurde am 30. September 2005 an der Fachhochschule beider Basel in *Muttenz* zu den Themen: *Combustion and Pollutant Formation* und *Measurement & Modelling Techniques* abgehalten.

Bezüglich Zusammenarbeit innerhalb des IEA-*Implementing Agreements* ***Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion*** www.im.na.cnr.it/IEA/ sind Fortschritte zu verzeichnen. Verschiedene Experten-Untergruppen treffen sich seit einiger Zeit jeweils im Februar in Sarasota (USA), um gemeinsame Ziele und Aufgaben zu definieren. Seit 2004 ist der neue, kollaborative Tasks *Advanced hydrogen fueled internal combustion engines* (mit CH-Beteiligung) aktiv und weitere sind in Vorbereitung. Das jährliche *Task Leaders Meeting* [36] wurde von LAV und PSI organisiert und fand vom 18. – 21. September in Zürich statt. Am ExCo vom 21. September wurde vom LAV und dem PSI eine Initiative für einen neuen kollaborativen Task mit Titel *Sprays in Combustion* eingebracht.

Stetig zunehmend ist die Teilnehmerzahl der seit 1997 jährlich an der ETHZ abgehaltenen, u.a. vom BFE und BAW unterstützten 9. ETH-Konferenz *über Combustion generated Nanoparticles* [37]. Rund 300 Teilnehmer aus Europa, Nordamerika und dem fernen Osten tauschten vom 15.–17. August 2005 Erfahrungen und neues Wissen zu Russpartikeln und Feinstaubemissionen aus Verbrennungsprozessen aus. Hauptthemen waren Kontrolle der Feinstäube während der Verbrennung, Partikelfilter, Auswirkungen von Feinstäuben auf die Gesundheit und zum Weltklima.

Das BFE unterstützte das von Universität Basel und dem PSI organisierte, am 4.-9. September 2005 durchgeführte *28th International Symposium on Free Radicals.* Gemäss Rückmeldungen war das von rund 150 Forschern aus der ganzen Welt ein voller Erfolg und machte die Arbeiten des PSI [1, 23] in der internationalen Forschergemeinde besser bekannt.

Die Brennstoffe der Zukunft waren Hauptthema der von der EMPA vom 7. – 8. November 2005 durchgeführten internationalen Konferenz über *Low Carbon Fuels, Methane and Hydrogen based Mobility*.

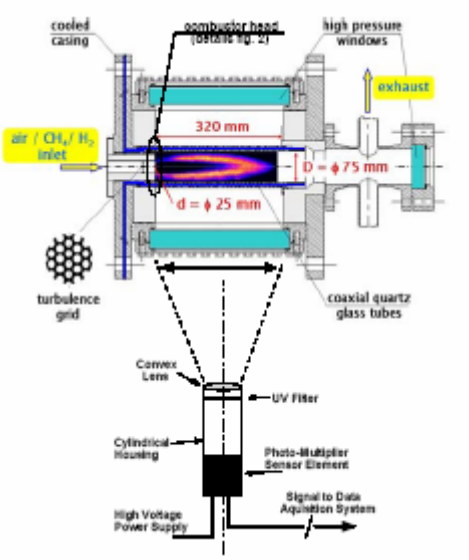
Im EU-Projekt ***HERCULES*** (**H**igh **E**fficiency **R**&D on **C**ombustion with **U**ltra **L**ow **E**missions for **S**hips) [16] werden neue Technologien in Bezug auf Schiffsmotoren entwickelt. Schweizer Partner sind *Wärtsilä/CH*, *ABB Turbosystems,* das LAV, das PSI und die EMPA. Das LAV befasst sich mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für dessen Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Mit Unterstützung des LAV und des PSI wurde bei *Wärtsilä Schweiz* ein Versuchsstand (siehe Titelbild) aufgebaut, mit welchem relevante Bedingungen des Verbrennungssystems grosser Zweitakt-Schiffsdieselmotoren experimentell realisiert werden können. Die kritischen Komponenten wurden zusätzlich verschiedenen Prüfungen (Zugversuche, Risse) unterworfen. Zusätzlich wurden der Kompressor, das Druckspeichersystem, das Einspritzsystem sowie das Laborgebäude definitiv ausgelegt. Ferner wurde das komplexe System für die Steuerung der gesamten Apparatur und die Datenerfassung der globalen Messgrössen konzipiert.

Ausserhalb der hier beschriebenen Projekte arbeiten die erwähnten Institutionen im ETH-Bereich intensiv mit ausländischen Unternehmen zusammen. Es bestehen gemeinsame Projekte mit *GM, VW, Opel, Renault, ALV*, *Iveco* und der *Forschungs-Vereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.* in Deutschland.

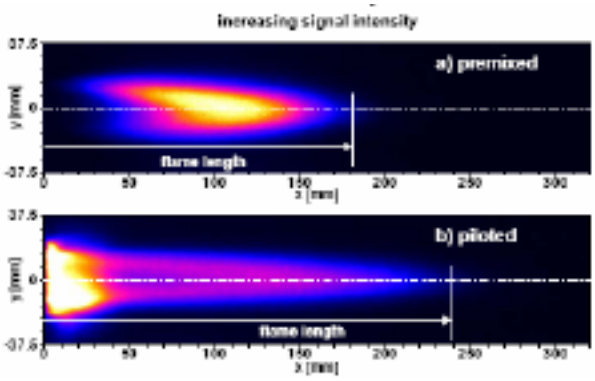
Pilot- und Demonstrationsprojekte

Eine der grössten Herausforderungen für die weltweite Verbrennungsforschung auf dem Gebiet der turbulenten Vormischflammen ist das Verständnis und die quantitative Beschreibung der Turbulenz-Chemie-Wechselwirkung. Im Projekt ***Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten vorgemischten Hochdruckflammen*** [10] ist vor allem die Interaktion von Turbulenz und chemischer Reaktion bei den spezifischen Betriebsbedingungen einer stationären Gasturbinenbrennkammer von Interesse. Nachdem in den Vorjahren vor allem Messungen zur Charakterisierung des turbulenten Strömungsfeldes und der Flammenstruktur (Position und Fluktuation der Flammenfront, tur-

bulente Flammengeschwindigkeit) von CH_4/Luft-Flammen [31, 32] durchgeführt wurden, standen im Berichtsjahr die Bestimmung der mageren Löschgrenzen und der NO_x-Emission von mit Wasserstoff angereicherten CH_4/Luft-Flammen im Vordergrund (Fig. 6). In der Hochdruck-Brennkammer wurden Messungen für verschiedene Betriebsbedingungen (Vorwärmtemperaturen 673 °K und 773 °K, Drücke bis 14 bar, Eintrittsgeschwindigkeiten 30-80 m/s) und verschiedenen Turbulenzbedingungen (Turbulenzgitter) durchgeführt.



Figur 6a: *Hochdruck-Brennkammer (Skizze, Horizontalschnitt) und „Flammensensor".*

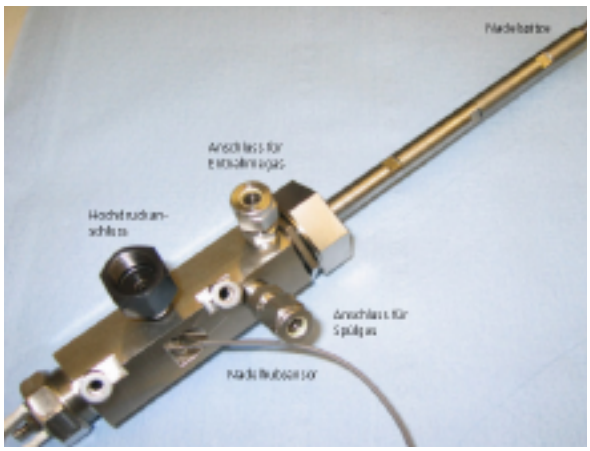


Figur 6b: *Vergleich typischer Flammenformen bei H2-Vormischung und Pilotierung in der Hochdruck-Brennkammer*

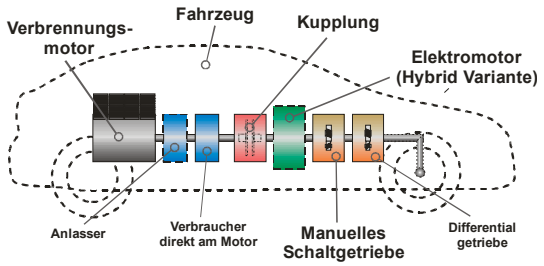
Diese experimentellen Daten sind für die Validierung numerischer Flammenfrontmodelle, die künftig zur Auslegung industrieller Gasturbinen mit höherem Gesamtwirkungsgrad und tieferen Emissionen eingesetzt werden sollen, von grosser Bedeutung. Die Ergebnisse sollen mit zu einer weiteren Optimierung der mageren Vormischverbrennung für stationäre Gasturbinen im Hinblick auf eine Erweiterung des Stabilitätsbereichs (magere Löschgrenze)und geringere Emissionen beitragen. Grössere turbulente Flammengeschwindigkeiten werden durch die Beimischung von H_2 simuliert. Diese Brennstoffgemische können als Repräsentanten zukünftiger Bio-Brennstoffe angesehen werden, bei denen im Hinblick auf die CO_2-Problematik ein höheres H/C-Verhältnis angestrebt wird. Sie sind für die Verbrennung in stationären Gasturbinen von grosser Bedeutung, da in Zukunft Erdgasqualitäten mit einem höheren Anteil an höheren Kohlenwasserstoffen (Propan, etc.) aufgrund anderer Förderquellen an Bedeutung gewinnen werden und die sichere, emissionsarme Verbrennung auch für diese Brennstoffe garantiert werden muss.

Die Arbeiten im Projekt ***Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Diesel-Motoren zur Erfüllung zukünftiger Emmissionsvorschriften bei niedrigem CO2-Ausstoss*** [11] umfassten die Fertigstellung des Gasentnahme Ventils (Fig. 7) und der 3D-Simulation des Versuchsmotors inkl. Russberechnung sowie der Planung und Vorbereitung des Aufbaus von Probenahme und Aufbereitung für die Partikelcharakterisierung. Der neue *LIEBHERR* Vierzylinder Motor mit Vierventilkopf wird voraussichtlich anfangs 2006 am Labor eintreffen und der Prüfstand aufgebaut. Es soll eine Bestandesaufnahme gemacht werden, welche das Potential des für die Tier 3 Abgasnorm zertifizierten Motors bezüglich der kommenden Norm Tier 4 darstellen soll. Wegen der Lieferverzögerung des D934 DI-Dieselmotors mit Vierventiltechnik, wurde für den vorhandenen *LIEBHERR* D924 DI-Dieselmotor mit Zweiventilkopf ein 3-D Simulationsmodell entwickelt und validiert. Einige Betriebspunkte wurden erfolgreich simuliert. Zusammen mit den Ergebnissen der Russberechnung an einem Projektfremden Motor werden demnächst gute Resultate der Betriebspunkte inklusive Russbildungsverlauf und –verteilung erwartet. Die Vorbereitungen der Partikelmesstechnik sind abgeschlossen. Es wurden Erfahrungen mit der Analyse von Partikeln aus anderen Motoren gesammelt. Weiter wurde ein Programm für die Datenerfassung erstellt und erfolgreich getestet. Im Bereich der Messtechnik und Abgasanalytik wird eng mit der EMPA zusammengearbeitet.

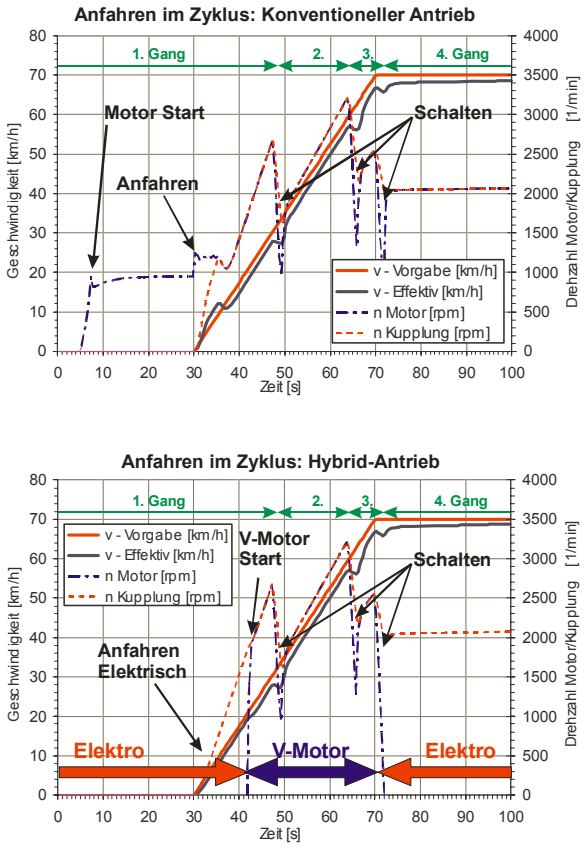
Das Ziel des Projekts ***Massnahmen zur Reduktion der CO_2-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus*** [12] besteht in der Auslegung eines teillastoptimierten Antriebs für PKW-Anwen-dungen mittels ausgeklügelter Simulation. Dabei rücken vermehrt Konzepte in den Vordergrund, die einen starken Elektrifizierungsgrad in Kombination mit einem entsprechend konfigurierten Verbrennungsmotor aufweisen. Im Berichtjahr ist es gelungen, das Grundgerüst des neuen auf Matlab/Simu-link beruhenden Modells zu vervollständigen und erste Ergebnisse für ein übliches



Figur 7: Zusammengebautes Gasentnahme Ventil



Figur 8: Untersuchtes Fahrzeugmodell und Komponenten

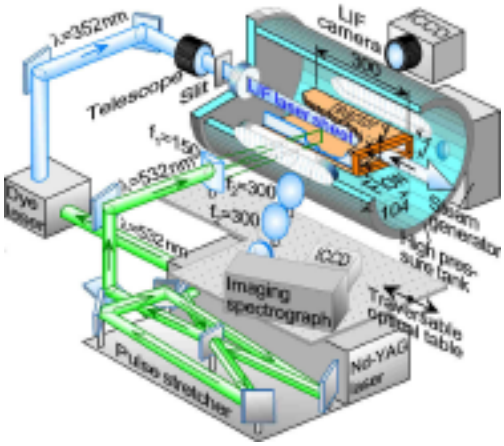


Figur 9: Anfahren und Gänge schalten. Ausgezogene Linien: Soll- und Ist-Fahrzeug-Geschwindigkeit, Gestrichelte Linien: Drehzahlen des Motors und der Kupplung (Getriebeseite), beim Hybrid entspricht dies der Elektromotordrehzahl

Fahrzeug (Fig. 8) im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) zu präsentieren. In guter Übereinstimmung mit – zur Zeit in der Literatur spärlich vorhandenen Messdaten – konnte mit einem *Mild-Hybri*-Antrieb gegenüber dem herkömmlichen Verbrennungsmotor-Antrieb ein Verbrauchsvorteil im NEFZ von knapp 25% errechnet werden (Fig. 9).

Der Nutzen des neuen Modells kann erst dann voll ausgeschöpft werden, wenn zusätzliche Komponenten und deren dynamisches und thermisches Verhalten (z.B. Abgaskatalysatoren) in der Struktur der Software berücksichtigt werden. Um diese Erweiterung vorzunehmen und umfangreiche Simulationsfälle durchzurechnen, so dass das CO_2-Reduktionspotential diverser Massnahmen zuverlässig und vergleichend abgeschätzt werden kann, wird noch ein halbes Jahr beanspruchen.

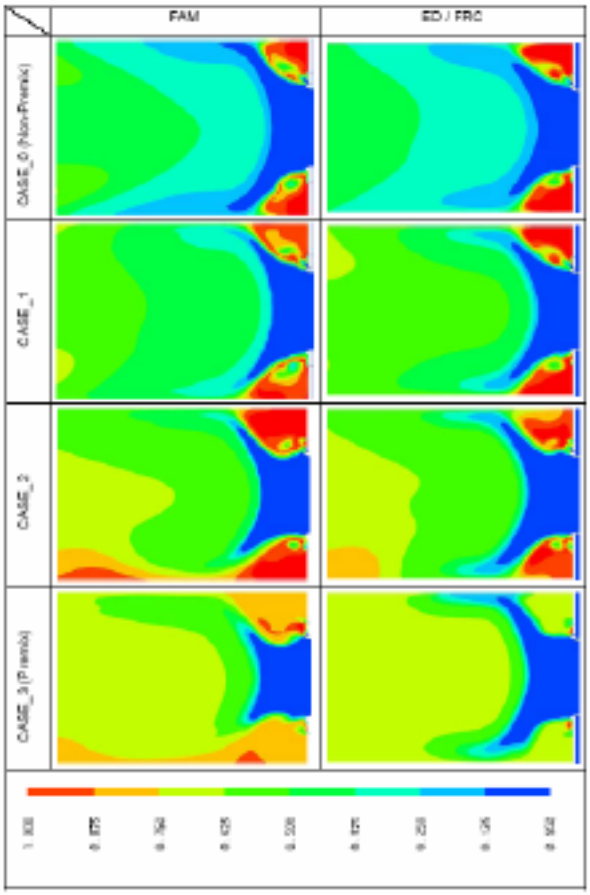
Verbrennungssysteme der neuesten Generation mit tiefen Emissionswerten und hoher Brennstoffnutzung werden durch ein kombiniertes Konzept der zwei Hauptverbrennungskategorien Diffusions- und Vorgemischte Verbrennung realisiert, welches teilvorgemischte Verbrennung genannt wird. Die heute gängigen Verbrennungsmodelle sind nicht in der Lage, den Grenzbereich zwischen Diffusions- und teilvorgemischter Verbrennung vernünftig abzubilden. Ziel des Projektes ***Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom***



Figur 10: Schema des Reaktors und optischem Set up für die LIF-/Raman-Messungen

EV-Brenner [13] ist die Weiterentwicklung des vorhandenen instationären Flamelet-Modells, um diesen interessanten Zwischenbereich besser zu simulieren. Im Berichtsjahr wurde der neue Ansatz *Flame Age Model* (FAM) mit einer besser definierten transienten Zeitkonstante entwickelt und gegen die experimentellen Daten von einer hochturbulenten Flamme in einem Reaktor (Fig. 10)

geprüft [33]. Während eines Praktikums bei Firma *ALSTOM*, wurde FAM verwendet um die Flamme des neuen *ALSTOM* Brenners zu berechnen. Die Simulationsresultate (Fig. 11) zeigten dass, der neue FAM eine grosse Elastizität aufweist. FAM kann nun — neben Diffusionsflammen — auch teilvorgemischte und gemischte Verbrennungsprozesse vernünftig simulieren.



Figur 11: *Temperaturverteilungen in der Verbrennungskammer einer ALSTOM Gasturbine*

Im Projekt ***Partial Catalytic Oxidation of CH_4 to Synthesis Gas for Power Generation Application*** [14] wird den Entwicklungstrends nachgegangen, mittels neuer Brennverfahren noch geringere Emissionen (NO_x < 10ppm) und höhere Wirkungsgrade (η > 60%) zu erreichen. Viel versprechende Alternativen stellen katalytisch unterstützte Verbrennungsverfahren dar, die auf grundsätzlich neuen Brennstoff-Umwandlungsverfahren basieren. Die partielle katalytische Oxidation (PCO) von Methan zu Synthesegas (H_2 und CO) wurde unter gasturbinen-relevanten Bedingungen untersucht. An der experimentellen Front wurden die Laser induzierte Fluoreszenz (LIF) des Formaldehyd Moleküls zur Bestimmung der Gasphasenzündung im optisch zugänglichen katalytischen mit Rh/ZrO_2 beschichteten Kanalströmungsreaktor [34] angewandt. In Kombination mit in-situ Raman Messungen (Fig. 11) und detaillierten numerischen Berechnungen wurden durch die LIF Daten hetero-/homogene Reaktionsschemata für Drücke bis 10 bar validiert. Die validierten Schemata wurden anschliessend benutzt um den chemischen Einfluss von H_2O und CO_2 (die Abgasrückführung darstellen) auf die PCO zu beleuchten. Es wurde herausgefunden, dass H_2O eine Quelle für Sauerstoff und das Hydroxyl Radikal auf der Katalysatoroberfläche darstellt und dadurch die Methan Konvertierung und die Wasserstoff Selektivität erhöht sowie die CO-Selektivität senkt. Ferner wurde gezeigt, dass durch Abgasrückführung die Oberflächentemperaturen auf 1150 °K gehalten werden konnten, was für den Katalysator /Reaktor erträglich ist, obwohl um 200 °K überadiabatische Temperaturen erreicht wurden. Ferner wurden am Reaktor Ausgang bis zu 19%vol Wasserstoff erreicht, was den Vorteil der erhöhten Wasserstoff Selektivität durch Abgasrückführung demonstriert. Mit seiner PCO-Fachkompetenz nimmt das PSI zusammen mit 10 europäischen Partnern am **EU-Projekt *Advanced Zero Emission Power*** teil.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

In den beschriebenen Projekten haben die Forscher und ihre Kooperationspartner wie bisher sehr gute Arbeit geleistet und ihre Fachkompetenz national wie auch international unter Beweis gestellt. Dank erfolgreich eingereichter KTI- und EU-Projekte konnte die Umsetzung der Forschungsresultate mit Partnern aus der Industrie fortgesetzt werden. Verzögerungen gab es beim Erstellen des Versuchsträgers im Projekt HERCULES [16], die jedoch in den ersten Monaten 2006 aufgeholt werden können. Bei verschiedenen LAV-Projekten wurde eine Projektverlängerung ohne Kostenfolge beantragt. Insgesamt verliefen die Aktivitäten 2006 im Programm *Verbrennung* gemäss dem ***Energieforschungskonzept 2004 – 2007***.

Die mit BFE-Mitteln seit 1989 kontinuierlich unterstützte Erforschung der Harnstoff-SCR konnte nach Abschluss des Projekts ***NOx-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR*** [17] erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden. Zusammen mit dem Institut für Regeltechnik der ETH-Zürich wurde ein Harnstoff-SCR-Gerät minimalster Grösse entwickelt, das in jeder Phase der Autofahrt die Harnstofflösung exakt dosiert und so mehr als 90% der Stickoxide in den Abgasen unschädlich macht. Diese Leistung wurde mit einem Preis im Rahmen des ***Swiss Technology Award 2005*** ausgezeichnet.

Trotz vollem Bestellbuch, vorhandener BHKW-Spitzentechnologie und dem im Januar 2005 er-

haltenen Innovationspreis beider Basel drohte der *MENAG* im Berichtsjahr die Liquidation und auch Ende 2005 war die Lage noch nicht geklärt. Kernstück des von der MENAG umgesetzten BHKWs ist der mit BFE-Mitteln vom LAV der ETH Zürich entwickelte Swissmotor mit Abgasrückführung (AGR). Der Swissmotor brillierte mit Weltrekorden sowohl punkto Leistung als auch mit minimalen Abgaswerten.

Infolge der zeitlich verzögerten Einführung des neuen, für alle Ämter gültigen neuen Webauftritt des Bundes musste der geplante Webauftritt des Programms *Verbrennung* auf das Jahr 2006 verschoben werden.

Das neue Programm *Kraftwerk2020* wurde initiiert. Es wird neben Teilen des bestehenden Programms Verbrennung auch nicht direkt verbrennungsrelevante Aspekte umfassen.

Der langjährige Prozess, die Fachhochschulen untereinander und mit den Aktivitäten der Hochschul-Institute zu vernetzen, hat im Berichtsjahr weitere Fortschritte gemacht. Um die Chancen einer Vernetzung zu erhöhen, sollte der bisher anvisierte Bereich der Fachhochschulinstitute vergrössert und auf verbrennungsrelevante Material- oder Komponentenforschung ausgedehnt werden. Dies wird im Programm *Kraftwerk2020* vermehrt der Fall sein.

Für 2006 liegt der organisatorische Fokus des Programms Verbrennung auf folgenden Punkten:

- Übergabe des Programms an die neuen Programmleiter und Abgrenzung gegenüber dem neuen Programm *Kraftwerk 2020*
- Ausarbeiten von Perspektiven bis Mitte 2006, Formulierung und Absprache mit der CORE von Inhalten zum *Energieforschungskonzept 2008–11*.
- Weiteres Verbessern Integration der Fachhochschulen ins Programm.
- Realisierung der Webseite des Programms *Feuerung und Verbrennung* im BFE-Internet.
- Die gut abgestimmte Förderung von BFE, KTI und Industrie [10-22] soll weiterhin verstärkt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] T. Gerber et al., (thomas.gerber@psi.ch) PSI *Villigen:* ***Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion*** (JB).

[2] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al. PSI *Villigen:* ***Quantitative Laser Induced Fluorescence in Combustion*** (SB).

[3] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et. al. PSI *Villigen:* ***Laserdiagnostik in sehr mageren Flammen*** (JB).

[4] M. Küng (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch) et al., ETH *Zürich:* ***Large Eddy-Simulation in der turbulenten Verbrennung*** (SB).

[5] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH *Zürich:* ***Direkte numerische Simulation der Verbrennung bei höheren Reynoldszahlen*** (SB).

[6] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH *Zürich:* ***Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich*** (JB).

[7] T. Gerber (thomas.gerber@psi.ch) et al. PSI *Villigen:* ***Two dimensional quantification of soot and flame-soot interaction in spray combustion at elevated pressure*** (JB).

[8] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH *Zürich:* ***Entwicklung und Validierung verbesserter Teil-Modelle für transiente Sprays mit Verbrennung*** (JB).

[9] G. Barroso und K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch) et al., LAV/ETH Zürich: ***Erarbeiten von Grundlagen für innovative Brennverfahren und motorische Arbeitsprozesse*** (SB).

Liste der P+D-Projekte

[10] P. Griebel (peter.griebel@psi.ch), PSI *Villigen:* ***Struktur- und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruckflammen*** (JB).

[11] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH *Zürich:* Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emmissionsvorschriften bei niedrigem CO2-Ausstoss (JB).

[12] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH *Zürich:* ***Massnahmen zur Reduktion der CO2-Emissionen von PKW-Antrieben im realen Fahrzyklus*** (JB).

[13] J. Gass (juerg.gass@ethz.ch) et al. LTNT/ETH *Zürich:* Optimierung der Brennstoffstufung im Alstom EV-Brenner.

[14] I. Mantzaras (ioannis.mantzaras@psi.ch) et al. PSI *Villigen:* Partial Catalytic Oxidation of CH4 to Synthesis Gas for Power Generation Application (JB).

[15] M. Koebel (manfred.koebel@psi.ch), PSI *Villigen:* ***NOx-Verminderung bei mobilen Dieselmotoren mittels Harnstoff-SCR*** (SB2003).

[16] K. Hermann (hermann@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH *Zürich:* ***HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber*** (JB).

[17] W. Hubschmid (walter.hubschmid@psi.ch) et al. PSI *Villigen:* ***Thermoakustische Phänomene und 2-D Temperatur- und Speziesverteilungen in kommerziellen Gasturbinen-Brennern.***

[18] J. Czerwinski, (jan.czerwinski@hta-bi.bfh.ch), HTA *Biel*: ***Grundlagen der H_2-Reformat Zumischung am Ottomotor.***

[19] A.Schlegel (andreas.schlegel@awtec.ch) awtec *Zürich:* ***Brennerentwicklung Öl & Gas*** (SB)

[20] U. Vogt (ulrich.vogt@empa.ch), EMPA- *Dübendorf* ***Schaumkeramik für neuartige keramische Porenbrenner***

[21] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, *Basel:* ***CATVAP-Burner.***

[22] P. von Böckh (p.vonboeckh@fhbb.ch), FHBB, *Basel:* ***Weiterentwicklung des Pluto-Brenners als Sturzbrenner in der Heizunit ThermMix®.***

Referenzen

[23] M Tulej, et. al.: ***Photo-fragment excitation spectroscopy (PHOFEX) by DFWM and LIF: propensities for H2CO -> HCO+H near the S-o threshold***. *Journal of Raman Spectroscopy* 36 (2005) 109-15.

[24] A. Ciani, W. Kreutner, W. Hubschmid, C. E. Frouzakis, K, Boulouchos: ***Experimental Investigation of the Structure and Stability of Diffusion and Edge Flames in an Opposed Jet Burner***, submitted to *Combustion and Flame*, 2005.

[25] M. Reinke, J. Mantzaras, R. Bombach, S. Schenker, A. Inauen: ***Gas phase chemistry in catalytic combustion of methane/air mixtures over platinum at pressures of 1 to 16 bar***, *Combustion and Flame* 141, 448-468, 2005

[26] C.E. Frouzakis et. al. ***Three-dimensional numerical simulations of cellular jet diffusion Flames***, *Proc. Comb. Inst.*, 30, (2005).

[27] C.E. Frouzakis et. al. ***Numerical Simulations of Jet Diffusion Flame Pulsations Close to Extinction***, *Proc. Comb. Inst.*, (submitted), (2005).

[28] M. A. Ciani, et. al., ***Counterflow edge flames: their structure and dynamics at extinction limits***, *Proc. Comb. Inst.*, (submitted), (2005).

[29] S. Ansumali, et. al.: ***Thermodynamic Theory of Incompressible Hydrodynamics***, *Phys. Rev. Letters* 94, 80602 (2005), ***Consistent Lattice Boltzmann Method***, *Phys. Rev. Letters*, (2005), ***Entropic Lattice Boltzmann method for microflows***, *Physica A* 359, 289–305 (2006).

[30] G. Barroso, et. al., ***Experimental and Numerical Investigations on HCCI-Combustion***, *SAE Naples Section,* ICE 2005, *7th International Conference on Engines for Automobile*, Capri (Italy), September 2005.

[31] P. Griebel, et. al.,: ***Flame characteristics and turbulent flame speeds of turbulent high-pressure, lean premixed methane/air flames***, GT-2005-68565, ASME/TURBO EXPO 2005, 06-09 June 2005, Reno-Tahoe (USA), 2005.

[32] P. Griebel, R. Bombach, A. Inauen, R. Schären, S. Schenker, P. Siewert, ***Charakteristika und turbulente Flammengeschwindigkeit von mageren, vorgemischten Methan/Luft-Hochdruckflammen***, *22. Deutscher Flammentag*, Braunschweig (D), 21.-22. September 2005.

[33] S. Piffaretti, et. al.: ***Transient flamelet modelling of diffusion and partially premixed flames***, *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion*, Lisbon, Portugal, 2005.

[34] J. Mantzaras, et. al., *Combusion and Flame 141* (2005) 448-468.

[35] ERCOFTAC ***Annual Meeting und SVV-Tagung*** vom 30. September 2005, Tagungsunterlagen bei Programmleitung.

[36] G. B. Dummond, Ed.: ***XXVII Task-Leaders-Meeting***, Proc. IEA-ConfZürich, August 2005.

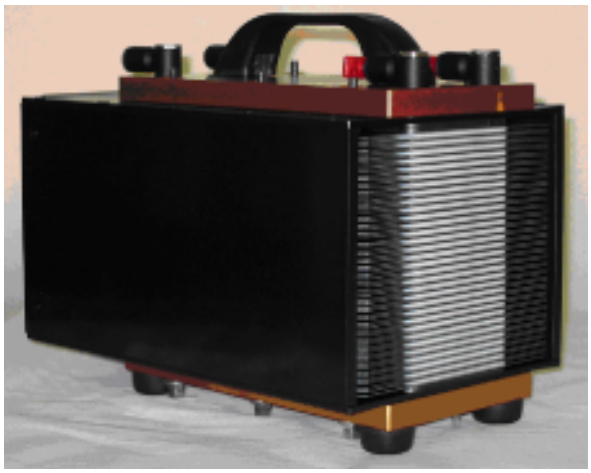
[37] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. ***9th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles***, August 2005

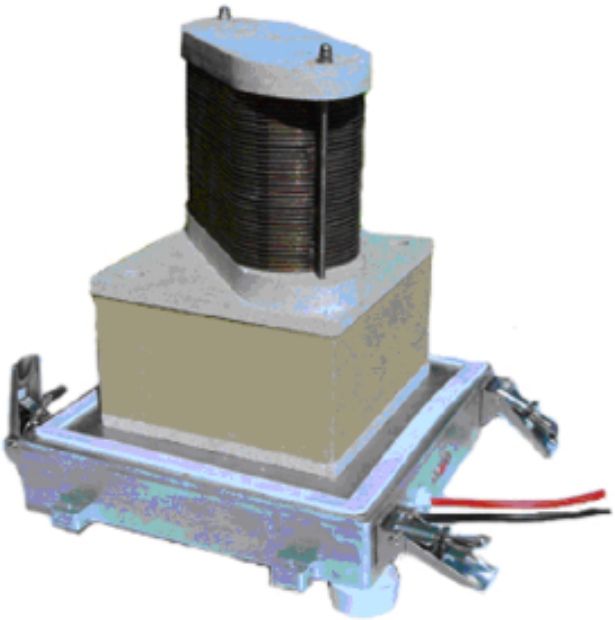
[38] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007***, www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?dossier_id=00798

PROGRAMM BRENNSTOFFZELLEN

Alphons Hintermann / Michael Spirig
alphons.hintermann@bfe.admin.ch

Heute käufliche Schweizer Brennstoffzellen





Ziel erreicht: Mit Kleinstserien am Markt

Eine luftgekühlte PEFC der *FH Biel* wurde bereits nach Norwegen verkauft. Bei der Firma *CEKA* in Wattwil ist die industrielle Fertigung heute im Aufbau [20].

Der SOFC HOTCube von *HTceramix* in Yverdon ist jetzt käuflich erwerbbar. Seine Fabrikation ist im Übergang von der Pilotphase zur industrialisierten Produktion [22].

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Der Fokus des Programms liegt in einer international kompetitiven Forschung und Umsetzung auf den Gebieten der **WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN** und der **ERDGAS-SOFC-BRENNSTOFFZELLEN.** Umgesetzt werden diese Technologien in verschiedenen Anwendungen: als Batterieersatz, als portable APU, in der stationären Bereich (Hausenergie, USV) sowie im Transportbereich (Fahrzeuge, Schiffe). Als langfristiges ökonomisches Ziel wird der Aufbau einer flexiblen, wettbewerbsstarken Zulieferindustrie für Brennstoffzellenkomponenten (Membrane, Zellen, Stacks) wie auch Systemteile und integrationsfähige Brennstoffzellen-(Mikro-) Systeme angestrebt.

Die generellen Schwerpunkte für die Forschung und Entwicklung zielen auf:

- die Steigerung primär der Lebensdauer und sekundär der Zuverlässigkeit der Zellen und Stacks.
- die Systemintegration der entwickelten Schweizer Zellen und Stacks in Nischenmarkt-Anwendungen, mit den Unterzielen: Erarbeitung des erforderlichen Know-hows, professionelle Abstimmung der Komponenten und 1:1 „Proof of Concept".
- die Verfügbarkeit (Lieferbarkeit) der spezifizierten, leading-edge BZ-Komponenten für verschiedenste Anwendungen, um bei den Kunden als Top-Provider zu agieren und zur schrittweisen Kostensenkung über die Menge (EoS).

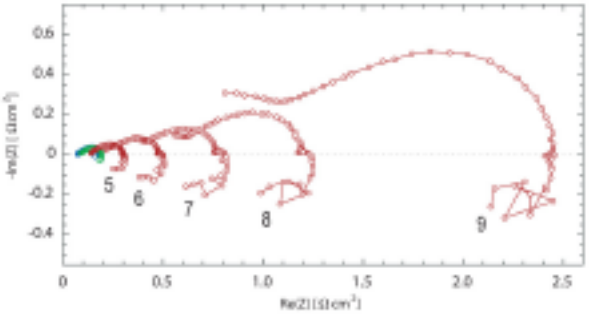
Neben den technischen Schwerpunkten sind auch folgende Ziele von Bedeutung:

- die Erhaltung der Kontinuität in motivierten Forschergruppen. Innovation und international anerkannte Qualität soll dabei der Massstab sein.
- der gezielte Know-how-Aufbau in Modellierung und der entsprechenden experimentellen Daten.
- die Unterstützung des Technologietransfers in die Privatwirtschaft u.a. mit der Demonstration von marktfähigen Nischenprodukten.
- die nationale und internationale Vernetzung und Verbesserung der Kommunikation (mittels Tagungen und verstärkter Zusammenarbeit mit europäischen und internationalen Organisationen)

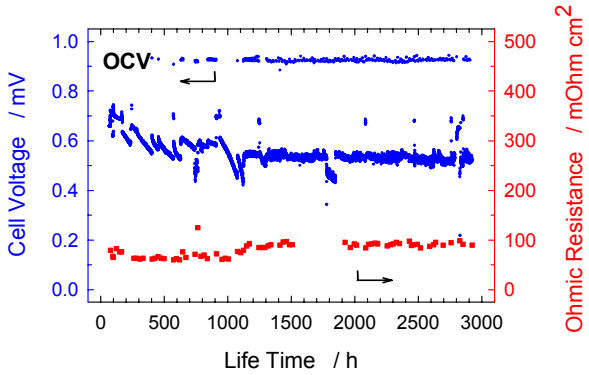
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Zur Entwicklung verbesserter und kostengünstigerer Materialien für die PEM-Brennstoffzelle, z.B. von Elektroden und Membranen trägt das *PSI* bei. Im Projekt ***Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H_2 oder Methanol als Brennstoff*** 0 wird Grundlagenforschung zur Effizienzsteigerung und zur Kosten-senkung dieser Technologie geleistet. Im Berichtsjahr wurden folgende Resultate erreicht: Mittels erfolgreich durchgeführten Impedanzmessungen an PtH_{ad} Schichten lassen sich nun die kinetischen Parameter der H-Adsorption bestimmen. Die Aufnahme lokal aufgelöster Impedanzspektren synchron an segmentierten Zellen konnte als Standardmethode etabliert werden (siehe Fig. 1).



Figur 1: *Impedanzspektren der verschiedenen Segmente (4-9, Anode zu Kathode) in einer segmentierten Brennstoffzelle (links, grün, Segment 4 im Übergang von der trockenen zur wassergefluteten Region.*



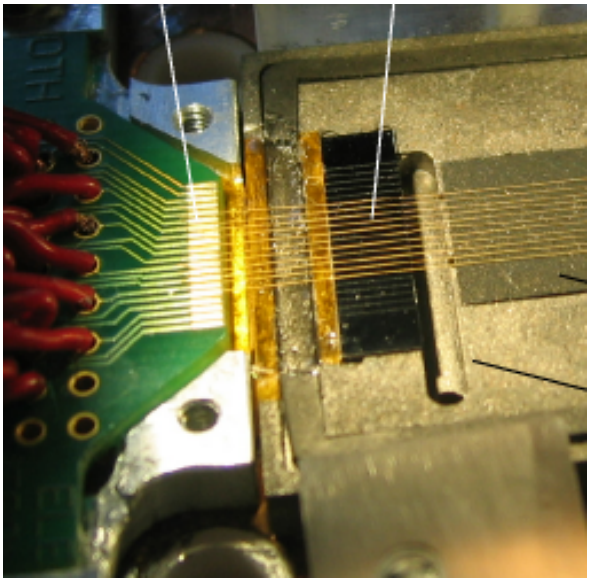
Figur 2: *Stabilität von Membranen-Elektroden-Einheiten auf der Basis von FEP-Filmen, Zyklus ab 1000 h (4 h 500 mA/cm2, 0 min. OCV, 80°C, H2/O2)*

Durch die gleichzeitige Bestimmung des Wassergehalts mit Neutronenradiographie konnte eine in situ-Diagnosemethode entwickelt werden, welche für die Modellierung und damit Erklärung der Funktion von Elektroden entscheidend ist. Die Methode hat bei verschiedenen Konferenzen grosse Aufmerksamkeit erzielt (u.a. Verleihung der Christian Friedrich Schönbein Medaille an die Autoren). Weiter konnte gezeigt werden, dass oxidische Systeme des Typs Bi2PtxIryO7 nur

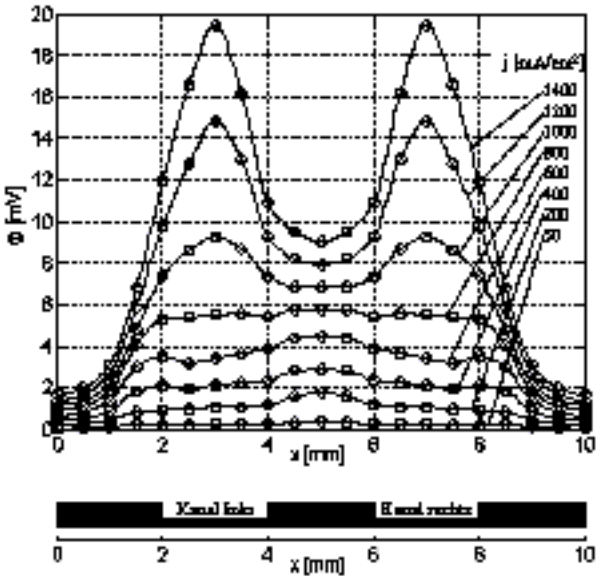
als Elektrokatalysatoren funktionieren, wenn sie vorher definiert aktiviert werden. Noch unerklärt sind die strukturellen Eigenschaften dieser Oberflächen in Bezug auf die O_2-Reduktion und die MeOH-Oxidation. Nachgewiesen wurde ausserdem die Stabilität von strahlengepfropften Membranen bei 80°C für mehrere 1000h und auch unter zyklischen Bedingungen (siehe Fig. 2).

Neben den BFE-Projekten laufen am *PSI* auch Projekte mit ausländischen Hochschul- und Industrie-Partnern (Nissan, Pemeas, BASF und andere). Zudem wird auch die Zusammenarbeit mit Michelin nach der erfolgreichen Realisierung des Brennstoffzellen-Fahrzeuges *HY-LIGHT* weitergeführt [24].

Im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes (*PSI/ZHW*) ***Nummerische Modellierung von PEFC, Weiterentwicklung und erste Validierung des 2D+1 Modellansatzes*** [2] hat das *PSI* eine weltweit neue Messmethode zur hochaufgelösten Bestimmung der Mikro-Stromdichteverteilung über das Kanal-Steg-Gebiet einer PEFC entwickelt und erfolgreich angewendet (siehe Fig. 3). Die experimentellen Untersuchungen des *PSI* werden nun von der *ZHW* mit Ihrer in der Weiterentwicklung befindlichen Software *SESES* validiert (www.ccp.zhwin.ch/seses/docu.php). Zur Ermittlung von gemittelten Transportparameter der MEA (Membrane Electrode Assembly) für 2D+1D Modelle wurde ein entsprechendes lokales 2D Kanal-Steg Finite-Elemente Modell aufgebaut (*Freunberger Modell*). Die Abweichungen zwischen Simulationen und Experimenten sind zwar noch signifikant aber erklärbar (siehe Fig. 4). Experimentell bestimmte Materialparameter und neue, verfeinerte



Figur 3: *Anodenseite der Mikro-Zelle mit Golddrähten über der Gasdiffusionslage (GDL). Auf diesen Aufbau wird die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und die GDL sowie Bipolarplatte der Kathodenseite aufgelegt.*



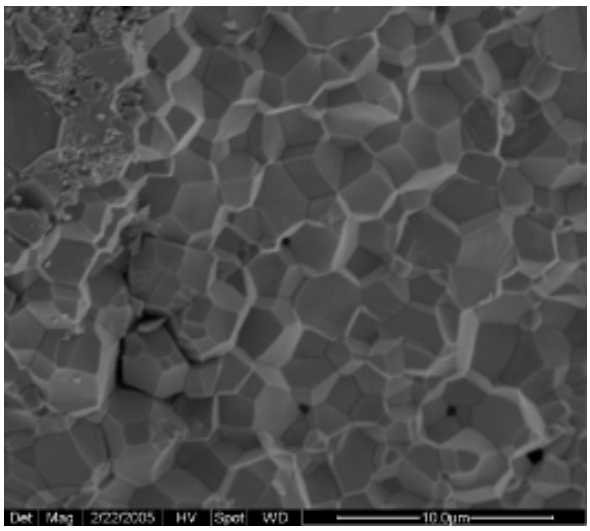
Figur 4: *Lokal aufgelöstes Potenzial als Funktion der integralen Stromdichte über x, gemessen mit Wasserstoff/Sauerstoff.*

Materialmodelle sollten aber künftig die Versuche reproduzieren können. Dieses Konzept des 2D+1D Modells erlaubt dann die Simulation von Zellen mit deutlich kleinerem Rechenaufwand als mit 3D-Modellen und öffnet so ganz neue Möglichkeiten für Parameterstudien mit technischen Zellen und Mehrzellenstapeln.

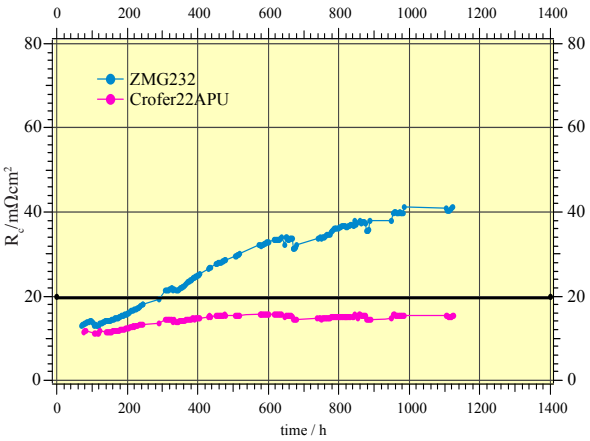
ERDGAS–SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Das Ziel des Projektes ***Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes*** [3] an der *EMPA* ist die Synthese und Charakterisierung von protonenleitenden elektrolytischen Materialien. Im Vordergrund stehen vor allem Yttrium dotiertes (BZY) Barium-Zirkonat (BZ). BZ und BZY5, 10, 15, 20 wurden synthetisiert und hinsichtlich ihrer kristallographischen Phasenreinheit untersucht (siehe Fig. 5). Erste erfolgreiche Impedanz-Spektroskopie Messungen zeigten für BZY10 im Bulkmaterial eine hohe und an den Korngrenzen eine niedrige Protonenleitfähigkeit. Die Struktur der Korngrenze wurde als kritischer Parameter identifiziert. Im weiteren Projektablauf werden daher die Zusammenhänge zwischen Leitfähigkeit und Struktur vertieft untersucht.

Im Projekt ***Transient response and degradation behaviour in novel SOFC short stacks*** [4] wurde an der *ETH Lausanne* das dynamische und Langzeit-Verhalten von SOFC Stapeln der Firma *HTceramix* sowohl experimentell als auch nummerisch untersucht und verbessert. Mittels vieler lokaler Langzeit-Messungen charakterisierender Grössen wie Strom, Spannung, Temperatur etc. (siehe Fig. 6) in verschiedensten Betriebszuständen wurden die Parameter des Berechnungs- und Designmodells in gPROMs validiert. Mit dem Mo-



Figur 5: *SEM Aufnahme einer BZY20 Probe [3]*



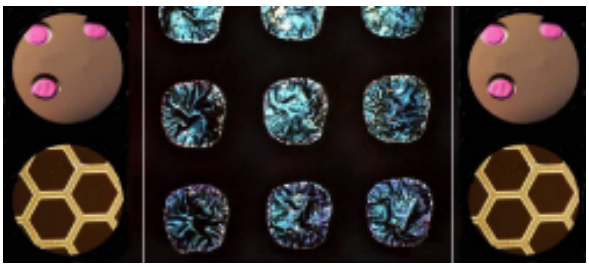
Figur 6: *Anstieg des Widerstandes von typischen SOFC Interconnect-Metallen über die Zeit (in Luft, bei 800°C, unter permanenter Stromlast) [3],[25].*

dell kann das SOFC-Zellen und -Stapel Verhalten über 10'000h vorhergesagt und optimiert werden. Daraus resultierte u.a. eine verbesserte Zellgestaltung, mit einer Leistungsdichte um 1 – 1.5 W/cm^3 bei tolerierbaren thermischen Bedingungen (Gradient < 80 °K, maximale lokale Temperatur <800 °C). Diese und weitere Resultate [25] können auch für die Weiterentwicklung zu einem betriebsicheren stabilen SOFC-Stapel genutzt werden.

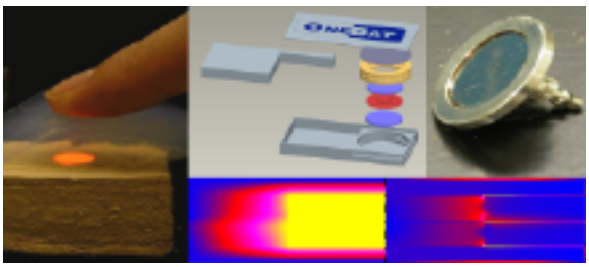
Im Projekt ***Control System Oriented Dynamic Modeling of FC Systems*** [5] wurden Programme zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Brennstoffzellen-Systemen erarbeitet. Ziel ist das Her-ausfinden und Modellieren des charakteristischen dynamischen Verhaltens eines Brennstoffzellen-Systems. Mit der Modellierung der Charakteristiken der Zellenkomponenten und der Peripheriegeräte sollen effiziente Regelstrategien für das Gesamtsystem entwickelt werden. Das im Jahr 2004 erarbeitete Brennstoffzellenmodell wurde experimentell validiert und anschliessend mit den Modellen für die Hilfsaggregate zu einem globalen Brennstoffzellensystemmodell verbunden, das das dynami-sche Verhalten des Gesamtsystems als Funktion der Benutzerinteraktionen mit den Hilfsaggregaten beschreiben kann. Mit einer Dissertation [26] wurde das Projekt erfolgreich beendet.

Im abgeschlossenen Projekt ***Multi-objective Thermo-Economic Methodology for the Design of Fuel Cell Systems*** [6] wurde an der *EPFL* eine Software-Plattform zur Auslegung von Brennstoff-zellen-Systemen entwickelt und mit experimentellen Daten validiert. Dieses Multi-Objekt-Softwaretool [27] erlaubt es, umfangreiche Optimierungs- und Vergleichsberechnungen für unterschiedlichste, sich konkurrenzierende SOFC- und PEFC-Systemvarianten durchzuführen. So können mit dem thermo-ökonomische Modell die Reformierung und die Teiloxidations-Vorprozesse einander gegenüber gestellt werden, optional z.B. Mikro-Gasturbinen zugeschaltet werden, die Kosten für die Komponenten und Systeme abgeschätzt werden. Die Arbeiten werden in einer vom Schweizerische Nationalfonds (SNF) geförderten Doktorarbeit [28] vertieft weitergeführt. Hierbei stehen folgende zwei Aspekte im Vordergrund: 1) Verbesserung und Anwendung des Modells zur Untersuchung des Einflusses der Grösse und der Brennstoffqualität auf das Systemdesign, 2) Erarbeitung von Auslegungsgrundlagen unter Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Parametern, wie sie beispielsweise beim Einsatz von Biogas oder Methanol auftreten.

Unter dem Arbeitstitel ***ONEBAT*** lancierte die *ETH Zürich* (http://www.nonmet.mat.ethz.ch/) ein inter-disziplinäres Verbund-Projekt, in dem heute die Kompetenzen von fünf Hoch- und Fachhochschulinstituten vernetzt sind [7]. Ziel ist es, die grundsätzliche Machbarkeit einer Mikro-SOFC zu zeigen. Wichtig sind dabei die Identifizierung, die Quantifizierung und die Bewertung der auftretenden Fragestellungen, inklusive die Erarbeitung von möglichen Lösungswegen. Die internationale Konkurrenz auf diesem Gebiet ist sehr gross, ein Durchbruch hat jedoch trotz gegenteiliger Pressemitteilungen bisher noch niemand erreicht. Das Ziel des im Juni 2005 gestarteten und vorerst für ein Jahr genehmigte ***KTI Discovery Projekt*** ist der Proof of Concept. Nach dem ersten halben Jahr sind erste freistehende Membranen und Support Strukturen realisiert (siehe Fig. 7) und hohe Brenngas-Reformierraten bei 600 °C erreicht worden. Das thermische Konzept ist erstellt und mittels Simulationen und Experimenten getestet (siehe Fig. 8) worden. Ausserdem wurden 4 Patente angemeldet und mehrere Publikationen [29] eingereicht. Bei erfogreichem Abschluss wird ein Mikro-SOFC Demonstrators angestrebt.



Figur 7: Free-standing membranes and support structures of thin film PEN components (PEN = positive electrode – electrolyte – negative electrode)[29].



Figur 8: ONEBAT insulation concept, system design, and simulations of the thermal management illustrating the thermal system concept [29].

Nationale Zusammenarbeit

Die nationalen Vernetzung konnte im Projekt ***Unterstützung sowie nationale und internationale Vernetzung im Bereich Brennstoffzellen*** [14] durch den fortschreitenden Aufbau von Projekt-Begleitgruppen verstärkt werden. Durch die Akzeptanz und die Einladung der anderen, scheinbar in Konkurrenz stehenden Know-how-Trägern an den Reviews, konnte folgendes erreicht werden:

- Gegenseitige Information über laufende Projekte und wichtige Resultate (Know-how-Transfer) sowie Austausch über mögliche Synergien zwecks Verhinderung von Doppelspurigkeiten.
- Erhöhung der fachlichen Kompetenz und Breite und damit wichtiger Input zur Weiterbearbeitung der Fragestellungen.
- Sensibilisierung für eine abgestimmte, leistungsfähige Schweizer Brennstoffzellen-Szene mit gemeinsamen längerfristigen Zielen.

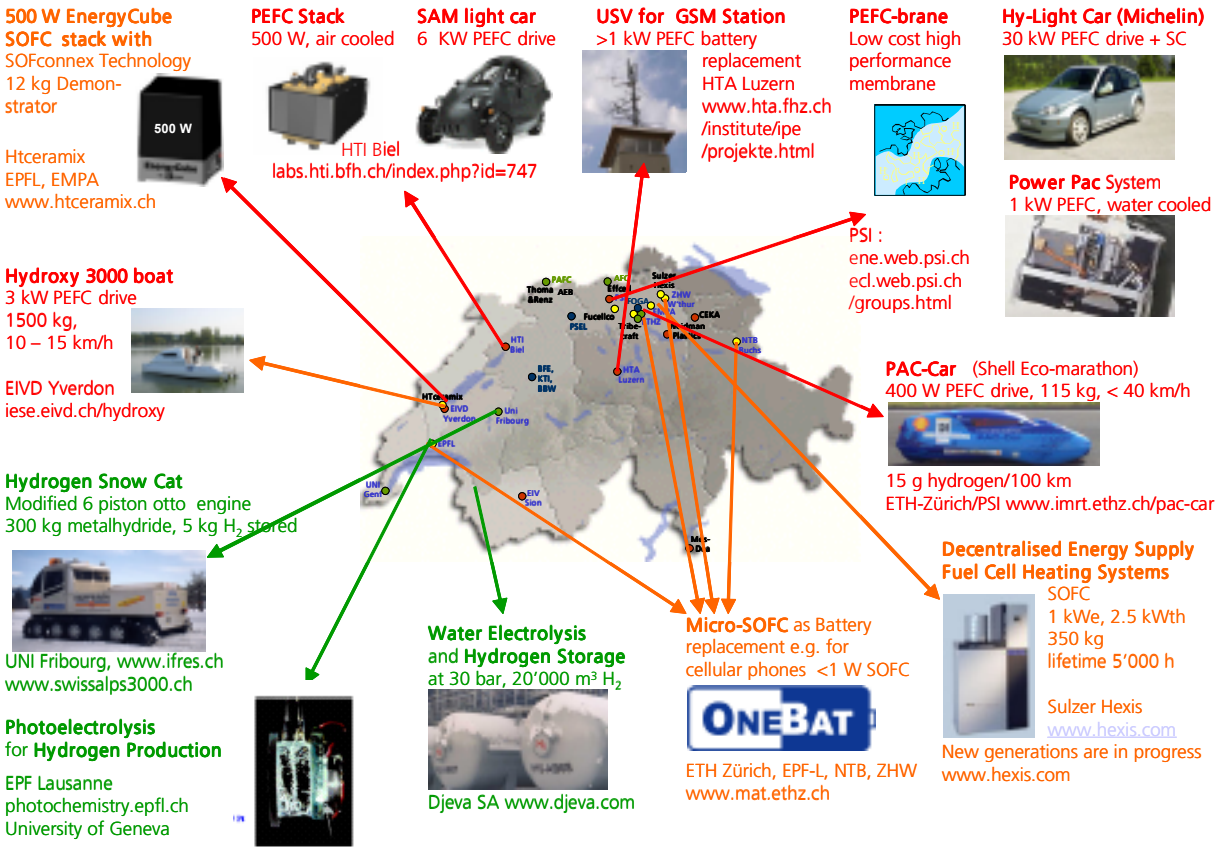
Um in der Schweiz einen möglichst intensiven und offenen Austausch über die internationalen Netzwerkaktivitäten aktiv zu fördern, wurde den Key-Players eine umfassende Mappe mit relevanten Informationen über *IEA, HFP, HYCO-Eranet* zusammengestellt und in Umlauf gebracht. Im Austausch mit den Know-how-Trägern und den Bereichsleitern wurde auch ein Poster (siehe Fig. 9), welches die Schweizer F+E Aktivitäten im Bereich Brennstoffzellen und Wasserstoff präsentiert, erarbeitet.

Erfreulicherweise konnte mit der Firma *CEKA* in Wattwil ein Industriepartner gefunden werden, der in die Weiterentwicklung der luftgekühlten PEM-Brennstoffzelle der HTI-Biel [20] investiert und mit einem kommerziellen Kleinserienprodukt auf dem Markt auftreten will.

Sulzer Hexis war schon seit über zehn Jahren auf diesem Pfad. Anfang 2005 beabsichtigte Sulzer, für seine Division *Sulzer Hexis* einen Partner oder Investor zu suchen. Offenbar ein nicht einfaches Unterfangen, denn im Spätsommer 2005 wurde – trotzdem überraschend – das Aus für *Sulzer HEXIS* gemeldet. Das BFE bemühte sich in der Folge, die Hintergründe dieses Entscheides zu erfahren und bot Hand, wenigstens einen Teil des in den letzten 15 Jahren, auch mit namhaften Mitteln der öffentlichen Hand erworbenen Fachwissens für die Zukunft zu retten. Letzten Endes vergeblich. Die weitere Überraschung folgte am Jahresende: Ein ungenannter Investor will das gesamte Inventar und einen Teil der *Hexis*-Mannschaft für die nächsten 3 Jahre übernehmen.

Zur weiteren Unterstützung der nationalen Zusammenarbeit und Kommunikation der Schweizer Brennstoffzellen-Aktivitäten steht nun auf der Website des *BFE* eine im Ausbau befindliche Informationsplattform zur Verfügung [15].

Im Sommer 2005 erreichte die durch die *AEB Alternativ-Energie Birsfelden AG* (lokaler privater Fernwärmeversorger) betriebene stationäre 200 kWel Brennstoffzelle vom Typ ONSI PC 25 C (PAFC) ihr 5-jähriges Betriebsjubiläum. In dieser Zeitspanne absolvierte die Anlage 36’000 Betriebsstunden und erreichte einen gemittelten elektrischen Wirkungsgrad von über 39 % (berechnet aus der netto nutzbaren Strommenge und der eingesetzten Erdgasmenge). Die Demonstrationsanlage ist auf einem Schulhof in Birsfelden und in unmittelbarer Nähe zu einem Einkaufscenter aufgestellt und damit täglich für zahlreiche Passanten ersichtlich. Der Strom wird ins Netz des lokalen Stromversorgers und die Wärme ins Fernwärmenetz der *AEB* gespeist. Die Anlage lief in dieser Zeit ohne grössere Reparaturen und konnte vorwiegend durch einen lokalen Energiedienstleister gewartet werden. Ein Defekt des Steuerungscomputers der Brennstoffzelle verursachte 2005 einen längeren Stillstand der Anlage. 2006 werden die Betriebserfahrungen über die 5 Jahre vertieft ausgewertet und die Möglichkeiten zur weiteren Anlagenutzung abgeklärt.



Figur 9: *Ausschnitt des Posters «Switzerland Some National Hydrogen and Fuel Cell Projects» anlässlich des «Second Annual General Meeting» von HFP [14].*

Internationale Zusammenarbeit

Im ***IEA Programm Advanced Fuel Cells (AFC)*** nimmt die Schweiz in den Annexen XIX [30] und XVIII [30] teil. Im AFC-ExCo wurde festgestellt, dass der Informationsaustausch zwischen EU- und IEA-Programmen gewährleistet ist und so Doppelspurigkeiten vermieden werden können. Ein Problem ortete das ExCo bei der Definition von Begriffen in der Brennstoffzellentechnologie. Schon von anderen internationalen Gremien als geeignet eingeführte Begriffe sollen nicht ohne zwingenden Grund geändert werden. Eine international akzeptierte Standardisierung der Begriffe ist anzustreben. Das ExCo beschloss, seinen Webauftritt www.ieafuelcell.com zu verbessern, und genehmigte die entsprechenden Mehrkosten im Jahresbeitrag. Das ExCo stellte fest, dass In zahlreichen Ländern (USA, Japan, EU) nach wie vor erhebliche finanzielle Mittel des Staates in die Forschung und Entwicklung der BZ gesteckt werden. Die Schweiz konnte hierzu nur eine Budgetreduktion bei den BFE-Mitteln mitteilen. Positiv zur Kenntnis genommen wurden die Schweizer Brennstoffzellen Highlights [32].

Die Schweiz leitet im neuen ***Annex XIX*** den *Subtask* ***Market Outlook for stationary Fuel Cells*** [30]. Weitere Themen sind die Auswirkungen einer grossen Anzahl Brennstoffzellen auf das Stromnetz, die Palette und das Potenzial möglicher Brennstoffe, die Entwicklung und Standardisierung von Systemkomponenten sowie der technologische Entwicklungsstand stationärer Brennstoffzellen. International werden bei den grösseren Systemen Fortschritte mit den Molten Carbonate Fuel Cells verzeichnet (zahlreiche Anlagen mit über 20'000 Betriebsstunden und elektrischem Wirkungsgrad über 45 % in Betrieb). Interessant sind sie für die Nutzung von Klärgas. Die in Hamburg ansässige European Fuel Cell GmbH nimmt die ersten Feldtestanlagen (1.5 kW elektrisch) in Betrieb. Ein Neuzugang ist auch die in Dresden domizilierte Firma *EBZ* , welche mit erheblichen EU-Fördermitteln in die Entwicklung von SOFC-Systemen einsteigt. Die bisherigen Player in diesem Marktsegment erhalten Konkurrenz bevor sich die ersten Erfolge einstellen. Ehrgeizige Ziele werden vor allem auch von Japan gemeldet. Bis ins Jahr 2010 sollen stationäre Brennstoffzellen mit einer kumulierten Leistung von 2.2 GW installiert sein.

Mit dem Projekt ***Participation of Switzerland in IEA Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)*** [31] nimmt ab 2005 auch die Scheiz an diesem Annex aktiv teil. Wichtigstes Event war der Workshop in Quebec, welcher in Kombination

mit dem *International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE)* und dem Workshop ECS SOFC IX abgehalten wurde. Die internationale Beteiligung an der Veranstaltung war sehr gut und es wurde festgehalten, dass die Grundfragestellungen nur mit gemeinsamen Anstrengungen zu lösen sind. International nehmen F&E-Finanzmittel zwar immer noch zu, aber langsamer als in der Vergangenheit. Um hier Gegensteuer geben zu, sind in den nächsten 1-3 Jahren Produkte auf den Markt zu bringen. Hierbei am vielversprechendsten ist der Nischenmarkt im militärischen Bereich. Wärme-Kraft-Kopplungen sind auch wichtig, generieren jedoch kaum Cash-Flow in naher Zukunft. Insgesamt steht die Glaubwürdigkeit der ganzen BZ-Industrie auf dem Spiel.

Im Rahmen des Projektes ***Unterstützung sowie nationale und internationale Vernetzung im Bereich Brennstoffzellen*** [14] wurden die internationalen Aktivitäten auch auf das *HYCO-Eranet* ausgedehnt. Von Interesse und Nutzen sind zur Zeit vor allem die zusätzlichen Kontakte zum Network Committee von *HYCO-Eranet*, den Vertretern der Mitgliedländer und der neu interessierten Länder. Bezüglich Input für die Stakeholder steht das *HYCO-Eranet* noch am Anfang. Zur Verbesserung ist der Austausch über die jeweiligen nationalen Zielvorgaben und Potenziale (F&E, Industrie), allenfalls auch bilateral, geplant. Ein Entscheid über das weitere Vorgehen der Schweiz im *HYCO-Eranet* ist noch ausstehend.

Erfreulich ist die Beteiligung der Schweiz an EU-Projekten: Schweizer Forscher und Industriepartner sind in vielen Projekten involviert: ***Real SOFC*** (EU-IP FP6, Durability+Lifetime of SOFC cells and stacks *HTceramix, EMPA, ETHZ, EPFL*), ***FlameSOFC*** (EU-IP FP6, 2 kWel micro-CHP system, *HTceramix,* EMPA), ***SOFC600*** (EU-IP FP6, SOFC Stack at 600 °C, *EMPA)*, ***GenFC*** (EU-STREP) *EMPA.*

Wie in anderen Gebieten ist auch bei der Brennstoffzellenforschung die Modellierung und experimentelle Validation ein wichtiger Eckpfeiler für eine gezielte Entwicklung. Um die diesbezüglichen Aktivitäten schon in einem frühen Stadium zu koordinieren, wurde 2004 vom BFE das ***Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation*** [34] mit internationaler Beteiligung initiiert [33]. Als entwicklungsfähige Plattform wurde nach dem Schweizer Vorbild und Beteiligung diese Jahr das zweite Research Symposium vom DLR in Stuttgart erfolgreich durchgeführt. Eine Fortsetzung hat das Ganze auch im Jahr 2006 in der Schweiz an der *EMPA* in Dübendorf [35].

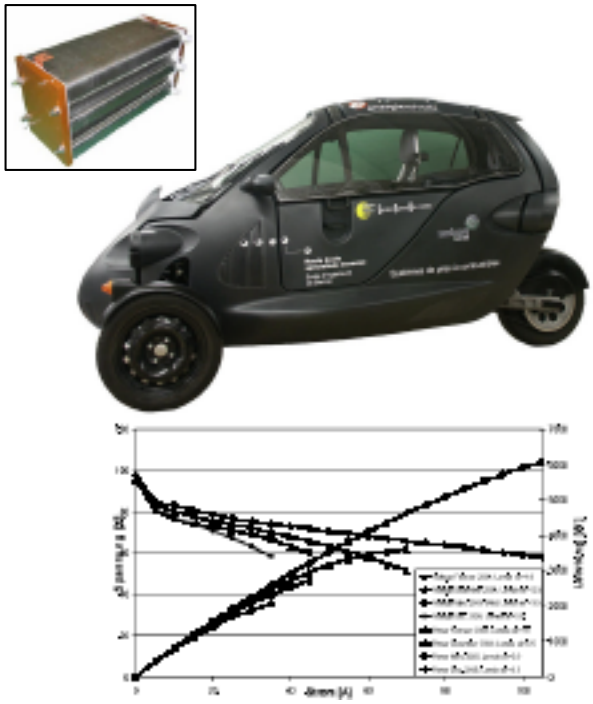
Pilot- und Demonstrationsprojekte

WASSERSTOFF- UND METHANOL-PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Die Umsetzungsaktivitäten im stätionären (Batterieersatz in USV-Anlagen) und im portablen Bereich (APU-Anhänger, luftgekühlter 1kW-Stack) sowie im Transportbereich (Boote, Spezial-Fahrzeuge) wurden fortgesetzt. Um die Gründe für Unzulänglichkeiten, die erst während dem Betrieb von Demonstratoren und Pilotanlagen auftauchen, zu finden sowie die Qualität der Entwicklungen zu steigern, ist ein Monitoring mit anschliessender Auswertung der Betriebsdaten unerlässlich.

Die *HTI Biel* versucht daher im noch laufenden Projekt ***Brennstoffzellenfahrzeug SAM Überprüfung des 6kW Brennstoffzellenstapel*** [16] die Gründe für die bereits nach zwei Jahren festgestellte, sehr grossen Degradationserscheinungen von 6.25 kW auf 2 kW zu ermitteln. Dazu wurde der Stapel aus dem Fahrzeug heraus montiert und optisch sowie mechanisch untersucht. Vorläufiges Resultat: Verminderung der Anzugskraft der Zugstangen, dadurch geringere Anpresskraft der Zellen zueinander und somit Eindringen von Kühlwasser in die beiden Brennstoffzellenkammern, was die Stapelperformanz entsprechend reduziert. Die anschliessend auf dem BZ-Prüfstand erneut aufgenommen Stromspannungskurven zeigen wie diese im Laufe der Zeit stärker abfallen, was auf die Erhöhung des Innenwiderstandes der Zellen hindeutet (siehe Fig. 10). Der deutliche Spannungsverlust bei den ersten 10 A weist auf eine starke Reduzierung des Aktivierungspotenzial des Katalysators hin. Eine abschliessende Bewertung der Untersuchungsresultate ist aber noch ausstehend.

Ein hohes Realisierungspotenzial haben Brennstoffzellen betriebene unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV). Als umweltfreundliche und zukunftsorientierte Alternative zu herkömmlichen Batterien und zum Einsatz von Dieselgeneratoren bieten sie Vorteile wie: leise und sauber, anpassbare, längere Autonomiezeit (Wirkungsgrad), verringerter Service- und Wartungsaufwand (höhere Gesamtlebensdauer als bei Batterien). Im Projekt ***USV für GSM-Basisstationen mit Brennstoffzellen*** [17] ist es der *HTA Luzern* gelungen sowohl einen Betreiber (*Swisscom Mobile*) als auch einen USV-Anbieter aus *Dänemark* für den Aufbau eines Prototypen und 1:1 Stromausfall-Feldversuche an einer GSM-Basisstation für Mobilfunkantennen zu motivieren (siehe Fig. 11). Nach anfänglichen Problemen mit der Brennstoffzelle eines privaten Anbieters, ist die Anlage nun wieder funktionstüchtig und betriebsbereit für die anstehende Versuchsreihe.



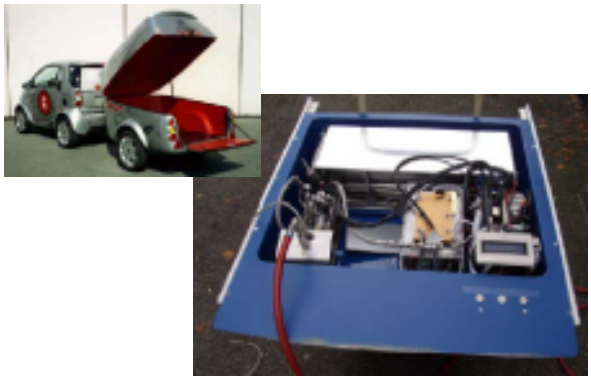
Figur 10: Elektrofahrzeug SAM der Firma CREE mit 6-kW PEM Brennstoffzellenstapel, Vergleich der Stromspannungskurve des Stapels zu Alterungszuständen [16]

Figur 11: GSM-Basisstationen der Swisscom auf dem Dach der HTA Luzern, Die USV-Anlage wird mit Brennstoffzellen betrieben. Sichtbar sind die zugehörigen H2-Tanks im offenen Schrank [17]

Die Vorteile, wie Reduktion der Emissionen (Schadstoffe in Luft und Wasser, Lärm) und der geringere Gesamtverbrauch (hoher Wirkungsgrad), der Brennstoffzelle für den Einsatz in der Schifffahrt sind unbestritten. Zur Demonstration und zum Auf- und Ausbau der entsprechenden Systemintegrationskompetenzen wurden seit 1997 am *Institut d'énergie et de systèmes énergétiques der FH Yverdon* mehrere Brennstoffzellen betriebene Boote realisiert. Das bisher grösste Boot *Hydroxy3000*, ein Katamaran mit einer 3kW-PEM-Brennstoffzelle und einer Geschwindigkeit von 12 km/h bei Nennleistung, wurde ausgiebig getestet und einem breiten Publikum sowie der Presse schon öfters vorgestellt (siehe Fig. 12). Dies erzeugte einiges Interesse und zahlreiche neue Kontakte zu Unternehmen. Um die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Brennstoffzellen in der Schifffahrt auszuloten, ist an der *EIVD* das Projekt ***PacBat – possibilités et limitations dans l'application des piles à combustible à la navigation*** [18] in Bearbeitung. Hierbei wurden basierend auf den bestehenden Erfahrungen und realitätsnahen Annahmen für verschiedene Bootstypen und Grössen die Anforderungen und Realisierungsmöglichkeiten für den Brennstoffzellen-Bootsantrieb abgeschätzt. Als Haupthindernisse wurden neben dem heute noch hohen Preis vor allem die, für einen ausreichenden Aktionsradius resultierende, sehr voluminöse und schwere on-board Wasserstoffspeicherung identifiziert. Als weitere Bottlenecks, welche auch einen Durchbruch bei anderen Anwendungen behindern, sind die Herstellung und Verteilung des Wasserstoffes (Tankstellen) sowie die Sicherheits- und Akzeptanzaspekte. Weiter konnte festgestellt werden, dass sich PEFC und AFC für den Einsatz als APU in kleineren Booten für Seen und Kanäle eignen. Für grössere Boote eignen sich dann eher MCFC. Bei den APUs liegt denn auch eines der grössten Zukunftspotenziale.

Im Rahmen des Projektes ***Fuel Cell – Trailer*** [19] wurde von der *HTI Biel* eine autonome Stromversorgung (APU) mit einer eigenen luftgekühlten PEM-Brennstoffzelle aufgebaut. Diese wird in einen *Clevertrailer* (PW-Anhänger der gleichnamigen Firma) untergebracht und kann so den Outdoor-Betrieb von 230 V Geräten gewährleisten (siehe Fig. 13). Das System soll beispielsweise einen mobilen Promotionsstand oder einen Glacestand mit Strom versorgen können. Die angestrebte Ausgangsleistung beträgt 500 W. Für die Speicherung des Wasserstoffs wurde in Zusammenarbeit mit der *Universität Fribourg* ein Metallhydridspeicher entwickelt. Dieser kann schnell ausgewechselt oder on-board gefüllt werden. Die speicherbare Menge Wasserstoff reicht aus für 10 Stunden Systembetrieb bei voller Leistung. Bei der Systeminbetriebnahme konnte die gewünschte Funktionalität erreicht werden. Ausstehend sind mehrstündige Dauertests und diverse Optimierungen am Gasversorgungsblock, Leistungssteuerung sowie Grösse und Gewicht von Stapel und Sinuswandler.

Figur 12: *Hydroxy3000 IESE/EIVD [18]*



Figur 13: *Clevertrailer-Anhänger als mobile APU, sowie Ansicht der Stromversorgung mit Brennstoffzelle von oben [19]*

Um künftig auch Zellen und Stapel, welche auf der in der Schweiz finanzierten Technologieentwicklung basieren, liefern zu können, wird an der *HTI Biel* in Rahmen eines ***KTI-Projektes ein luftgekühlter PEFC-Stapel für die industrielle Anwendung*** [20] entwickelt. Als Industriepartner beteiligt sich massgeblich die Firma *CEKA Elektrowerkzeuge aus Wattwil*. Ziel dieses Projektes ist es, den im vorgängigen Forschungsobjekt entwickelten 500 W PEFC-Stapel mit 32 Zellen zu einem kommerziellen Kleinserien-Produkt weiter zu entwickeln (siehe Fig. 14). Dazu gehören die Steigerung der Leistungsdichte, die Implementierung einer Tieftemperaturstartfähigkeit und die Erreichung einer Kostenschwelle von 4.20 CHF/ Watt. Inzwischen wurde der Stapel in einem verbesserten Design konstruiert und gefertigt. Die entschiedenen Verbesserungen wurden bei der Luftkühlung vorgenommen, so dass der Stapel auf eine maximale Leistung von 860 W und einem Überdruck von 0,7 bar erreicht.

Das neue Projekt ***Intégration d'une pile à combustible 300 W pour la motorisation électrique de petites embarcations*** [21] der *EIVD in Yverdon* vereint die Industriepartner: *Horizon FCT, Jonson – MinnKota* und *MW-Linehat*. Das Ziel besteht in der Integration und Austestung einer Brennstoffzelle als Energielieferant für einen kleinen Aussenbordmotor für z.B. Fischerboote (siehe Fig. 15). Erreicht werden soll der Aufbau eines weiteren industriebasierten Prototypen als Nischenmarktprodukt.

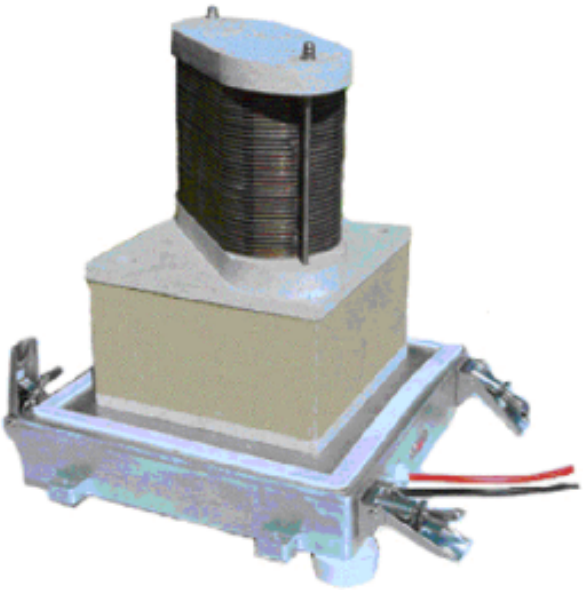
Figur 14: *Luftgekühlter PEFC-Brennstoffzellenstapel mit 32 Zellen [20]*

Figur 15: *PEFC Horizon 300 W Elektrischer Aussenbordmotor MinnKota, welcher für den Einbau einer PEFC Horizon 300 W vorgesehen ist [21]*

ERDGAS–SOFC-BRENNSTOFFZELLEN

Dank der schon recht flexiblen SOFC-Stapel Pilotfabrikation bei *HTceramix* ist es heute möglich, mit neuen Projekten auch Verkäufe für Nischenmarkt-Anwendungen, wie Stapel für Integrationsprojekte und für Ausbildungszwecke zu iniziieren. Im Projekt ***SOFC HoTbox™ and Demonstrator*** [22] hat *HTceramix* ein „low-cost" Stapel Konzept HoTbox™ und eine entsprechende Prototypenproduktion entwickelt. Dadurch können Kunden aus Industrie und Forschung schnell und flexibel beliefert werden. U.a. wurden die Interfaces zwischen Stapel, Isolation und Wärmetauscher optimal angepasst, ein voll keramischer Wärmetauscher entwickelt und eine Vorrichtung zum einfachen Betrieb, Test und Demonstraton aufgebaut. Die HoTbox™ (siehe Fig. 16) ist eines der kleinsten 500W_{el} SOFC-Module der Welt. Dies ist nun eine solide Basis für die Entwicklung von Brennstoffzellen Modulen, welche künftigen Systemintegratoren als Komponente für Wärmekraftkopplungssysteme dienen wird.

Das neuste Projekt ***Development of an autonomous transportable SOFC system ope-***



Figur 16: SOFC HoTbox™ Modul von HTceramix SA als künftig integrierbare Komponenten für Wärmekraftkopplungssysteme (500W$_{el}$) [22]

Figur 17: Lilith: Der transportable und autonome SOFC-Prototyp von HTceramix SA [23]

rating on C-based fuel [23] von *HTceramix* in Zusammenarbeit mit dem *Institut d'énergie et de systèmes énergétiques der FH Yverdon* hat den Aufbau eines SOFC-Prototypen zu schulischen aber auch Feldversuchszwecken zum Ziel (siehe Fig. 23). Nischenmarktbasis sind ernsthafte Interessen von diversen Universitäten und Forschungszentern. Auf der Grundlage eines bereits bestehenden Stapeldesigns soll ein stand-alone Demonstrator erste Verkaufserfolge einbringen. Dieser soll schnell starten, einige Zyklen degradationsarm überstehen und mit kohlenstoffbasiertem Brennstoffen betrieben werden können.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Zwei Ereignisse prägten das Berichtsjahr: Drastische Butgetreduktionen im BFE-Programm Brennstoff zellen und der Meldung des Verkaufs von *Sulzer HEXIS*. Das reduzierte Budget verunmöglichte die Förderung von neuen grösseren Projekten und es müssen künftig zunehmend **Kontinuitätseinbrüche** wie z.B. der Abgang von langjährigen, wichtigen Know-how-Trägern in andere Branchen, fehlender Aufbau von Nachwuchskräften in Kauf genommen werden. Dies ist entgegen den Bedürfnissen der noch schwachen industriellen Aktivität, welche künftig weiterhin behutsame Pflege und Unterstützung der öffentlichen Hand bedürfen.

Trotz reduziertem BFE-Budget konnten im Berichtsjahr einige **bedeutsame Projekte** iniiiert resp. abgeschlossen worden. Die sichtbarsten Highlights und künftigen Hoffnungsträger sind neben den Demonstratoren vor allem die heute bereits käuflichen PEFC und SOFC Brennstoffzellen der Firmen *CEKA AG, HTceramix SA* (siehe Titelbild). Das **Zwischenziel, mit Kleinstserien in Nischenmärkten** zu operieren, wurde erreicht und gemessen an einer Prognose von 10 bis 20 Jahren für eine grossindustrielle Umsetzung befindet sich die Schweizer BZ-Szene somit – zusammen mit der mittlerweile neugegründeten *HEXIS AG* – nach wie vor auf einem erfolgsversprechenden Kurs.

Die Vernetzungsaktivitäten auf nationaler und internationaler Ebene, wurden nicht mehr ganz so intensiv, aber dennoch weiterhin untersützt. Neben den Projektbegleitgruppen und dem internationalen Engagement bei der *IEA*, der *HFP* (Mirror-Group) und im *HYCO-Eranet*, ist die komplett überarbeitete Präsentation des **Programms Brennstoffzellen auf der Website** des *BFE* das Augenfälligste [15]. Auf der Einstiegsseite zum Thema wird neben einer kurzen Beschreibung der Funktionsweise neu auf aktuelle Informationen über Aktivitäten in der Schweiz sowie auf Veranstaltungen hingewiesen. Auf einer speziellen Seite wird in einer Übersicht das Know-how in der Schweiz im Bereich der Brennstoffzellen-Technologie dargestellt. Listen mit den Namen der Unternehmen und Organisationen mit Forschungs- und Industriekompetenzen sind darüber hinaus abrufbar. Die BFE-Programmschwerpunkte sowie die aktuell unterstützten Projekte werden auf weiteren Seiten präsentiert. Als Teil einer künftigen Realisierungstribüne ist es das Ziel, die in der Schweiz engagierten Interessen- und Kompetenzträger in den Informationsaustausch und somit in eine permanent aktualisierte Website als künftige Austauschplattform aktiv einzubinden.

Für das Jahr 2006 ist die Budgetsituation nach wie vor ungenügend und es bleibt – in Anbetracht der

noch zu lösenden, vielfältigen Problemen – die Hoffnung auf eine mittelfristig steigende Tendenz. Im Jahr 2006 hat die Prgrammleitung neben der gezielten Weiterführung des internationalen Engagements in der EU und der IEA, den Beitrag für das Konzept der Energieforschung des Bundes 2008-2011 festzulegen. Ein weiterer Höhepunkt der Programmaktivitäten könnte eine Neuauflage des CH-Brennstoffzellen-Impulstages vom November 2004 sein.

Mitte 2006 wird infolge Pensionierung die Bereichs- und Programmleitung in andere Hände übergehen. Das Programm Brennstoffzellen kann dann mit neuem Elan weitergeführt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] G. Scherer et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***Projekt Polymerelektrolyt Brennstoffzellen mit H2 oder Methanol als Brennstoff***, (JB).

[2] F. Büchi, M. Roos, (felix.buechi@psi.ch), PSI, *Villigen:* (markus.roos@zhwin.ch) ZHW, CCP, Winterthur: ***Nummerische Modellierung von PEFC, Weiterentwicklung und erste Validierung des 2D+1 Modellansatzes***, (JB).

[3] S. Duval, P. Holtappels, Empa *Dübendorf:* ***Intermediate Temperature Fuel Cells based on Ceramic Proton Conducting Electrolytes***, (JB)

[4] Diego Larrain, (diego.larrain@epfl.ch), Jan Van Herle (Jan.Vanherle@epfl.ch), EPF *Lausanne:* ***Transient response and degradation behaviour in novel SOFC short stacks*** (JB)

[5] F. Grasser et al. (felix.gasser@epfl.ch), EPF *Lausanne:* ***Control System Oriented Dynamic Modeling of FC Systems****,* (SB).

[6] F. Maréchal et al. (Francois.Marechal@epfl.ch), EPF *Lausanne:* ***Multi-objectif Thermo-Economic Methodology for the Design of Fuel Cell Systems****,* (SB)

[7] D. Poulikakos et al. (dimos.poulikakos@ethz.ch), LTNT, ETH *Zürich :* ***Efficient Reforming****,* (SB)

[8] P. Muralt et al. (paul.muralt@epfl.ch) MXD/EPF *Lausanne:* ***Thin Film Electrolyte Mem-brane for Miniaturized Solid Oxid fuel Cells (LYTEMEM)***, (SB).

[9] P. Müller et al. (ma@ntb.ch) NTB *Buchs:* ***Pre-Design Study***, (SB).

[10] M. Roos et al. (Markus.roos@zhwin.ch) ZHW, *Winterthur:* ***Effiziente numerische Modelle***, (SB).

[11] P. Muralt et al. (paul.muralt@epfl.ch) MXD/EPF *Lausanne:* ***ONEBAT – Battery Replace-ment using miniaturized SOFC***, Teil EPFL, (SB).

[12] P. Müller et al. (ma@ntb.ch) NTB Buchs: ***ONEBAT – Battery Replacement using minia-turized SOFC***, Teil NTB, (JB).

[13] M. Roos et al. (Markus.roos@zhwin.ch) FH *Winterthur:* ***ONEBAT – Battery Replace-ment using miniaturized SOFC****,* Teil ZHWL, (SB).

[14] M. Spirig (michael-spirig@temas.ch), TEMAS AG, *Arbon:* ***Unterstützung sowie nationale und internationale Vernetzung im Bereich Brennstoffzellen 2005***, (SB)

[15] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENZ *Basel:* ***Struktur BFE-Webseite Brennstoffzellen****,* (SB).

Liste der P+D-Projekte

[16] M. Höckel et al. (hkm1@bfh.ch) Hochschule für Technik und Informatik, *Biel:* ***Brennstoffzellenfahrzeug SAM Überprüfung des 6kW Brennstoffzellenstapel,*** (JB)

[17] U. Trachte (utrachte@hta.fhz.ch), Hochschule für Technik und Architektur, *Horw:* ***Unterbrechungsfreie Stromversorgung USV für GSM-Basisstationen mit Brennstoffzellen****,* (JB).

[18] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EIVD/HES-SO, *Yverdon :* ***PacBat – possibilités et limitations dans l'application des piles à combustible à la navigation***, (SB).

[19] M. Höckel et al. (hkm1@bfh.ch) Hochschule für Technik und Informatik, *Biel:* ***Fuel Cell - Trailer,*** (SB)

[20] M. Höckel et al. (hkm1@bfh.ch) Hochschule für Technik und Informatik, *Biel:* ***IPHoS, luftgekühlten PEM Brennstoffzellenstapel,*** (JB)

[21] J. Affolter (affolter@eivd.ch), EIVD/HES-SO, Yverdon : ***Intégration d'une pile à combustible 300 W pour la motorisation électrique de petites embarcations****,* (-).

[22] John Schild, Bucheli Olivier (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, *Yverdon:* ***SOFC HoTbox™ and Demonstrator*** (SB)

[23] Bucheli Olivier (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, *Yverdon:* ***Development of an autonomous transportable SOFC system operating on C-based fuel*** (-)

Referenzen

[24] ***PSI Annual Report 2004 Electrochemistry Laboratory***, http://ecl.web.psi.ch/

[25] Diego Larrain, (diego.larrain@epfl.ch), EPFL, ***SOFC Stack simulation and optimisation, including experimental validation and transient behaviour***, PhD Thesis EPF-Lausanne, June 2005

[26] F. Grasser (felix.gasser@epfl.ch). ***An analytical, control-oriented state space model for a PEM fuel cel l system***, PhD thesis, EPFL Lausanne, 2005, http://library.epfl.ch/theses/?nr=3445

[27] F. Marechal (Francois.Marechal@epfl.ch), F. Palazzi, J. Godat, and D. Favrat. ***Thermo-economic modelling and optimisation of fuel cell systems.*** *Fuel cells - From Fundamentals to Systems*, 5(1):5–24, 2005.

[28] F. Marechal (Francois.Marechal@epfl.ch), D. Favrat, and F. Palazzi. SNF project: ***Optimal energy conversion system design under uncertain parameters***. Technical report, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'énergétique industrielle, 2005.

[29] A. Bieberle-Hütter, D. Beckel, U.P. Mücke, J.L.M. Rupp, A. Infortuna, L.J. Gauckler, ***Micro-Solid Oxide Fuel Cells as Battery Replacement***, mstnews, August 2005 (2005) 12-15.

[30] S. Renz (renz.btr@swissonline.ch), THOMA+RENZ Basel, ***IEA Task XIX Stationäre Brennstoffzellen Demonstration und Markteinführung***, (SB)

[31] Olivier Bucheli, (olivier.bucheli@htceramix.ch), HTceramix SA, ***Participation of Switzerland in the International Energy Agency Implementing Agreement, Annex XVIII (SOFC)***, (SB)

[32] A. Hintermann (alphons.hintermann@bfe.admin.ch), ***Highlights in the Swiss Fuel Cell R&D Programme 2004, Report to the IEA ExCo Advanced Fuel Cells***, Seoul, October 2004

[33] ***1st Fuel Cell Research Symposium*** 18. März 04, ETH Zürich www.nonmet.mat.ethz.ch/news_events/conference/Fuel_Cell_Research_Symposium_040318

[34] ***2nd Fuel Cell Research Symposium Modelling and Experimental Validation***, DLR Stuttgart, 3-4. März, 2005, www.fuel-cell-mv2.dlr.de

[35] ***3rd Fuel Cell Research Symposium on Modelling and Experimental Validation***, März 06, Empa Dübendorf www.empa.ch/plugin/template/empa/1032/*/---/l=1

INDUSTRIELLE UND VERFAHRENSTECHNISCHE PROZESSE VTP

Martin Stettler, BFE
martin.stettler@bfe.admin.ch

Quelle: Ciba/ETHZ

Reaktor für Pigment-Herstellung

In den Reaktoren der Spezialitäten-Chemie werden unterschiedlichste Produkte im Batch-Verfahren hergestellt. Entsprechend unterschiedlich ist der Energiebedarf. Gelingt es, auf Basis der Produktionsdaten (z.B. Betriebsvorschrift) den Energiebedarf für die Herstellung der Produkte mit entsprechenden Prozessmodellen genügend verlässlich vorauszubestimmen, kann die Spezialitätenchemie künftig energieeffizienter produzieren und die Energiekosten für diese Produkte senken.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nach den Sektoren Verkehr und Haushalte ist der Sektor Industrie mit 20% des gesamtschweizerischen Endenergieverbrauchs der drittgrösste Energieverbraucher. Bei industriellen, verfahrenstechnischen Prozessen kann von einem Sparpotenzial von mindestens 20% ausgegangen werden. Das Programm erarbeitet Methoden und Werkzeuge zur Steigerung der Energieeffizienz und Integration von erneuerbaren Energien in industriellen, verfahrenstechnischen Prozessen und deren Infrastruktur. Auf Basis des *Konzepts der Energieforschung des Bundes* und einer punktuellen Branchenbefragung wurden folgende drei Programmschwerpunkte für die Periode 2004-07 abgeleitet:

- ***Prozessintegration / Prozessoptimierung***
- ***Verbesserung komplexer Produktionsverfahren***
- ***Effizientere Trocknungsverfahren***
- ***Nachhaltiger Umgang mit Energie und Ressourcen***

Im Berichtsjahr lagen die **Programmschwerpunkte** bei der ***Prozessintegration/ Prozessoptimierung komplexer Prozesse sowie der Effizienz in Trocknungsprozessen***. Eine wichtige Aktivität im Berichtjahr war die Bekanntmachung des Programms mit seinen Möglichkeiten in der Industrie.

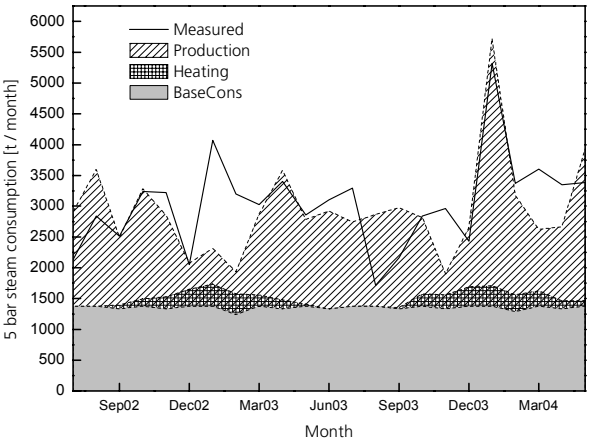
In der Industrie sind thermische Prozesse in der Regel auf Qualität optimiert, hingegen ist die Energieeffizienz dieser Prozesse unbekannt. Dies will die Industrie offenbar nun angehen, es ist eine erhöhte Nachfrage für **Prozessanalysen** und **Prozesssimulationen** (Modellierung) festzustellen. Die **Möglichkeiten und Grenzen** der **Integration** von **erneuerbaren Energien** in **bestehende Prozessketten** ist ein weiterer Punkt, der die energieintensive Industrie im stärker beschäftigt. Ein gemeinsamer Workshop (voraussichtlich 04.06) mit der EnAW mit Industrievertretern, Vertreter aus Bildung und Wissenschaft wird u.a. einen Input betreffend der neuen Forschungsschwerpunkte und -ziele für die nächsten vier Jahre liefern.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

PROZESSINTEGRATION UND -OPTIMIERUNG

Das Projekt ***Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants*** [1] hat zum Ziel, mit geeigneten Modellen (Top-down und Bottom-up) ein verlässliches Vorhersage- und Optimierungsinstrument für den Energiebedarf chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe zu entwickeln. Leitziel ist es, den produktspezifischen Energiebedarf (Elektrizität, thermische Energie) aufgrund der jeweiligen Produktprozessdaten (Betriebsvorschrift) zu schaffen.

Im Berichtjahr wurde das Modellierungstool für den Bottom-Up-Ansatz auf eine neue technische Grundlage (Matlab) gestellt. Damit konnte auch die Verwaltung der verschiedenen Daten sowie die Dateneingabe mittels automatischer Einlesung der Produktionsdaten ins Modellierungsprogramm verbessert werden. Mit einem neuen Modell wurde versucht, mit Hilfe der multivariaten Statistik den Energiebedarf pro Produkt aus dem Gesamtverbrauch eines Energieträgers abzuleiten. Dieser Ansatz brachte jedoch keine Verbesserung der Resultate (Fig. 1). Einen ersten Hinweis auf ungenügende Energieeffizienz gibt der relativ hohe Dampf-Grundverbrauch (Stand by), welcher von der Produktion weitgehend unabhängig ist. Die Top-Down Modellierung des Elektrizitätsverbrauchs zeigt ähnlich divergierende Resultate (Korrelation 0,54). Allerdings gilt zu bemerken, dass während der Messperiode über 40 verschiedene Produkte hergestellt wurden. Damit handelt es sich um ein komplexes, sich dauernd veränderndes System. Mit zusätzlichen Messungen von weiteren Dampf- und Stromverbrauchern sollen die Modelle noch deutlich verbessert werden.



Figur 1: *Dampfverbrauch - Vergleich zwischen Messung und Modellierung für eine Vorhersage über 23 Monate – Korrelation 0,56*

Das Forschungsprojekt ***Efficient Energy Conversion in the Pulp and Paper Industry, EECP-PI*** [2] fügt sich mit einer Fallstudie in das internationale Projekt *Novel Technologies für Energy Efficiency an Eco-Industrial Clusters in the pulp and Paper Industry, E³PAP* ein. Die schweizerischen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die energieintensiven Prozesse der Lignin- und Celluloseherstellung am Beispiel Borregaard. Die

verwendete Methode ermöglicht speziell bei komplexen verfahrenstechnischen Prozessen, durch Prozessintegration Energie- und Wassersparpotenziale zu identifizieren und daraus Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion der CO2-Intensität abzuleiten und einem ökonomischen Nutzen gegenüber zu stellen.

Figur 2: *Abgasreinigungsanlage Borregaard*

Der Schwerpunkt der Aktivitäten im ersten Berichtsjahr lag auf der Erfassung der technischen und chemischen Prozesse und deren Energieversorgung sowie der Sammlung und Analyse von Messwerten und Daten. Diese Daten wurden einer Plausibilisierung unterzogen und wo nötig korrigiert. Es wurden die Biomasse-Prozesse (Holz, Fasern, Lignin) thermodynamisch modelliert und bilanziert. Erste Indikatoren zur Beurteilung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz konnten für die Dampferzeugung und Dampf-Verbraucher gefunden werden. Einer der wichtigsten ist die Rückgewinnungsrate des Dampfkondensats, welche heute bei rund 31% liegt. Als Folge wurden die Prozessbereiche identifiziert, für die sich eine Kondensatrückgewinnung lohnen würde. Das Rückgewinnungspotenzial liegt bei ca. 80 t/h Kondensat, was einem Sparpotenzial von 60 MW Wärmeleistung entspricht. Die konsequente, Kondensatrückgewinnung und -Nutzung ist also eine grundlegende Massnahme bei Dampfnetzen. Damit der minimal nötige Energiebedarf der thermischen Prozesse ermittelt werden kann, ist die EPFL daran, sämtliche warme und kalte Ströme der relevanten Prozesse zu erfassen und ins Prozess-Modell aufzunehmen. Die Prozessmodellierung erfolgt mittels der Software *Belsim*. Auf Basis dieser Ergebnisse und der effektiven Prozessdaten, wird dann eine gezielte Optimierungsstrategie abgeleitet werden können.

Das Projekt ***HORTISOL – Energetische Prozessintegration in Gewächshauskulturen*** [3] hat zum Ziel, eine Software zu entwickeln, mit der die wachstumsrelevanten Vorgänge (Prozesse) in einem Produktionsgewächshaus simuliert werden können. Geplant ist ein Werkzeug, mit dem die klimatische Umgebung simuliert respektive optimiert werden kann und letztlich den Schlüssel zur Rentabilität liefern wird. Auf Basis der photosynthetisch aktiven Strahlung, dem CO_2-Gehalt der Innenluft und der Temperatur können mit der Software *HORTISOL* entsprechende Klimastrategien abgeleitet werden, die letztlich zu optimierten Jahreskosten (Investitions-, Energie- und Betriebskosten), höherem Gewinn durch einen früheren Ertrag und hoher Produktivität führen.

Im Berichtsjahr konnten alle fünf Prozesse eines Gewächshausproduktionssystems Pflanzenwachstum, Feuchte, Helligkeit, Temperatur und CO_2 modelliert werden. Vorderhand beschränkt sich das Modell auf die Tomatenpflanze, welche z.Z. vereinfacht durch eine Kultursaison modelliert ist. Noch unklar ist die Verteilung (Planzenteile)der laufend produzierten Glukose im Wachstumsprozess. Mit dem Aufbau einer Gewächshaus-Datenbank, welche konkrete Messungen und Produktionsdaten aus der Praxis umfasst, sollen in einer späteren Phase die Modelle optimiert und die Aussagekraft der Simulation praxistauglich gemacht werden.

VERBESSERUNG KOMPLEXER PRODUKTIONSVERFAHREN

Leitziel des Projekts ***Steigerung der Energieeffizienz in der Backstein-Produktion*** [4] ist die Erarbeitung eines für die Schweizer Backsteinindustrie einsetzbares computergestütztes Prozessoptimierungstool. Dieses soll letztlich eine Prozessführung nach dem minimal möglichen Energieeinsatz bei gleich bleibender Qualität ermöglichen, unter Berücksichtigung der relevanten Einflussparameter für Produktion und anlagespezifischen Gegebenheiten. Dabei steht die Optimierung bestehender Anlagen im Zentrum. Die Backsteinproduktion ist sehr energieintensiv und der Wärmebedarf wird primär mit fossilen Energieträgern (Erdgas) gedeckt.

Im Berichtsjahr wurden anhand der *Ziegelei Fisibach AG* in einem ersten Projektschritt die Energie-Benchmarks bestimmt und mit der Literatur verglichen. Im Rahmen der Prozessanalyse der Produktionsanlagen wurden zudem umfangreiche Messungen (FH-Semesterarbeit) mit dem Ziel,

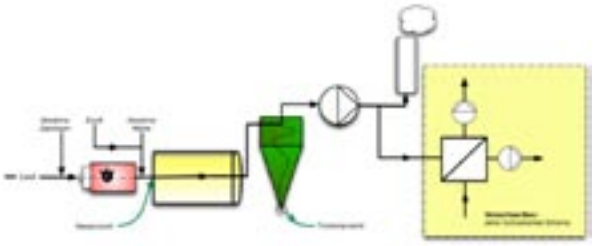
zu- und abgehenden Massen- und Energieströme in den Teilsystemen Tunnelofen und Trockner zu bestimmen, durchgeführt. Die bisherigen Arbeiten brachten folgende Erkenntnisse:

- Die energetische Optimierung muss im Tunnelofen ansetzen und nicht bei der Trocknung
- Die Brennkurve (Temperaturniveau in den Ofenzonen) kann optimiert werden, wenn das Rohmaterial in gleichmässiger und bekannter Zusammensetzung zugeführt wird
- Die im Trockner benötigte Wärme kann unter optimalen Verhältnissen nahezu vollständig mit Abwärme aus dem Tunnelofen gedeckt werden
- Anlagen sollten entweder auf Volllast oder auf Teillast optimiert werden (möglichst keine Mischbetrieb)

Für die wissenschaftlich seriöse Entwicklung eines brauchbaren Prozesssimulationstools müssten noch erhebliche Vorarbeiten geleistet werden, welche den Rahmen dieses Projekts sprengen. Die Ursache liegt in der Komplexität der thermischen Prozesse. Die weiteren Projektarbeiten auf die Sicherung der bisherigen Erkenntnisse sowie deren Dokumentation:

EFFIZIENTERE TROCKNUNGSVERFAHREN

Das Projekt ***Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trocknungsanlagen*** [5] hatte zum Ziel, neue technologische Verfahren zur Effizienzsteigerung bei der künstlichen Trocknung (Mais, Gras) zu identifizieren und zu überprüfen.



Figur 3: *Darstellung der Versuchsanordnung in der TA Willisau*

Der Hauptanteil der von der Anlage abfliessenden Wärmeströme macht die **Verdampfungs-Entalpie des Wasserdampfs** mit **rund 71%** in der Abluft aus. Die Wärmeleistung einer durchschnittlichen Trocknungsanlage liegt bei rund 4 MW. Heute werden nur etwa 5% des Wärmeinputs (meist durch Öl oder Gas) durch Brüden-Rückführung zurück gewonnen. Idee der Forschungsarbeit war, den Wasserdampf im Abgas mittel Platten-WT zu kondensieren und damit die WRG auf 10 - 20% zu verbessern, was knapp erreicht wurde (siehe Variante 3 unten). Die Wärmeübertragungsleistung während der Versuche lag im Mittel bei 36 kW und mittleren Volumenstrom von 5'000 m3/h. Ein wesentlicher Punkt der Versuchsreihe war auch die Frage, wie sich der Platten-WT betreffend Betriebsverhalten und Verschmutzung verhalten würde. An Stelle eines Filters wurde ein Düsenstock eingebaut, der die WT-Oberfläche abluftseitig mit Wasser besprühte, ohne periodische Besprühung würde der WT auf Grund der zunehmenden Verschmutzung verschliessen. Mit einem periodischen Betrieb des Düsenstocks (10 min. ein, 20 min. aus = 300 l/h) konnte eine kontinuierliche Verschmutzung verhindert werden und so eine gute Wärmeübertragung garantieren werden. Die ökologische und betriebswirtschaftliche Seite des damit verbundenen Wasserverbrauchs müsste bei der Weiterverfolgung dieses Ansatzes geprüft werden.

Zur Frage der **Verwendung der zurück gewonnenen Wärme** wurden bewusst nur innerbetriebliche Varianten untersucht, da die Anlagen meist in ländlicher Gegend stehen und sich keine geeigneten Wärmeabnehmer in der Nähe befinden. Es wurden **drei Nutzungs-Varianten untersucht:**

Variante 1: Vorwärmung der Prozesszuluft durch Auskoppelung der Abluftwärme steht in direkter Konkurrenz zu anderen Abwärmequellen, wie Abwärme der Produktionshalle, Mühlen, die technisch einfacher und kostengünstiger genutzt werden können.

Variante 2: Vortrocknung der Prozesszuluft, d.h. die Ausfällung des in der Zuluft enthaltenen Wassers mittels einer Absoptionskältemaschine (*DryKor-Anlage*, mit ausgekoppelter Abluftwärme) bringt lediglich eine Reduktion des Wärminputs

Figur 4: *Versuchsaufbau*

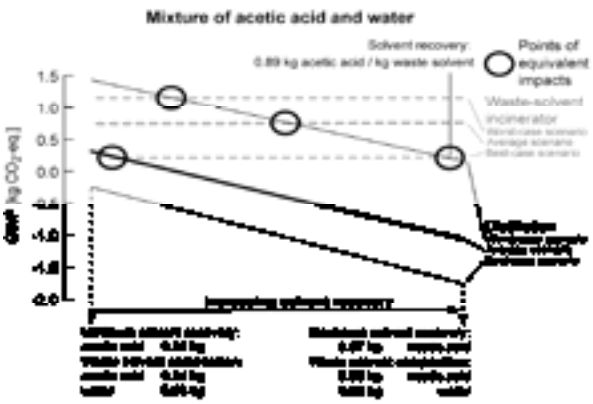
von 2%. Zudem sind die Frage der Regulierbarkeit, Anfahrverhalten und Betriebsstabilität heute noch offen.

Variante 3: Vortrocknung des Trocknungsgutes mittels eines vorgelagerten Bandtrockners bringt für sich eine Reduktion des Wärmeinputs von ca. 9%. Es liegt somit nahe, dem Bandtrockner anstatt, wie heute üblich feuchte Abluft (Brüde), trockenere und durch die ausgekoppelte Abluftwärme aufgewärmte Frischluft zuzuführen. Diese Kombination bringt **Einsparungen zwischen 16 und 19%**. Leider liegt diese Variante trotz den momentan hohen Energiepreisen bei einer **Payback-Zeit von 10 Jahren**. Die vorliegenden Resultate sind jedoch Hinweise, in eine Vortrocknung des Trocknungsgutes zu investieren und bei der Prozesswärmeerzeugung nach Alternativen (Umstellung auf Biomasse) zu suchen.

NACHHALTIGER UMGANG MIT ENERGIE UND RESSOURCEN

Das Projekt ***Abfall-Lösungsmittel (ALM)-Verwertung in der chemischen Industrie*** [6] hat zum Ziel, ein handliches PC-Programm ***ecosolvent*** zur Beurteilung der Abfalllösungsmittelverwertung nach ökologischen Gesichtspunkten zu entwickeln. Beurteilt werden die zwei wesentlichen Behandlungsoptionen von organischen ALM: (1.) Rückgewinnung von Lösungsmitteln durch Destillation und (2.) thermische Verwertung durch Verbrennen. Die **Projektschwerpunkte im Berichtjahr** lagen bei der **Weiterentwicklung der *ecosolvent*-Software**. Wichtige Erneuerungen sind, dass wichtige Emissionsflüsse und Ressourcen-Verbräuche separat ausgewiesen werden. Es kann auch eine Energiebilanz (kumulierter Primärenergiebedarf) und eine reine CO_2-Bilanz als Resultatausgabe gewählt werden. Weiter wurde die Bewertung potenzieller Abfalllösungsmittel-Transporte in der Software in die Software aufgenommen. Es wurde systematisch ALM-Gemische mit *ecosolvent* bewertet und einer umfassenden Sensitiviätsanalyse unterzogen. Die Unsicherheiten der einzelnen Modelle wurden ebenfalls untersucht (Bouding analysis, Monte carlo Analyse). Daraus konnten erste allgemeingültige Schlussfolgerungen zu den wichtigsten Lösungsmitteln formuliert werden.

Eine **Haupterkenntnis: Keine der ALM-Verwertungsmethoden ist grundsätzlich umweltfreundlich**. Die gemeinhin in der chemischen Industrie verbreitete Annahme, dass Recycling aus rein ökologischer Sicht grundsätzlich sinnvoller ist, trifft nicht vollumfänglich zu. In Folge konnten Daumenregeln für die 45 wichtigsten Lösungsmittel aufgestellt werden (Bsp. In Fig. 5). Es wird auch gezeigt, wie Daumenregeln für spezifische ALM-Gemische mittel der *ecosolvent*-Software abgeleitet werden können. Das Projekt wird im Sommer 2006 mit der Verbreitung der Resultate und der Umsetzung der Software in eine Vollversion abgeschlossen.



Figur 5: *Das Beispiel von Essigsäure und Wasser zeigt, dass ab einer Lösungsmittelrückgewinnung von 0.89 kg pro kg ALM die Destillation grundsätzlich die aus Umweltsicht zu bevorzugende Technologie ist*

Das Zusatzprojekt ***Ökoinventare von petrochemischen Lösungsmitteln (LM)*** [7] konnte im Berichtjahr abgeschlossen werden. Ziel war es, diese Lücke bei den Ökoinventaren von Lösungsmitteln zu orten und diese gezielt zu schliessen. So wurde bei Essigester, Ethanol, Terahydrofuran, Cyclohexan und Heptan eine Datenvollerhebung durchgeführt. Bei 32 weiteren LM wurden die Daten erhoben soweit diese verfügbar waren. Fehlende Daten wurden anhand von LM mit ähnlichen Prozessschritten abgeschätzt. Der chemischen Industrie stehen nun die Öko-Inventare für 50 Lösungsmittel zwecks Ökobilanzierungen zur Verfügung.

Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Programm unterstützte im Berichtsjahr insgesamt vier Projekte aus dem ETH-Bereich. Fachhochschulen (Luzern, Rapperswil) konnten in zwei Forschungsprojekte der Industrie in Form von Semester- und Diplomarbeiten eingebunden werden.

Eine Zusammenarbeit im Rahmen der IEA-Programme oder EU findet z.Z. nicht statt, da das Interesse und Engagement der Industriepartner zu gering ist. Die Industriepartner empfahlen, letztlich auch - wegen beschränkter Mittel und Ressourcen - das Programm rein national auszurichten. Beim Projekt der EPFL, Leni (Pulp and Paper) wird aber mit der Technischen Hochschule Montreal, Kanada zusammengearbeitet.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Als Erfolgsprodukt darf das Ökobilanzierungstool ***ecosolvent*** [6] der ETHZ erwähnt werden. Dieses steht kurz vor Abschluss und wird von der chemischen Industrie als taugliches Beurteilungswerkzeug bei der Verwertungsfrage von Abfalllösungsmitteln nachgefragt. Erfreulich ist auch der vermehrte Einbezug von Fachhochschulen in Industrieprojekten.

Mit dem Projekt ***Effizienzverbesserungen in Trocknungsanlagen*** [5] wurde gezeigt, dass eine effizientere Wärmerückgewinnung bei Trocknungsprozessen technisch zwar machbar ist, der Ansatz trotz hohen Energiepreisen aber unwirtschaftlich bleibt und es sinnvoller ist, die Prozesswärmeerzeugung von fossilen Energieträgern z.B. auf Biomasse umzustellen. Diese Ergebnisse dienen den rund 70 Trocknungsbetrieben bei ihren anstehenden Investitionsentscheiden.

Rückschläge respektive Verzögerungen gab es bei den Forschungsprojekten, welche die messtechnische Erfassung von thermischen Prozessen und deren mathematische Modellierung zum Ziel hatten [1, 4]. Der **organisatorische Aufwand** und die Anforderungen an die **Qualität bei Anlage-Messungen** wurden von den Projektteams **unterschätzt**. Wegen unbrauchbarer Messresultate konnten die vorgegebenen Ziele nicht vollumfänglich erreicht werden. Dieser Problematik muss in Zukunft mehr Beachtung geschenkt werden.

Im **April 2006** wird das BFE eine **Tagung *Technologieförderung industrieller Prozesse*** und anschliessend eine **Projektausschreibung** u.a. für Forschungsprojekte durchführen. Mit diesem pro-aktiven Vorgehen sollen die energieintensiven Unternehmen motiviert werden, innovative Energie-Projekte durchzuführen und damit den Grundstein legen, Prozesse energieeffizienter und CO_2-ärmer zu gestalten.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)

Auf der Programmseite www.bfe.admin.ch (Angebote Unternehmen) sowie unter den angegebenen Internet-Adressen sind weitere Berichte und Informationen verfügbar.

[1] Andrej Szijjarto, (andrej.szijjarto@chem.ethz.ch), Institut für Chemie- und Bio-Ingenieur-Wissenschaften, Gruppe für Umwelt- und Sicherheitstechnologie, ETH *Zürich:* ***Modeling and Optimization of Energy Consumption in Multipurpose Batch Plants,*** Laufzeit 04-07 (JB).

[2] F. Maréchal und Z. Perrin-Levasseur, (francois.marechal@epfl.ch), Laboratoire d'Energétique Industrielle, EPF *Lausanne:* ***Efficient Energs Conversion in the Pulp and Paper Industry,*** Laufzeit 05-08 (JB).

[3] F. Bonvin, (michel.bonvin@hevs.ch) FH/HEVs *Sion:* ***Intégration des processus énergétiques dans les cultures sous abris, Laufzeit*** *05-06*(JB)

[4] Jörg Peter Wurche, (peter.wurche@kieferpartners.ch) und Christian Gubler, Ziegelei Fisibach AG, *Bauma:* ***Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion,*** (JB) Laufzeit 05-06, http://www.fbb.ch

[5] Stefan Krummenacher (stefan.krummenacher@energie-treuhand.ch) und J. Bürli, Trocknungsanlage *Willisau:* ***Neue Verfahren zur Effizienzverbesserung in Trockungsanlagen,*** (SB) Laufzeit 05

[6] Christian Capello (christian.capello@chem.ethz.ch) ETH *Zürich:* ***Abfall-Lösungsmittelverwertung in der chemischen Industrie, Phase 2,*** (JB) Laufzeit 03-06

[7] Jürgen Sutter und Christian Capello (christian.capello@chem.ethz.ch) ETH *Zürich:* ***Ökoinventare von petrochemischen Lösungsmitteln*** (SB) Laufzeit 04-05

PROGRAMME SOLAIRE ACTIF – CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR

Jean-Christophe Hadorn
jchadorn@baseconsultants.com

DEMOBOITE – EPFL/LESO PB

Verres solaires de couleur

Des échantillons de verre, de taille A4, ont été recouverts avec succès d'un "nano-dépôt" homogène, de coloris différents, selon la vitesse du dépôt et selon sa composition ; ce qui permet d'envisager la production de verre solaire coloré pour des capteurs ou vitrages, tout en conservant les propriétés de transparence énergétique du spectre solaire à plus de 92% (document et brevet : EPFL / LESO PB).

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le marché solaire thermique en Suisse est de l'ordre de 30'000 m^2 de capteurs installés par an. Les fabricants suisses peinent à exporter, et le marché domestique est sans croissance. Nous avions en Suisse en fin 2005 environ 330'000 m^2 de capteurs vitrés installés, 30'000 m^2 de capteurs à tubes évacués, 5'000 m^2 de capteurs non vitrés sélectifs et 210'000 m^2 de capteurs non vitrés.

Au total, en considérant 360'000 m^2 de capteurs vitrés, la puissance installée est de 250 MW, et l'énergie thermique produite est de l'ordre de 140 GWh/an.

Cependant, le potentiel de substitution énergétique de combustibles fossiles par l'énergie solaire thermique est loin d'être atteint. On sait que 1 m^2 de capteurs solaires pour la production d'eau chaude sanitaire permet de produire annuellement environ 60% des besoins en eau chaude sanitaire d'une personne. Pour passer des 360'000 m^2 installés à 7'000'000 m^2 en 15 ans, il faudrait poser en Suisse 440'000 m^2/an. On en est loin. Les freins sont dans les coûts d'investissement, dans l'esthétique des capteurs en toiture, dans l'absence de stockage à long terme dense et compact ; ce qui impose un appoint important dans notre climat.

Pour l'année 2005, nous avons orienté les travaux de R&D, dans le respect de notre programme 2004-2007 que la CORE a approuvé en 2004, sur les points forts suivants :

- les tests de qualité des capteurs du marché et le soutien aux industriels,
- la mesure comparée de systèmes combinés et l'affinage de la méthode de comparaison,
- le stockage de chaleur à court terme dans des nouveaux matériaux ou systèmes (innovation recherchée),
- l'optimisation du déphaseur thermique diffusif et son intégration dans un système (innovation),
- la poursuite du développement du procédé de verre solaire de couleur (innovation),
- le nouvel outil de simulation Polysun 4.0 (innovation),
- l'édition d'un livre international sur le stockage thermique pour les maisons solaires.

Les buts du programme sont l'amélioration de la productivité des systèmes solaires combinés (kWh/m^2), la diminution du recours à l'énergie fossile en appoint (passer la barre du 50% solaire) et la recherche de solutions pour le stockage de chaleur et de froid solaire.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2005

COMPOSANTS DE LA TECHNIQUE SOLAIRE

Pour garantir la qualité des systèmes *in fine* sur le marché, il convient de maintenir des composants de qualité. La réputation de la HES de Rapperswil (SPF) pour les tests de capteurs et pour les conseils d'amélioration que le laboratoire fournit est mondiale. En 2005, le SPF a réalisé les travaux suivants [1 A – C] :

1. ***Mesure des caractéristiques et test de qualité des capteurs solaires :*** une année record pour les tests de capteurs : plus de 70 sont passés au banc d'essai du SPF sur les 100 reçus au SPF cette année. L'origine des produits est surtout l'Allemagne, la Suisse et l'Autriche, un peu la France et l'Italie et les produits qui sont à destination du marché suisse. On constate cependant que la qualité moyenne des capteurs ne s'améliore pas, aucun label de qualité SPF n'a pu être donné à un capteur ! Les fabricants semblent oublier des principes de base connus depuis ces dernières années (ventilation, joints, colles) ; de nouveaux fabricants également.
2. ***Les capteurs à tube sous vide*** représentent toujours 30% des tests. La qualité des isolations des capteurs provenant d'Asie est problématique dans certains cas à température de stagnation. Et des tentatives de manipulation de rapports de tests du SPF ont été perçues.
3. ***Un insolateur artificiel a été projeté et est en cours d'installation***. Il permettra de multiplier par 3 la durée possible pour des tests, l'année 2004 ayant montré la difficulté de tenir un programme de test lors de périodes d'été insuffisamment ensoleillées. Or ces tests constituent aussi des recettes importantes pour le SPF en complément des apports de l'OFEN.
4. ***Les pertes en face* avant** d'un capteur ont fait l'objet de travaux particuliers pour essayer de les réduire encore, par exemple, en reprenant le concept du double vitrage, verre ou *Teflon*. Le gain est faible. Et un verre *Antireflex* qui est sur le marché depuis peu, trouve peu de débouchés, car le prix est un argument important pour un capteur dans un marché compétitif.
5. ***Les absorbeurs à tôle d'aluminium*** vont revenir en force sur le marché, comme

annoncé dans notre rapport 2004, du fait du prix très élevé du cuivre. Le soudage des tubes de cuivre sur l'aluminium est cependant une difficulté. Le soudage au *laser* n'est pas totalement au point et le SPF a contribué par des tests de qualité à confirmer la durabilité du procédé d'un fabricant, qui n'avait pas passé les tests dans un institut européen. Il contestait à juste titre en fin de compte les résultats. Des développements dans les absorbeurs en aluminium et technologie *Roll bond* sont à prévoir, ainsi que dans les absorbeurs en acier avec tubes plastiques.

6. Le SPF a ainsi obtenu la première certification ***Solar Keymark* pour un absorbeur Al-Cu** soudé au *laser*, mais pour un fabricant non suisse. Les problèmes de corrosion à long terme de la soudure sont donc maîtrisés. Et le SPF en réseau avec des laboratoires européens a développé des procédures de tests liés au certificat *Solar Keymark*. Les normes européennes de tests de capteur et de systèmes clé en mains sont également pour le moment en permanence en discussion et le SPF participe à ce travail.

7. Le facteur IAM (*Incident Angle Modifier*) est insuffisamment compris dans le milieu solaire et même dans la norme européenne ! Des actions pour une meilleure connaissance puis un transfert de savoir sont à envisager. Une thèse sera lancée en 2006. D'autres points sont encore peu précis dans la norme européenne EN12976 et nécessitent beaucoup de temps de discussion avec l'Europe si nous voulons avoir une influence dans le sens de la science et des intérêts de nos fabricants.

8. Les équipements informatiques du centre de test sont maintenus en qualité, et le passage à une base de données générique *mySQL* a été réalisé. La publication en ligne des résultats de test et la possibilité de comparaison sont très appréciées des utilisateurs du site www.solarenergy.ch. L'automatisation depuis la saisie des données jusqu'au rapport final sur le site est nécessaire et réalisée chaque année de plus en plus complètement.

9. Le banc de test des capteurs sous vide pour la grêle a dû être revu et n'a pu être opérationnel en 2005.

10. L'accréditation ISO 17025 du laboratoire (STS 301) a été renouvelée. L'accréditation DINCERTCO (pour le "*DIN geprüft*") aussi.

11. ***Eau chaude sanitaire*** *:* la réfection complète des installations en toiture du SPF n'a permis de tester que 3 systèmes. Un système à thermosiphon avec 15 tubes à vide et une cuve de 150 L ont été testés. Les résultats sont bons surtout dans le sens d'une réduction du coût du kWh. L'esthétique est cependant un facteur limitant pour ce type de solutions.

Figure 1 : *test de systèmes d'eau chaude sanitaire à thermosiphon, mais à tubes sous vide au SPF et installation d'une cuve de stockage en verre pour étudier les mouvements thermiques internes (doc. SPF)*

12. Les travaux de la Tâche 27 ***Performance of solar façade components*** du Programme *Solar Heating and Cooling* (SH&C) de l'AIE sur les réflecteurs et les verres anti-reflet se sont terminés. Le rapport final a été publié. Une nouvelle Tâche préparée par le Fraunhofer ISE et le SPF a été acceptée par le Comité Exécutif du Programme (SH&C) de l'AIE. Elle se focalisera sur les polymères dans tous les composants d'une installation solaire thermique.

13. Les tests de couvertures transparentes à Rapperswil et à Davos, commencés par le SPF il y a 20 ans, sont terminés. Les premiers résultats ont été publiés lors d'un Symposium préparatoire, tenu à Freiburg i. B., en vue d'une future Tâche du Programme SH&C de l'AIE.

La plupart des couvertures en plastique ont des pertes importantes de transmission après 20 ans et ne sont pas adaptées au solaire. Le rapport final sera publié en 2006, certains fabricants ayant déjà demandé de rendre les résultats anonymes.

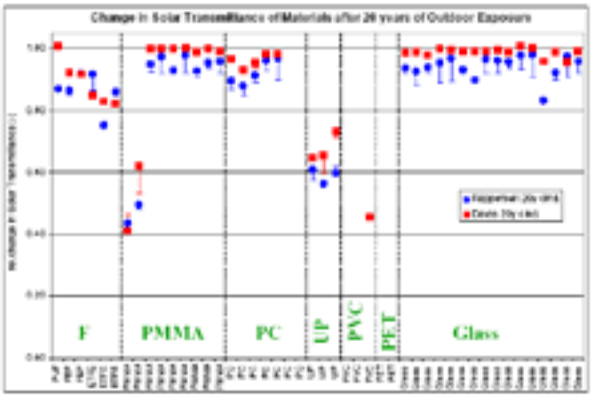


Figure 2 : *résultats de 20 ans de tests de couvertures transparentes à Rapperswil et à Davos (doc. SPF)*

14. Divers travaux spécifiques ont été réalisés par le SPF pour l'industrie (dégazage dans les capteurs, tests de revêtement d'absorbeurs à haute température, test de résistance de connecteurs entre capteurs, mesure de la caractéristique F' de 3 absorbeurs). Comme nous l'avions demandé il y a plusieurs années, le SPF a poursuivi son acquisition de savoir-faire avec un logiciel de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) de amnière à pouvoir utiliser cette méthode d'investigation dans les projets de recherche et à proposer ceci comme un nouveau service à l'industrie. Le rôle du SPF comme soutien à la qualité des produits mis sur le marché est ici très important. Une infrastructure et des compétences doivent être maintenues à Rapperswil pour ce faire.

15. Deux verres ont reçu la certification "**Solarglas**" du SPF en 2006. Ce sont désormais 11 verres qui ont été certifiés et ce label "suisse" va petit à petit s'imposer sur le marché.

16. Deux mises à jour du **CD-ROM SPF-Info CD 2004** ont été faites avec notamment une version démonstration de Polysun 4. Une version nouvelle sera produite en 2006.

17. Le téléchargement des outils du SPF (logiciels et CD) après paiement par carte bancaire ou de crédit a été rendu accessible sur internet. Le site internet du SPF est toujours très consulté et nécessite une maintenance constante. Le SPF a choisi l'option de faire migrer ses serveurs vers le centre de calcul de la Haute Ecole de Rapperswil pour des questions de sécurité et de coût. La migration a été effectuée avec succès.

Le projet de ***Cuiseur thermique ultra-léger et pliable*** [3] (pas plus de 2 kg, y compris la casserole), bon marché et transportable, s'est achevé au Centre de compétences neuchâtelois en la matière (CNCS Centre neuchâtelois de cuisine solaire). Après une sélection de 2 géométries possibles en 2004, un prototype a été construit sur la base de la géométrie nouvelle : lamelles de miroir de Fresnel montées en ciseau qui s'orientent aisément et permettent de protéger du vent la casserole, tout en se déployant sur une paraboloïde pour un facteur de concentration de l'ordre de 15. Le prototype a été testé avec succès lors de différents voyages. Les tests finaux devraient se poursuivre début 2006 et une série de 30 sera commercialisée. La puissance est de l'ordre de 85 à 100 W (soit la puissance nécessaire pour faire bouillir environ ½ litre d'eau en ½ heure) et la précision de l'ensemble une fois déplié est bonne.

Nouveaux matériaux : une percée : l'EPF de Lausanne développe depuis 2003 des couches minces interférentes permettant d'envisager des verres solaires de couleur, afin de donner plus de liberté architecturale aux capteurs solaires. En 2005 des avancées importantes ont pu être accomplies :

- Le procédé sol-gel a été testé avec de nouveaux composés : le spectre des matériaux candidats a été élargi des oxydes compacts aux matériaux poreux (SiO_2), aux fluorures (MgF_2) et aux films minces de nano-composites fluorures/oxydes,
- la microscopie électronique a été utilisée avec succès pour visualiser en direct les nanostructures créées par les différentes phases du procédé sol-gel qui commence à être très bien maîtrisé,
- les multicouches d'oxydes préparées en sol-gel montrent des efficacités énergétiques élevées, dans la cible fixée,
- l'épaisseur de la multicouche a pu être notablement réduite tout en augmentant ses qualités.

Le but principal de l'année 2005, à savoir le dépôt d'une multicouche homogène sur une surface A4, sans défauts visibles, en différents coloris, a été atteint [2]. Cela augure bien de la suite : le dépôt sur une surface de l'ordre du m^2 représentative de capteurs solaires ou de vitrages. La mise au point du procédé devra pour ce faire être poursuivie.

OUTILS DE SIMULATION

Polysun 4 [1 D] : Polysun 4.0 a été un des gros travaux du SPF en 2006 (développements finaux et très nombreux tests de validation), rendu difficile par le départ de deux collaborateurs. Il est disponible depuis décembre 2005 sur le

Figure 3 : *prototypes de cuiseur solaire extra-léger et pliable développé en 2005 et test (Doc. Götz) : (v.l.n.r.) Prototyp des Projekts im Sommer 2005 : extrahohe Version (80 cm); ein zusammengeklappter Prototyp (60 cm hoch); ein mit dem Kocher gebackenes kleines Brot.*

site internet www.solarenergy.ch. De nouvelles fonctionnalités et surtout la possibilité de combiner graphiquement des éléments (mode « Designer ») pour faire un système sont désormais disponibles, dans une version entièrement ré-écrite en Java. Polysun 4 a été présenté en avant première durant 2 symposiums en Allemagne et 1 à Berne en 2005. Une validation reste cependant à entreprendre, mais elle devient difficile en totalité de par la modularité désormais possible. La hotline de Polysun 3, qui doit toujours être maintenue, a reçu 200 appels en 2005.

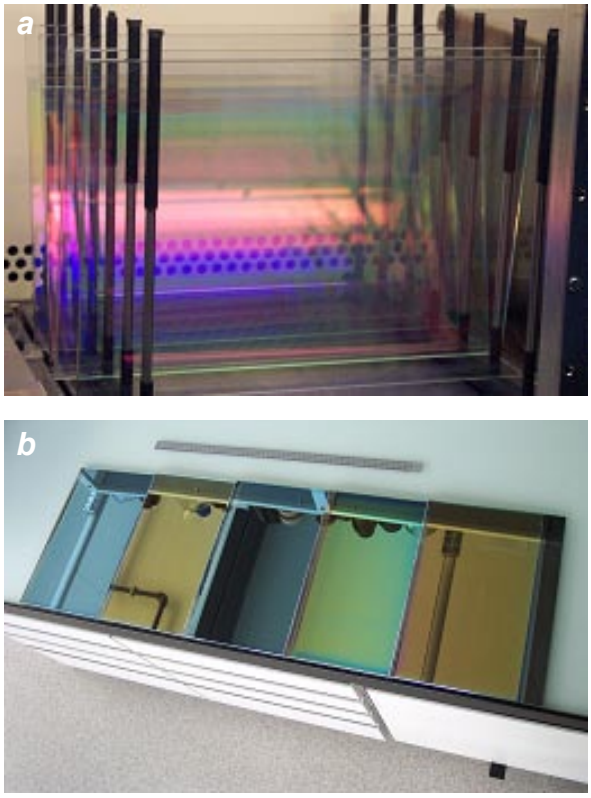


Figure 4 : *préparation des échantillons A4 de verre (a) et dépôts obtenus de différents coloris selon la vitesse du procédé sol-gel (b) (doc. LESO PB)*

SYSTÈMES ET INSTALLATIONS SOLAIRES POUR LE BÂTIMENT

Systèmes combinés : mesures et optimisation [1 B, 27] :

1. **Systèmes combinés** : la campagne Kombi-Kompakt+ de 2004 a eu un écho très favorable. Le rapport final a été revu pour un fabricant qui était à juste titre défavorisé dans un calcul. Le rapport V2 2005 est disponible sur notre site. Le banc test, complexe à mettre en œuvre, a été complété à la demande des fabricants par une installation d'appoint à bois. Il est également nécessaire de pouvoir mesurer la teneur en eau des granulés de bois. Il sera opérationnel en 2006. Le travail a été orienté dans l'axe de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE vers la recherche théorique d'améliorations possibles pour les systèmes combinés avec stockage à eau. Une liste de points d'amélioration a été établie et des simulations ont débuté sur des systèmes à cuve sans pression. Ce travail fait aussi partie du groupe NEGST (*New Generation of Solar Thermal Systems*), projet de l'UE dans lequel le SPF participe.
2. **Modèle de chaudière et brûleur :** les tests des combi-systèmes ont montré que le modèle de chaudière et surtout brûleur de TRNSYS n'est pas assez précis. Le SPF a entrepris un développement de modèle, avec l'aide de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE, qui est nécessaire à l'échelon mondial surtout pour le mazout. Les Pays-Bas ont des modèles sophistiqués de brûleur à gaz, mais ils ne sont pas tous disponibles publiquement et encore moins en Fortran dans TRNSYS.
3. **La pompe *low flow*** est toujours un point délicat d'une installation. Il n'y en a pas sur le marché de totalement satisfaisante. Le SPF teste fréquemment de nouveaux candidats pour pouvoir diminuer le bruit, la consommation et

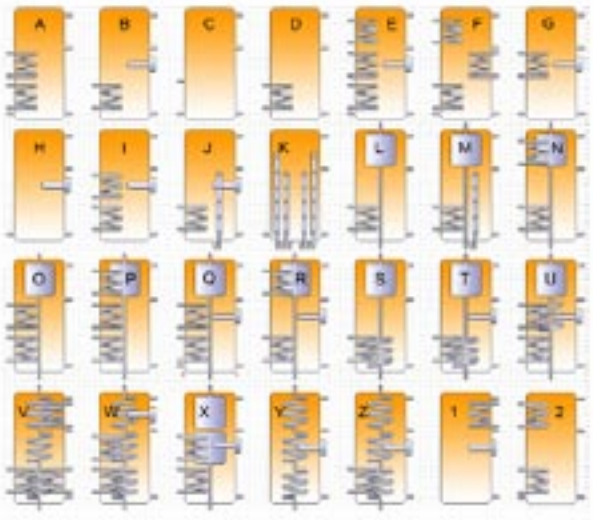


Figure 5 : différents choix de configuration de cuves à simuler dans Polysun 4 ; aucun autre outil sur le marché ne permet le calcul de certaines configurations (doc. SPF)

augmenter la durée de vie. Une pompe a été testée au banc *ad hoc* en 2005, mais les tests doivent se poursuivre pour conclure.

4. **Une cuve de 1'150 litres** en verre a été construite pour étudier les phénomènes de convection et de stratification dans les stocks à eau.

PRODUCTION DE CHALEUR À HAUTE TEMPÉRATURE ET D'ÉLECTRICITÉ

Le projet de prototype de mini centrale solaire de production d'électricité *« Centrale solaire pilote de 10 $kW_{él}$ Small Power Systems (SPS) »* qui a montré sa faisabilité conceptuelle, a été arrêté à fin 2004 faute de moyens financiers en taille critique.

La partie « turbine à cycle organique de Rankine » développée par le LENI de l'EPFL devrait être poursuivie dans d'autres projets liés à la cogénération à partir de la biomasse.

La partie « Capteur Extra plat » de SunAlpes à Lausanne devrait déboucher sur une implantation des deux lignes de capteurs à concentration construites entre 2000 et 2003 sur le site de l'EPFL, dans un processus industriel dans une commune des Alpes suisses, pour la production d'un produit alimentaire, avec un financement cantonal et privé.

STOCKAGE DE CHALEUR

Optimisation d'installation de stockage saisonnier diffusif

L'objectif principal de ce projet est de pouvoir simuler et optimiser l'installation pilote de Serso, à Därlingen, où l'on dégivre un pont depuis 1998 avec de l'énergie solaire et un stockage saisonnier de chaleur dans le terrain. Des règles pour prédimensionner de telles installations doivent être établies pour diverses conditions et une application TRNSED du modèle de simulation de l'ensemble de l'installation est envisagée.

La redondance des mesures à disposition a permis de contrôler leur précision, de les corriger et de remplir les trous de mesure (qui sont peu nombreux et de courte durée) pour deux années consécutives. Le travail a permis de valider et de calibrer avec succès le modèle de simulation du stockage utilisé dans cette étude. Le volume utile du stock est ainsi de 46'000 m^3 et sa capacité de 102 GJ/K.

Le modèle de stockage calibré a été intégré dans un modèle complet de l'installation. Ce dernier a été calibré sur les mesures. Les principaux paramètres thermiques du modèle de pont capteur et dégivrant ont été ajustés, de même que les principaux paramètres de la régulation du système. Le modèle du système complet permet ainsi de reproduire de façon satisfaisante la dynamique à cours terme et le bilan annuel du système. Il sera utilisé en 2006 pour l'analyse paramétrique permettant de tirer des règles génériques de dimensionnement [5].

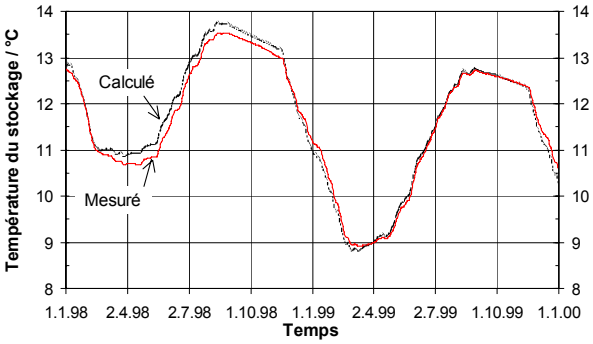


Figure 6 : calage du modèle numérique TRNDST sur 2 années de mesures à Serso (doc. LEEE)

Stock journalier pour le rafraîchissement de locaux [6, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] : dit aussi «déphaseur thermique diffusif», le projet de nouveau concept de stockage journalier de "frais" nocturne pour une pièce ou un bâtiment s'est poursuivi avec succès.

Le concept permet de déphaser à loisir une onde de température portée par un flux d'air, pour permettre de faire coïncider offre et demande de "frais". La preuve du concept a été apportée en 2003 et 2004. En 2005, les travaux ont permis :

- d'étendre le développement de prototype à une géométrie en «tubes» (structure de stockage empilée perpendiculairement au flux d'air), avec utilisation de l'eau comme matériau de stockage (nouveau). Le résultat est la nécessité de disposer d'environ 0.5 m^3 par 100 m^3/h

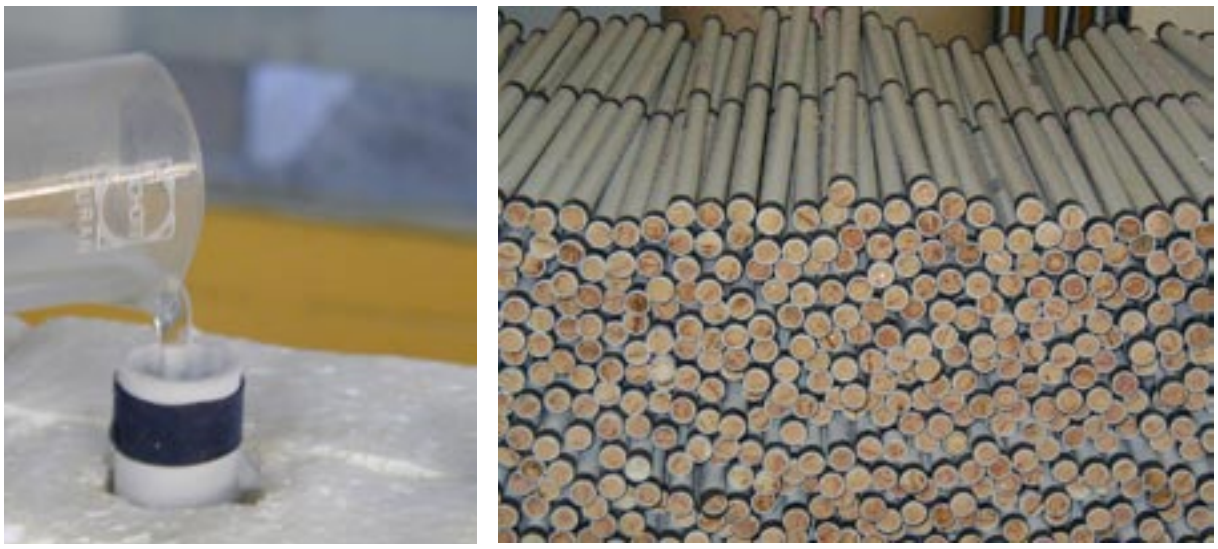


Figure 7 : *tubes de stockage à eau et procédure de remplissage (doc. CUEPE)*

d'air pour le déphasage de 12 h de l'oscillation jour/nuit.

- de construire un nouveau prototype adapté aux contraintes du stockage en eau et amélioré au niveau de la gestion du flux d'air.
- de caractériser (pour les systèmes à plaque et les systèmes à tube) le lien entre précision de mise en œuvre, inhomogénéité du flux d'air et amortissement du signal.
- de mettre en place des collaborations au niveau national et international, d'une part, pour étudier l'intégration du déphaseur dans le bâtiment et le système technique et, d'autre part, en vue de développer une filière industrielle. Un prototype sera construit avec un partenaire industriel allemand en 2006 et sera intégré dans le système de ventilation de la première maison passive complètement isolée par éléments sous vide.

STOCKAGE DENSE DE CHALEUR POUR L'HABITAT

Nous poursuivons notre recherche de solutions de stockage pour les systèmes combinés permettant de faire mieux que le medium « eau », soit en densité, soit en réduction de pertes thermiques, soit en service d'une prestation double : chaud en hiver / froid en été.

Advanced storage concept for solar and low energy buildings [8]: la Tâche 32 du Programme *Solar Heating and Cooling* (SH&C) de l'AIE (www.iea-shc.org), s'est réunie 2 fois en 2005, en mai à Lleida, Espagne et en novembre à Fontainebleau, France (www.baseconsultants.com/IEA32). Huit équipes de pays différents y participent. Les travaux sont répartis en 4 sous-tâches et sont entrés en 2005 dans une phase productive:

Sous-tâche A : *Evaluation and Dissemination*. La méthode de comparaison de différents systèmes combinés est prête. Elle doit être testée sur les résultats des autres sous-tâches attendus en 2006. La principale avancée scientifique en 2005 a été la mise au point du cas de référence de la Tâche, soit la définition d'un cas (une maison familiale) et tous ses paramètres que chaque équipe devra simuler. Le cas est entièrement défini dans un fichier TRNSED accessible.

Sous-tâche B : *Chemical and Sorption*. Une installation pilote avec un stock de 1000 kg de silicagel a été réalisée en Autriche dans une villa solaire. Elle sera mesurée durant l'été 2007. Le SPF contribue à cette tâche avec le projet de stock en zéolite décrit par la suite. La Suède a présenté les résultats d'un stock par sorption dans une installation qui est une pompe à chaleur permettant de délivrer du chaud et du froid et qui va être commercialisée en Espagne par la société *Climatewell*. Des projets de stock par procédés chimiques manquent malheureusement, un projet prometteur de stockage en NaOH proposé par l'EMPA en Suisse ne pouvant être financé faute de moyens suffisants.

Sous-tâche C : *Phase Change Materials*. Les travaux avancent bien, avec les équipes d'Autriche, de Suisse, d'Espagne et du Danemark qui travaillent toutes sur l'acétate de sodium en complément d'une cuve à eau. Des mesures en laboratoire ont permis d'élaborer un premier modèle en cours de validation. Les effets convectifs dans le matériau et la surfusion sont délicats à prendre en compte. Il est anticipé une amélioration d'environ 30% en densité de stockage dans une cuve à eau munie de PCM, et surtout un maintien de la température de 60 °C pour l'eau sanitaire dans le haut de la cuve permettant d'éviter tout appoint au moins en été.

Sous-tâche D : *Water*. Les possibilités d'amélioration des installations solaires actuelles ont été

recensées par le groupe et font l'objet d'un rapport. Plusieurs équipes travaillent par simulation sur des amélioration de systèmes permettant soit de réduire le coût (cuve plastique sans pression), soit d'augmenter les performances (optimisation de la façon de faire l'eau sanitaire à partir de la cuve de stockage).

Après 2 ans de travail, la Tâche 32 a publié en 2005 un livre regroupant 15 contributions fondamentales dans les domaines du stockage de chaleur à court terme. Ce livre, qui vient combler une lacune dans les publications scientifiques, sera distribué en 2006 via le site internet de la Tâche [21].

Stockage par procédé de sorption [4] : Le SPF travaille sur un procédé de stockage à long terme par sorption avec de la zéolite 13X. Les essais sur une boucle de stockage en 2005 ont permis de charger le stock de 24.4 à 82.4 °C en 30 minutes, mais la décharge s'est avérée difficile, car la puissance d'échange n'a pu dépasser 800 W, même après un séchage à 200 °C. Un problème est aussi de faire passer suffisamment de vapeur d'eau du stock d'eau au module de sorption par une vanne sous vide difficile à régler. La densité de stockage atteinte est de 60.5 kWh/m^3, soit comparable à un stock à eau pour le moment.

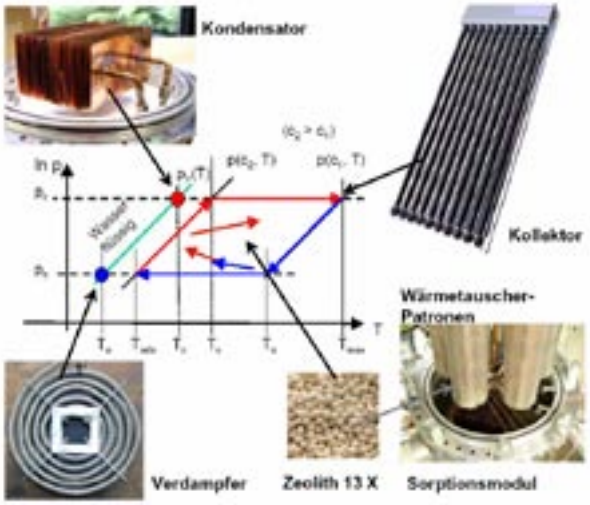


Figure 8 : *le procédé de stockage par sorption testé au SPF (doc. SPF)*

L'objectif souhaité est une densification d'un facteur 3. Des cycles de tests seront effectués en 2006 pour tenter d'améliorer les puissances extraites. Des modifications de l'échangeur à lamelles sont à prévoir.

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM) [7] : le projet CoSpy-PCM mené par le laboratoire LESBAT/HEIG-VD à Yverdon consiste à rechercher la meilleure solution pour améliorer la densité du stock d'un système combiné au moyen de matériau à changement de phase. Ce projet fait partie de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE. Les travaux réalisés en 2005 sont les suivants :

- le modèle numérique (différences finies explicites) d'un stock avec changement de phase dans TRNSYS a été complété par la prise en compte de l'effet d'hystérèse et de la surfusion du matériau utilisé, et une étude paramétrique a été effectuée,
- différents matériaux (paraffine, acétate de sodium) et systèmes permettant d'améliorer la conductibilité thermique du PCM (aluminium, graphite) ont été testés au laboratoire,
- une validation partielle du modèle a pu être menée sur la base des températures observées dans des séries d'expérience. La convection naturelle reste une barrière cependant et la modélisation fine de cet effet est hors de proportion pour notre projet. Une solution approchée macroscopique devra être trouvée.

Le modèle sera exploité en 2006 dans le cas de référence de la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE pour optimiser la quantité et la position du PCM dans la cuve d'un système solaire combiné.

Stockage saisonnier de grande envergure dans le sol [9] : le projet SUVA à Root possède le plus grand stock saisonnier de Suisse (340'000 m^3, capacité de 1'000 MWh) en service depuis 2 ans. C'est le dernier projet P+D du programme "Stockage de chaleur" du fait de l'arrêt du soutien par la Confédération à des projets pilotes. Les résultats de mesure de 2 années sont attendus pour 2006 dans le rapport final du projet.

Collaboration nationale

Le SPF travaille avec deux industriels du secteur solaire dans des projets de la CTI qui ont été acceptés l'un en 2004 l'autre en 2005.

Les centres de compétences que nous soutenons (SPF/HS-Rapperswil, HEIG-VD, CUEPE/Uni GE, LESO/EPFL, LEEE/SUPSI) collaborent avec des industriels nationaux ou internationaux.

Collaboration internationale

Le SPF collabore à deux Tâches du Programme SH&C de l'AIE : la Tâche 27 sur les matériaux qui s'est terminée en 2005 et qui sera suivie d'une Tâche ayant pour thème les polymères dans le solaire thermique, la Tâche 32 sur le stockage de chaleur.

Dans la Tâche 32 que nous dirigeons, la collaboration entre le LESBAT/HEIG-VD à Yverdon, l'Université de Lleida et celle de Graz, est très bénéfique pour nous faire progresser dans la connaissance des matériaux à changement de phase adaptés au solaire. La modélisation se fait aussi en commun en partie, et les résultats d'expérience sont échangés pour la validation, permettant de gagner un temps important.

Le SPF participe à un projet européen : SOLABS pour le développement d'absorbeurs solaires non vitrés, intégrables en façade et de couleur. La poursuite du projet a été validée par les experts de l'UE lors du meeting de mi-parcours du projet en 2005.

Nos chercheurs sont présents dans les meetings d'importance européenne (OTTI).

Nous avons été invité à diriger un symposium sur le stockage en novembre 2005 au centre de recherches d'EDF à Fontainebleau. Une collaboration avec Cristopia, industrie française du stockage thermique chaud et froid depuis plus 20 ans, pourrait en résulter en 2006.

Projets pilotes et de démonstration

Im Jahre 2005 konnten nur wenige Projekte abgeschlossen werden. Es sind viele Terminverschiebungen aufgetreten, welche zum Teil auf die etwas rasch verfassten Projekte vor Ende der Unterstützung von Pilotprojekten zurückzuführen sind. Aufgrund des Entlastungsprogrammes 03 konnten keine neuen Projekte gestartet werden. Das Programm beschränkte sich daher auf die Begleitung und den Abschluss der laufenden Projekte.

Figure 9 : Kollektorfeld Solare Kühlung MGB: *Bei Ausfall der Absorptionskältemaschine muss die Solaranlage vor Überhitzung geschützt werden. Dazu wird die Sonnenenergie über einen Plattenwärmetauscher dem Rückkühlnetz zugeführt und über den Hybridkühler ins Freie abgeführt. [Foto: RMB Engineering AG]*

Von den 11 Projekten zu Beginn des Jahres [10-20], konnten nur 4 abgeschlossen werden [11, 13, 14, 16].

Die ***Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine*** beim *Migros Genossenschaftsbund* Zürich [13] ist die erste funktionierende und erfolgreiche monovalente Absorptionskältemaschine mit Solarsystem in der Schweiz (ohne zusätzliche Heizungsunterstützung). Die Antriebskraft der Absorptionskältemaschine liefern Vakuumröhrenkollektoren (s. Figur 9). Die Kühlung erfolgt in erster Linie über ein Kühldeckensystem und in zweiter Linie über die Lüftungsanlage. Der installierte Hybridkühler führt die entstehende Kondensationswärme ins Freie.

Die Nutzung von Sonnenenergie für solare Kühlung wird zunehmend zu einem interessanten Thema, ist aber heute gegenüber den derzeit dominierenden elektrischen Klimatisierungssystemen wirtschaftlich noch nicht konkurrenzfähig.

Bei der ausgeführten Solaranlage besteht in der Aufheizphase noch ein erhebliches Optimierungspotential. Bisher wurde die überschüssige Solarenergie der Speicheranlage zugeführt und nicht weiter verwendet. In Zukunft wird aber diese gespeicherte Energie am Vormittag für die Aufheizung des Solarnetzes verwendet, um dadurch die Kälteproduktion der Absorptionskältemaschine zu erhöhen. Wichtig ist, dass sich die Technikzentrale in der Nähe des Rückkühlers und der Solaranlage befindet. Durch die kurzen Leitungswege können die Investitionskosten gesenkt und die Wärmeverluste der Solarleitungen verringert werden.

Évaluation de l'année 2005 et perspectives pour 2006

Un de nos buts principal est l'amélioration du stockage de chaleur. Quatre projets sont en ce sens dans notre programme. L'année 2005 a permis de bien lancer la Tâche 32 du Programme SH&C de l'AIE. Nous en espérons des résultats en 2006 et 2007 quant aux meilleures solutions pouvant concurrencer ou complémenter l'eau en matière de stockage solaire. Les sujets de recherche sur le stockage, pourtant déterminants pour le futur du solaire thermique, peinent à trouver un financement dans la plupart des pays.

Une équipe de l'Université de Kassel, et une de l'Université de Stuttgart, avec des projets nouveaux dans les cuves à eau notamment, rejoignent dès lors la Tâche pour 2 ans et une équipe nouvelle de France avec l'industriel Cristopia pourrait rejoindre la Tâche suite à cette prolongation. Nous espérons aussi pouvoir financer un projet de l'EMPA de stockage solaire en composés chimiques.

Le stockage souterrain de chaleur est une possibilité pour le solaire à grande échelle, comme nous le démontrons en Suisse avec les projets de Serso et de la SUVA à Root.

En 2006, le déphaseur thermique diffusif pourrait trouver un débouché industriel.

En ce qui concerne les outils de projet, de nouveaux modules seront ajoutés à Polysun 4 en 2006, notamment le thermosiphon, le *drain back*, les piscines solaires, la chaudière à granulés de bois, la pompe à chaleur, et la sonde géothermique si possible. La validation de Polysun 4 est également à envisager au SPF, soit contre des installations mesurées, soit contre Trnsys.

Durant 2006, le dépôt d'une couche mince de couleur sur un verre de 1 m^2 pourrait être une réalité au LESO et un partenaire industriel pourrait reprendre le projet.

La conférence *Eurosun 2006* en Écosse en juin permettra de nous comparer aux avancées d'autres pays. En matière de stockage, ce sera *Ecostock 2006* aux USA en juin 2006, conférence qui n'a lieu que tous les 3 ans et qui fait le point sur le stockage de chaleur et de froid en grande taille.

Liste des projets de R+D

(RA) Rapport annuel 2005 existant
(RI) Rapport intermédiaire existant
(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch)
Les rapports peuvent être téléchargés à partir du site : http://www.solarenergy-thermal.ch/

[1] A. Bohren, A. Luzzi SPF/HS *Rapperswil:* ***SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie Teil A : Komponenten in solarthermischen Systemen*** (RA 2005) ◆ P. Vogelsanger, S. Laipple, M. Haller, A. Luzzi, S. Brunold ***Teil B : thermische Solarsysteme*** (RA 2005) ◆ S. Brunold, F. Flückiger, A. Luzzi ***Teil C : Materialien in solarthermischen Systemen*** (RA 2005) ◆ A. Mathez, A. Witzik, A. Luzzi ***Teil D : Informatik*** (RA 2005) (info@solarenergy.ch), http://www.solarenergy.ch/

[2] A. Schüler, E. de Chambrier, C. Roecker, J.-L. Scartezzini, LESO EPF *Lausanne:* ***Colored solar collectors - Capteurs solaires en couleur – Phase II Prototype fonctionnel*** – (RA2005) ◆ A. Schüler, E. de Chambrier LESO EPFL: ***Feasibility study on the sol-gel deposition of nanostructured materials based on oxides and fluorides for coatings on solar collector glazing*** (RI 2005) http://lesowww.epfl.ch

[3] M. Götz, M. Götz technologie douce : ***Projet cuiseur solaire ultra-léger*** – Rapport final 15 septembre 2005 (RF2005) http://www.cuisinesolaire.com

[4] P. Gantenbein, A. Luzzi (info@solarenergy.ch) SPF/HS-*Rapperswil:* **Sorptionsspeicher: Temperaturprofile / Leistung und Energiedichte** (RA 2005) ◆ ***Sorptionsspeicher: Studie Temperaturprofile / Leistungsdichte*** (RI 2005 September) http://www.solarenergy.ch/

[5] D. Pahud, SUPSI-DCT-LEEE *Canobbio:* ***SERSO, stockage saisonnier de l'énergie solaire pour le dégivrage d'un pont. Optimisation de l'installation par calage d'un outil de simulation dynamique sur les mesures existantes*** (RA 2005) http://www.leee.dct.supsi.ch

[6] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE *Genève:* ***Déphaseur thermique – Optimisation et prototype intégré*** (RA 2005) http://www.cuepe.ch

[7] S. Citherlet, J. Bony, HEIG-VD/LESBAT *Yverdon:* ***SCoSyPCM Combi-système avec Matériaux à changement de phase*** (RA 2005) www.heig.ch

[8] J.-C. Hadorn, BASE consultants SA, *Lausanne:* ***IEA SH&C Task 32 Advanced storage concepts for solar and low energy buildings – Annual report of the operating agent*** (RA 2005) http://www.baseconsultants.com/IEA32

Liste des projets P+D

[9] P. Berchtold, E. Wirz, B. Engsig, T. Baumann, M. Frei, PB Büro *Sarnen :* ***Geothermiespeicher SUVA D4 Unternehmens- und Innovationszentrum, Root (LU)*** (Projet P+DB) http://www.aramis-research.ch/e/14779.html

[10] B. Salerno, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, *Langenbruck:* ***Drain-Down-System für grosse Solaranlagen***; Anlage in Betrieb, Messungen laufen.

[11] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK AG, *Zollikofen:* ***Drain-Back-Kompaktanlagen*** (RF) www.solarch.ch;

[12] C. Hilgenberg, (christian.hilgenberg@iem.ch), INGENIEURBÜRO IEM AG, *Gwatt-Thun:* ***Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine mit Heizungsunterstützung*** Berner Kantonalbank (BEKB) – Thun www.solarch.ch; Anlage in Betrieb, Messungen laufen.

[13] F. Beuchat, (beuchat@rmb.ch), REUST MARTI + BEUCHAT AG, *Zürich:* ***Solarbetriebene Absorptions-Kältemaschine Migros-Genossenschafts-Bund*** (MGB)-Zürich (RF) www.solarch.ch; Projekt abgeschlossen.

[14] C. Jobin, (agena.energies@bluewin.ch), AGENA ÉNERGIES SA, *Moudon:* ***Détection des dysfonctionnements affectant les installations solaires pour l'eau chaude sanitaire et identification de leur origine*** (RF) www.solarch.ch

[15] Y. Roulet, (roulet@energie-solaire.com), ÉNERGIE SOLAIRE SA, *Sierre:* ***Camping du Botza*** : chauffage solaire de la piscine et de l'eau chaude www.solarch.ch

[16] A. Messerli, (info@nena.ch), NEUENSCHWANDER-NEUTAIR AG, *Bern:* ***Pfadiheim Weiermatt Köniz***: Sanierung Wärmeversorgung (RF) www.solarch.ch

[17] A. Primas, (aprimas@bhz.ch), BASLER & HOFMANN AG, *Zürich:* ***Sanierung der Warmwasserversorgung Gemeinnützige Baugenossenschaft Zürich 7*** (GBZ 7); (RF) Die Mehrheit der geplanten Anlagen sind erstellt, Messungen laufen.

[18] A. Reinhard, (a.reinhard@prospective-concepts.ch), prospective concepts ag, *Glattbrugg:* ***Hybride autonome Energieversorgung mit Photovoltaik***, thermischen Sonnenkollektoren, Flüssiggas-Blockheizkraftwerk und Holz, Veytaux; Anlagen in Betrieb, Messphase mit Betriebsoptimierung laufend.

[19] L. Engeler, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, *Langenbruck:* ***Solmat frostschutzmittelfreie Warmwassererwärmung*** (Werkheim Sonnmatt – Langenbruck); Anlage in Betrieb, Messkampagne gestartet.

[20] T. Bruttin, (thierry.bruttin@sierre.ch), VILLE DE *SIERRE:* ***Complexe sportif Guillamo;*** Anlage in Betrieb, Messkampagne gestartet

Références

[21] J.-C. Hadorn : ***Points clés du programme "Solaire actif chaleur et stockage de chaleur"*** (Document de 1 page interne à l'OFEN, décembre 2005)

[22] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE Genève, D. Pahud LEEE SUPSI, *Canobbio :* ***Le rafraîchissement par géocooling*** – ***Bases pour un manuel de dimensionnement*** – Rapport de recherche du CUEPE 2005 No 5 (RF 2005), 96 pages, http://www.cuepe.ch

[23] P. Hollmuller, B. Lachal, J.-C. Hadorn, J. Wellstein (Red.) : ***Kälte durch Phasenverschiebung*** – Bau + Architektur 02/2005, 2 Seiten

[24] P. Hollmuller, B. Lachal, J.-C. Hadorn, J. Wellstein (Red.) : ***Le rafraîchissement de bâtiments par déphasage*** – Revue BatiTech 02/2005, 4 pages

[25] Anne-Muriel Brouet (TdG), P. Hollmuller CUEPE, *Genève :* ***Quand la fraîcheur nocturne revient à midi*** – Tribune de Genève 18/06/2005, 3 pages

[26] A. Vos (Réd.), P. Hollmuller CUEPE, *Genève :* ***Fraîcheur nocturne sur le coup de midi*** – Campus Genève no 76-2005, 1 page

[27] P. Hollmuller, B. Lachal CUEPE, *Genève :* ***Buried pipe system with sensible and latent heat exchange : validation of a numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring*** – 9th Conference of International Building Performance Simulation Association IBPSA - August 15-18 2005 - 8 pages

[28] P. Hollmuller, B. Lachal, CUEPE, Genève : ***Geocooling: utilisation d'un collecteur souterrain à eau pour le chauffage et le rafraîchissement d'un bâtiment administratif*** – CISBAT 2005 EPF Lausanne - 8 pages

[29] J.-C. Hadorn Editor, ***Thermal storage for solar and low energy buildings, State of the Art***, June 2005, IEA SHC Task 32, 170 pages, www.baseconsultants.com/IEA32 (book to order)

[30] SPF/HS-Rapperswil: ***Kombi-Kompakt+*** (V2 RF 2005) http://www.solarenergy.ch/

PROGRAMM PHOTOVOLTAIK

Stefan Nowak
stefan.nowak@netenergy.ch

Photovoltaik Made in Switzerland: vom Labor in die Industrie

Die industrielle Umsetzung von Dünnschicht Solarzellen macht Fortschritte:

a) Labor Depositionssystem am Institut de Microtechnique, Uni Neuchâtel (Bildquelle IMT)
b) 100 kWp Pilotproduktion von flexiblen Silizium Solarzellen auf Kunststoff bei VHF-Technologies (Bildquelle VHF-Technologies)
c) Unaxis Solar KAI 1200 Produktionsanlage zur Massenfertigung von Silizium Dünnschicht Solarmodulen (Fläche 1.4 m^2, Durchsatz 550 Module/Tag, Bildquelle Unaxis)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Jahr 2005 war das Programm Photovoltaik (PV) im Bereich der P+D-Projekte weiterhin durch die im Entlastungsprogramm 2003 des Bundes beschlossenen Sparmassnahmen gekennzeichnet. Im Bereich der Forschung konnte das Niveau durch eine breite Programmabstützung weitgehend gehalten werden. Die industrielle Umsetzung der bisherigen Forschungsresultate behält hohe Priorität. Das anhaltende Wachstum des internationalen Photovoltaik Marktes bildet – trotz stagnierendem nationalen Markt – eine wichtige Grundlage für den derzeit erfolgenden, deutlichen Ausbau der Photovoltaik-Industriebasis in der Schweiz.

Das Programm Photovoltaik verfolgt eine ausgeprägte Ausrichtung auf die industrielle Umsetzung und die internationale Wettbewerbsfähigkeit, sowohl für Produkte wie auch für die vorgelagerte Forschung. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie noch bestehende Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2005 ca. 65 Projekte, wobei alle bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind.

Gestützt auf das ***Energieforschungskonzept*** der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE [42] verfolgt das Schweizer ***Photovoltaik Programm in der Periode 2004 – 2007*** die folgenden wesentlichen Ziele [43]:

- Es soll eine weitere Kostenreduktion des Energiesystems Photovoltaik erreicht werden (typische Werte 2007: Modul 2.50 CHF/Wp; System 5.00 CHF/Wp) und entsprechende Verbesserungen der einzelnen Komponenten in Bezug auf elektrische Eigenschaften (2007: Dünnschichtmodule mit >12% Wirkungsgrad), Herstellungskosten und industrielle Fertigung;
- Etablierung bzw. Konsolidierung der industriellen Basis für Produkte der Photovoltaik, einschliesslich Solarzellen und Module in ausgewählten Technologieansätzen;
- Hohe Integration und Standardisierung der Produkte und Systeme für Massenmärkte.

Dazu ist das Programm Photovoltaik in folgende Bereiche aufgeteilt:

Solarzellen der Zukunft

Die Arbeiten zu **Dünnschicht Solarzellen** waren im Berichtsjahr weiterhin fokussiert auf die Schwerpunkte **Silizium** (amorph, mikrokristallin), Zellen auf der Basis von **Verbindungshalbleitern** (CIGS) sowie **Farbstoffzellen**. Die mit Nachdruck verfolgte Industrialisierung von Produktionsprozessen steht bei den Silizium Dünnschicht Solarzellen in einem fortgeschrittenen Stadium, bei den Verbindungshalbleitern nimmt sie ebenfalls konkrete Formen an. Solarzellen auf flexiblen Substraten gewinnen zunehmend an Bedeutung.

Module und Gebäudeintegration

Die **Integration der Photovoltaik** im bebauten Raum bildet weiterhin den wichtigsten Schwerpunkt der angestrebten Anwendungen. Währenddem der Markt für Montagesysteme mittlerweile eine breite Produktpalette anbieten kann, stellen neue Produkte und Erfahrungen mit Dünnschicht Solarzellen in der Gebäudeintegration ein wachsendes Thema dar.

Elektrische Systemtechnik

Die **Qualitätssicherung** von Photovoltaikmodulen, von Wechselrichtern und von gesamten Systemen ist, zusammen mit **Langzeitbeobachtungen** an diesen Komponenten, für die Praxis von anhaltender Bedeutung und wird in entsprechenden Kompetenzzentren an Fachhochschulen bearbeitet. Langjährige Messreihen und die vermehrte Analyse von Fehlverhalten der einzelnen Komponenten sollen in Hinsicht auf kritische Parameter und die Erhöhung der Lebensdauer genutzt werden. Aufgrund dieser systembezogenen Arbeiten soll die spezifische Energieproduktion von Photovoltaik-Anlagen (kWh/kWp) weiter erhöht werden. Für **Inselanlagen** wächst die Bedeutung der Kombination mit anderen Energietechnologien in Hybridanlagen.

Ergänzende Projekte und Studien

Hier geht es um die Erarbeitung von Grundlagen zu allgemeinen Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Marktaufbau der Photovoltaik, insbesondere zu **Potenzial**, **Umweltaspekten** und **Energieplanung** sowie praxisorientierte **Hilfsmittel** zur Anlagenplanung und –überwachung. Neuste Technologien des Internets, Computermodelle, Bildverarbeitung, geografische Informationssysteme bis hin zur Satellitenkommunikation gelangen dabei zum Einsatz. Für Anwendungen in **Entwicklungsländern** stehen dagegen nichttechnische Aspekte im Vordergrund. Dieser Bereich des Programms umfasst zudem die Vorhaben an den Schnittstellen zu anderen Energietechnologien.

Institutionelle internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit bildet ein zentrales Standbein in allen Bereichen. Der Anschluss an die internationale Entwicklung sowie ein intensivierter Informationsaustausch war im Berichtsjahr ein wichtiges Ziel, welches im Rahmen der internationalen Programme der **EU** sowie der **IEA** mit Kontinuität weiterverfolgt wurde. Die erfolgreiche internationale Zusammenarbeit konnte fortgesetzt werden. Von übergeordneter Bedeutung war im Berichtsjahr die Schweizer Beteiligung an neuen europäischen Netzwerken (***PV-ERA-NET*** und Europäische Photovoltaik Technologie Plattform).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

ZELL-TECHNOLOGIE

Die **grosse Bandbreite der Schweizer Solarzellenforschung** konnte im Berichtsjahr 2005 dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt werden. Im Berichtsjahr begannen neue Industrie-Projekte mit Unterstützung der KTI. Die Beteiligung an EU-Projekten bildete eine weitere wichtige Komponente; die Schweiz ist nun an den meisten laufenden *Integrierten Projekten* der Europäischen Kommission im Bereich der Photovoltaik beteiligt.

Dünnschicht Silizium

Die Entwicklungen im Bereich des Dünnschicht Siliziums finden an der Universität Neuchâtel (IMT), an der EPFL (CRPP), der Haute École Arc ingénierie (Le Locle), dem NTB (Buchs) sowie bei den Unternehmen *Unaxis Solar* (Trübbach, Neuchâtel) und *VHF-Technologies* (Yverdon) statt und stellen einen wichtigen Schwerpunkt des Photovoltaik Programms dar.

Das IMT an der Universität Neuchâtel begann beim Projekt zu ***Silizium Dünnschichtsolarzellen*** [1a] im Berichtsjahr eine neue, dreijährige Projektphase. Die Ziele dieses BFE-Projektes bestehen darin, den Wirkungsgrad der Solarzellen auf verschiedenen Substraten weiter zu erhöhen (Ziel 14% für mikromorphe Solarzellen), die Prozessführung und Charakterisierung der Solarzellen weiter zu entwickeln und die notwendige Infrastruktur (Prozesse, Herstellung und Charakterisierung) zur Unterstützung der Industriepartner sicherzustellen. Dazu werden verschiedene Depositionssysteme erneuert und automatisiert, die Systeme zur Charakterisierung der Solarzellen standardisiert und ein spezieller Akzent auf die Reproduzierbarkeit der einzelnen Fabrikationsschritte gelegt. Die Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgt primär mit den Unternehmen *Unaxis* und *VHF-Technologies*, welche ihrerseits die am IMT entwickelten Prozesse in ihre Produkte implementieren. Folgende Resultate wurden im Berichtsjahr erreicht: Auf der transparenten Oxydschicht (TCO) aus ZnO auf Glas konnten p-i-n mikrokristalline (µc-Si:H) Solarzellen von 9% und mikromorphe Solarzellen von 11.6% hergestellt werden. Dabei konnte das Parameterfeld (z.B. Füllfaktor FF, Leerlaufspannung V_{oc}) deutlich eingegrenzt werden. Auf PET-Folien wurde für amorphe (a-Si:H) Solarzellen ein Wirkungsgrad von 7.3%, für mikrokristalline Solarzellen 7.6% und für mikromorphe Solarzellen 8.3% erreicht. In Bezug auf die Analytik wurden verschiedene Messmethoden weiterentwickelt und standardmässig eingesetzt (*VIM – variable illumination measurement, FTPS – Fourier transform photocurrent sprectroscopy, IRLIT – infrared lock-in thermography*).

Das KTI-Projekt in Zusammenarbeit mit *Unaxis* für den ***Prozess der schnellen Abscheidung von mikrokristallinem Silizium*** [1b] auf der Grundlage der KAI Plasmadepositionsanlagen wurde im Bereichtsjahr fortgesetzt. Damit wird die Grundlage für den grossflächigen (1.4 m²), industriellen Prozess für mikromorphe Solarzellen gelegt. Auf der Versuchsanlage am IMT konnten im Berichtsjahr mikrokristalline Silizium Solarzellen mit 7.2% Wirkungsgrad hergestellt werden; bei *Unaxis* wurden damit mikromorphe Mini-Module (10x10 cm^2) mit einem Wirkungsgrad von 9.5% erreicht.

In einem verwandten KTI-Projekt hat das CRPP an der EPFL zusammen mit *Unaxis* die Entwicklung eines neuen, grossflächigen ***VHF-Reaktors für die Abscheidung von amorphen und mikrokristallinen Siliziumsolarzellen*** [2a] weiter verfolgt. Es werden Plasmaanregungsfrequenzen bis 100 MHz untersucht, was eine schnelle Abscheidung (≥ 4 Å/s) erlaubt, jedoch für die Homogenität der Schichten auf einer Fläche von ≥ 1 m² besondere Herausforderungen darstellt. Die Bildung der Inhomogenitäten der Schichten konnten im Berichtsjahr erklärt werden. Weitere Arbeiten betreffen die Prozessparameter, insbesondere in Hinsicht auf die unerwünschte Bildung von Silizium Pulver. Ergänzt werden diese Arbeiten durch ein KTI-Projekt am CRPP der EPFL, in welchem ein ***numerisches Modell für grossflächige PECVD Reaktoren*** entwickelt wurde [2b]. Dieses Projekt wurde im Berichtsjahr erfolgreich abgeschlossen.

Ein weiteres KTI-Projekt zwischen dem IMT und *Unaxis* befasst sich mit der ***Stabilität der transparenten Oxydschichten*** (TCO) aus ZnO in laminierten Solarzellen [1c], insbesondere in Hinsicht auf den Dampf-Wärme Test im Rahmen der IEC Tests für Solarmodule (IEC 61646: 1000h @ 85 °C & 85% rel. Feuchtigkeit). Es konnte gezeigt werden, dass die im Test geforderte Stabilität erreicht wird.

Das NTB in Buchs setzte zusammen mit *Unaxis* das KTI-Projekt für ein auf die industrielle Produktion ausgerichtetes, spektral aufgelöstes ***Photostrom Messgerät*** (*Spectral Response Measurement System SRMS*) [3] erfolgreich fort. Im Berichtsjahr wurden bei *Unaxis* zwei Prototypen dieses Geräts installiert; die ersten Erfahrungen sind sehr positiv, insbesondere was die Stabilität der Messmethode anbetrifft. Damit können auf Solarmodulen vollflächige Messungen durchgeführt und entsprechende Bilder dargestellt werden. Diese verschiedenen KTI-Projekte bilden, zusammen mit den regulären Arbeiten am IMT, die Grundlage für die industrielle Umsetzung in Hinsicht auf Produktionsanlagen für Silizium Dünnschicht Solarzellen durch *Unaxis*.

Das IMT schloss das KTI-Projekt für die Verwendung von **nanostrukturierten optischen Gittern** zur Verbesserung der Eigenschaften von flexiblen Solarzellen auf Kunststoffsubstraten [1d] zusammen mit *VHF-Technologies* und weiteren Partnern im Berichtsjahr ab. Die nanostrukturierten Kunststoffsubstrate (PET, PEN) wurden durch OVD-Kinegram vorbereitet. Am IMT wurden auf texturierten PET Substraten amorphe Solarzellen mit 7.3% stabilem Wirkungsgrad hergestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die durch OVD-Kinegram hergestellten, nanostrukturierten Substrate mit dem Fabrikationsprozess von *VHF-Technologies* kompatibel sind. Im Verlauf des Projektes konnte *VHF-Technologies* ihren Fabrikationsprozess deutlich verbessern. Das IMT und *VHF-Technologies* arbeiten seit Herbst 2005 im neuen EU-Projekt ***FLEXCELLENCE*** [1e] an diesem Thema weiter. Zum ersten Mal erfolgt dabei im Bereich der Photovoltaik eine Projektkoordination durch einen Schweizer Partner (IMT).

Darüber hinaus hat sich das IMT im Berichtsjahr erfolgreich am neuen EU-Projekt ***ATHLET*** (*Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics*) beteiligt [1f]. Dieses, vom HMI in Berlin koordinierte, *Integrierte Projekt* – das europaweit bisher grösste Forschungsprojekt zu diesem Thema – befasst sich mit zwei Technologien im Bereich der Dünnschicht Solarzellen, der mikromorphen Solarzelle und der CIS-Technologie (vgl. unten); die Arbeiten dazu beginnen anfangs 2006 und werden insgesamt 4 Jahre dauern.

Kristallines Silizium

HCT Shaping Systems beteiligt sich am EU-Projekt ***BITHINK*** [4], in welchem hocheffiziente bifaciale kristalline Solarzellen entwickelt werden (Wirkungsgrad 16+16%). Dabei soll sowohl Material vom Czochralski-Typ wie mulitkristallines Silizium zum Einsatz kommen. Im Verlauf des Projektes werden die Prozesse und die automatisierte Handhabung von Solarzellen von weniger als 130 µm Dicke entwickelt.

II-VI Verbindungen (CIGS)

Die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ hat über viele Jahre EU-Projekte zum Thema Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) durchgeführt. Im Berichtsjahr wurde im BFE-Projekt ***FLEXCIM*** [5a] die Entwicklung von flexiblen CIGS-Solarzellen weiter vorangetrieben. Diese flexiblen, 5x5 cm^2 grossen CIGS-Solarzellen wurden auf Polyimid- und Metallfolien entwickelt. Dabei gelangte die an der ETHZ entwickelte Verwendung von Natrium zum Einsatz, wodurch Wirkungsgrade von 10-12% regelmässig erreicht werden konnten. Der im Vorjahr auf Polyimid erzielte Weltrekord für den Wirkungsgrad von flexiblen Solarzellen auf Kunststoff von 14.1% stellt noch immer den höchsten erreichten Wert dar. Im Berichtsjahr wurde an der Hochskalierung des Prozesses auf 30x30 cm^2 gearbeitet. Dazu wird ein neues, industriell ausgerichtetes Depositionssystem aufgebaut. Als weiteres Substrat für die flexiblen CIGS-Solarzellen wird Aluminium untersucht; dieses stellt ein neues Gebiet mit grossem Anwendungspotenzial dar. Der Depositionsprozess muss dafür aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten auf tiefere Temperaturen ausgelegt werden. Die beste Solarzelle auf Aluminium erreichte im Berichtsjahr einen Wirkungsgrad von 6.6%; dabei wurde noch kein Natrium eingesetzt.

Das EU-Projekt ***NEBULES*** [5b] zum Thema neuer Pufferschichten für CIGS-Solarzellen wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Hier konzentrierte sich die ETHZ-Gruppe auf die strukturelle, chemische und elektronische Charakterisierung der Solarzellen in Abhängigkeit von verschieden hergestellten CdS- sowie InS-Pufferschichten. Im Berichtsjahr wurden die Grenzflächen mit den InS-Pufferschichten in Hinsicht auf Struktur und Zusammensetzung eingehend analysiert. Zum Schluss des Projektes besteht eine gute Übersicht über die verschiedenen Prozesse an diesen Grenzflächen.

Die Gruppe Dünnschichtphysik an der ETHZ setzt diese Arbeiten seit dem Herbst 2005 im neuen EU-Projekt ***LARCIS*** [5c] fort. Dabei geht es um die grossflächige Umsetzung verschiedener Schlüsselthemen in die industrielle Produktion. Zudem beteiligte sich die Gruppe im Berichtsjahr ebenfalls erfolgreich am neuen EU-Projekt ***ATHLET*** [5d] (*vgl. oben*) und wird in diesem Projekt den Teil zu CIGS-Solarzellen bearbeiten. In Hinsicht auf die industrielle Umsetzung der flexiblen CIGS-Solarzellen wurde im Berichtsjahr das ETHZ Spin-Off Unternehmen *FLISOM* gegründet.

Farbstoffzellen

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, ***nanokristallinen Solarzellen*** [6a] wurde am ISIC der EPFL fortgesetzt. Im Berichtsjahr wurden die Partikeleigenschaften der TiO_2 Filme weiter entwickelt. Die Farbstoffsynthese und die Arbeiten zu den eingesetzten Elektrolyten konzentrierten sich auf die Stabilität bei höheren Temperaturen (ca. 80 °C). Damit wird eine Lebensdauer der Farbstoffzellen von 10 bis 20 Jahren angestrebt.

Das ISIC arbeitet zusammen mit *Greatcell Solar* am KTI-Projekt zur *Erhöhung der Zellenspannung von Farbstoffzellen* [6b]. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der eingesetzte Farbstoff, welcher diesbezüglich weiter entwickelt wurde. Über *Greatcell Solar* besteht zudem eine direkte Verbindung zum australischen Technologieunternehmen *Dyesol* [44], welches im Dezember 2005 eine Produktionsfirma für Farbstoffzellen in Griechenland angekündigt hat.

Das EU-Projekt ***MOLYCELL*** [6c] befasst sich mit flexiblen organischen Solarzellen, wobei sowohl vollständig organische wie hybride nanokristallin–organische Solarzellen entwickelt werden. An der EPFL stehen letztere im Vordergrund, wobei dazu ein fester Heteroübergang zwischen nanokristallinen Metalloxyden und molekularen bzw. polymeren Löcherleitern gebildet wird. Die Lichtabsorption wird durch die molekularen Farbstoffe bzw. die Polymere beeinflusst. Das ISIC stellte im Berichtsjahr erste flexible Farbstoffzellen auf Titanfolien her, wobei bisher ein Wirkungsgrad von ca. 2% erreicht wurde. Prototypen mit dem Metalloxyd-organischen Hybridansatz erreichten einen Wirkungsgrad von ca. 4%.

Solaronix beteiligt sich am EU-Projekt ***FULL-SPECTRUM*** [7a], einem *Integrierten Projekt* im Bereich der Photovoltaik, welches unterschiedliche Ansätze zur besseren Nutzung des Strahlungsspektrums in einem Projekt zusammenführt (III-V *multijunctions*, Thermophotovoltaik, *intermediate band cells*, molekulare Konzepte); dabei werden Wirkungsgrade bis zu 40% angestrebt. Solaronix ist in diesem Projekt insbesondere mit unterstützenden Arbeiten im Modul zu neuen molekularen Konzepten beteiligt. Dabei geht es um die Rolle von Farbstoffsolarzellen in 2-Photon Prozessen bzw. in flachen Konzentratoren mittels Lumineszenzschichten.

Das LTC an der EPFL entwickelt auf der Grundlage der Farbstoffzellen in einem KTI-Projekt zusammen mit *Konarka* ***photovoltaisch aktive Textilien*** [8]. Von dieser Entwicklung werden neuartige Photovoltaik-Anwendungen erwartet.

Antennen-Solarzellen

An der Universität Bern wurden die grundlegenden Arbeiten zu ***Antennen-Solarzellen*** [9] im Rahmen des Programms Solarchemie und mit Unterstützung des schweizerischen Nationalfonds weitergeführt. Unter Verwendung von farbstoffbeladenen Zeolith-Kristallen wird eine neue Variante farbstoffsensibilisierter Solarzellen angestrebt. Im Vordergrund dieser Grundlagenarbeiten steht die Organisation der Kristalle an der Grenzschicht zu einem Halbleitermaterial im Hinblick auf die elektronische Energieübertragung. Im Berichtsjahr wurden 4 konzeptionelle Varianten von Dünnschicht-Antennen-Solarzellen erarbeitet: A) sensibilisierte Festkörper-Solarzelle, B) sensibilisierte Farbstoff-Solarzelle, C) sensibilisierte Plastik-Solarzelle und D) Dünnschicht-Antennen-Tandemzellen. Für die Variante A wurden die einzelnen Arbeitsschritte ausgetestet und zum Patent angemeldet. Es gilt jetzt, die Bausteine zu einer funktionierenden Solarzelle zusammenzusetzen.

SOLARMODULE UND GEBÄUDEINTEGRATION

Gebäudeintegrierte Anlagen stellen nach wie vor das wichtigste Anwendungsgebiet der Photovoltaik in der Schweiz dar. Während in Solarstrombörsen häufig die kostengünstigsten Lösungen für Flachdachanwendungen zum Einsatz gelangen, wird weiterhin an der Kostenreduktion von Lösungen mit einem stärkeren Integrationsaspekt gearbeitet. Da inzwischen für die Montage am Gebäude eine Reihe von Systemen erfolgreich umgesetzt werden konnten (siehe auch Abschnitt P+D), verlagert sich die Entwicklung vermehrt auf das Solarmodul selbst.

Swiss Solar Systems (3S) untersuchte in einem BFE-Projekt die durch die Verwendung von geätztem ***Antireflexglas*** (AR) [10a] mögliche Leistungssteigerung von kristallinen Solarmodulen. Um die möglichen Effekte zu quantifizieren, wurden die Gläser wahlweise vor / nach der Lamination im Säurebad geätzt. Die Messungen an den mit diesem Glas hergestellten Solarmodulen zeigten in beiden Fällen eine systematische Leistungssteigerung von ca. 2%, wobei 3% erwartet wurden. Freiluftmessungen bei verschiedenen Einstrahlungswinkeln zeigen, dass die AR-Module den Grenzbereich mit flachen Einstrahlungswinkeln noch etwas besser ausnützen können. Im EU-Projekt ***BIPV-CIS*** [10b] sollen die Eigenschaften der Photovoltaik-Gebäudeintegration mit Dünnschichtsolarzellen verbessert werden. Auf der Grundlage von CIS-Zellen werden Dach-, Überkopfglas- und Fassadenelemente entwickelt. Für *3S* steht die Entwicklung des Dachelementes im Vordergrund.

Telsonic beteiligte sich am EU-Projekt ***CONSOL*** [11], in welchem die elektrische Kontaktierung von CIGS-Solarzellen optimiert werden soll. Als Technologien werden dazu elektrisch leitende Klebebänder und Ultraschall-Schweissen eingesetzt. Die wichtigen Messgrössen Adhäsion und Kontaktwiderstand werden in Funktion von Klimatests erfasst und für beide Technologien optimiert. Für *Telsonic* steht als Hersteller von entsprechenden Anlagen die Optimierung des Ultraschall-Schweissens im Vordergrund. Die erzielbaren Kontakteigenschaften und die Eignung der Verfahren auf unterschiedlichen Substraten konnten bestimmt werden. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen.

Verschiedene weitere neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von P+D-Projekten erprobt (siehe entsprechendes Kapitel).

ELEKTRISCHE SYSTEMTECHNIK

Das **Schwergewicht in der Systemtechnik** liegt generell auf der Qualitätssicherung von Komponenten (Module, Wechselrichter), Systemen (Auslegung, Energieertrag) und Anlagen (Langzeitbeobachtungen). Die Erkenntnisse aus diesen anwendungsnahen Fragen sind – besonders in einem rasch wachsenden Markt – für Sicherheit,

Zuverlässigkeit und Energieertrag künftiger Anlagen wie auch für die Standardisierung der Produkte von grosser Bedeutung.

Das LEEE-TISO an der SUPSI hat im Berichtsjahr seine Testmessungen an Solarmodulen im Projekt ***Centrale LEEE-TISO 2003-2006*** [12a] fortgesetzt. Das gemäss ISO 17025 für Messungen zertifizierte Labor mit dem Sonnen-Simulator der Klasse A wurde erneut einem jährlichen Audit unterzogen und konnte seine Präzision von ±1% bestätigen. Im Berichtsjahr wurden mehr als 2600 I-V Kennlinien (Blitztests) gemessen, davon gut 10% für Dritte. Es wurden Vergleichsmessungen mit anderen zertifizierten Labors in Europa (ESTI-JRC und ECN) durchgeführt und ein vom NREL koordinierter internationaler *Round Robin* Test von Solarmodulen fortgesetzt. Die Labormessungen des LEEE-TISO erwiesen sich dabei als zuverlässig mit den Abweichungen I_{sc}: -1.8%, FF: 0.3%, P_{max}: -0.6%. Für Dünnschicht Module verfügt das Labor neu über ein Verfahren zur Berücksichtigung der spektralen Abweichung (*spectral mismatch*). Bei den Aussenmessungen begann im Berichtsjahr der 10. Testzyklus an kommerziellen Modulen; es wurden 14 Modultypen ausgewählt (8 mc-Si, 2 sc-Si, 1 HIT, 2 a-Si, 1 CdTe). Neu werden 3 anstelle von 2 Modulen gemessen. Das dritte Modul wird dabei kurzzeitig auf einem *Sun-Tracker* vermessen, insbesondere in Hinsicht auf die Erstellung der Leistungsmatrix $P_m(G_i,T_a)$. Die Messdatenerfassung und das *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) wurden neu konzipiert (siehe Fig. 1) und ein Spektroradiometer reinstalliert. Entsprechend der Strategie des LEEE soll in Zukunft als neues Thema auch die Photovoltaik-Gebäudeintegration verstärkt bearbeitet werden.

Das LEEE-TISO ist Partner im EU-Projekt ***PV Enlargement*** [12b], welches ein europaweites Demonstrationsprojekt in 10 Ländern (5 davon in Osteuropa) mit 32 Anlagen von insgesamt 1.15 MWp Leistung darstellt. Ende 2005 waren davon insgesamt 20 Anlagen mit 860 kWp in Betrieb. Dabei ist das LEEE-TISO für die wissenschaftliche Begleitung, insbesondere für Kalibrierungsaufgaben der verwendeten Messsysteme und Performance-Messungen der verwendeten Solarmodule, zuständig. Seit Projektbeginn im Januar 2003 wurden 151 von 210 geplanten Solarmodulen verschiedener Technologien (c-Si, a-Si, CIS, CdTe) und Hersteller geprüft. Im ersten Testzyklus wurden 101 kristalline Module (17 verschiedene Typen) ausgemessen und die Anfangsdegradation der Module quantifiziert. Die Unterschiede zu den gemäss neuer EU-Norm EN50380 deklarierten Module wurden in Klassen aufgeteilt. Es wurden bisher 50 Dünnschicht Module vermessen.

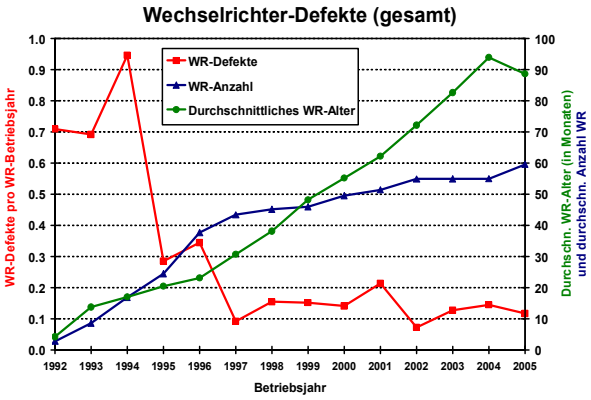
Darüber hinaus hat sich das LEEE-TISO im Berichtsjahr erfolgreich am neuen EU-Projekt ***PERFORMANCE*** (*A science base on PV performance for increased market transparency and customer confidence*) beteiligt [12c]. Dieses, vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg koordinierte, *Integrierte Projekt* befasst sich mit allen prenormativen Arbeiten von Solarzellen bis hin zu Systemen und von Momentanmessungen bis zu Langzeitanalysen. Das Projekt beginnt anfangs 2006 und wird insgesamt 4 Jahre dauern.

Figur 1: *Messdatenerfassung mit neuen MPPT Reglern (Bildquelle LEEE-TISO)*

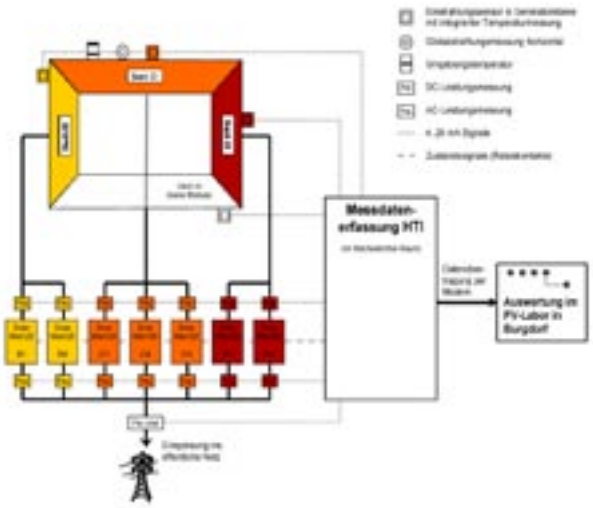
Am Photovoltaiklabor an der FH Burgdorf wurde das Projekt ***Photovoltaik-Systemtechnik PV-SYTE*** [13] fortgesetzt. Eine neue 3·5 kW AC/DC-Quelle wurde in das Testprogramm für Wechselrichter integriert; es ermöglicht die Untersuchung des Wechselrichterverhaltens bei ungewöhnlichen Netzzuständen (Über- und Unterspannungen, starke Rundsteuersignale, Über- und Unterfrequenz, usw.). Im Berichtsjahr wurden die bisherigen Wechselrichtertests durch Messungen an den aktuellen Geräteserien von *Sputnik* und *ASP* ergänzt. Die einzelnen, detaillierten ***Wechselrichter-Testberichte*** können eingesehen werden [45]. Im Teilprojekt zum Langzeitverhalten von PV-Anlagen wurde die seit 1992 geführte Ausfallstatistik weitergeführt. Im Berichtsjahr sank die Ausfallrate leicht auf 0.12 Wechselrichterdefekte pro Betriebsjahr (siehe Fig. 2). Die PV-Anlage von 855 kWp auf dem *Stade de Suisse* in Bern wurde neu in das Messprogramm aufgenommen, welches damit eine total installierte Leistung von 1.62 MWp (Feinmessprogramm 1.52 MWp) und 62 Wechselrichter umfasst. Die Messdaten der ***Anlage Stade de Suisse*** sind, wie für andere Anlagen, online einsehbar [46] (siehe Fig. 3). Weitere ausführliche Langzeitmessungen erfolgen zu den Anlagen *Newtech* (Dünnschichtzellen), Mont-Soleil und Jungfraujoch. Bei letzterer wurde für 2005 ein neuer Rekordertrag von 1'537 kWh/kWp gemessen.

Solaronix ist am EU-Projekt ***EURO-PSB*** [7b] zur Entwicklung einer Polymer Solar Batterie beteiligt. Es handelt sich dabei um eine kleine, selbstaufladende Batterie für mobile Anwendungen. Das Prinzip baut auf der Kombination einer neuartigen Polymer Solarzelle (organische Solarzelle) und einer wiederaufladbaren Lythium-Polymerbatterie auf. *Solaronix* ist in diesem Projekt für die elektrische Verbindungstechnik zwischen Solarzelle und Batterie sowie den gesamten Verbund zuständig.

Im Berichtsjahr wurden funktionelle Prototypen (Thermometer) mit flexiblen Farbstoffsolarzellen auf Titanfolien sowie mit organischen Solarzellen auf Glas zusammengebaut. Damit wurde das Projekt im Berichtsjahr abgeschlossen.



Figur 2: *Beobachtete Wechselrichter-Defekte (Bildquelle HTI Burgdorf)*



Figur 3: *Blockschaltschema Stade de Suisse (Bildquelle HTI Burgdorf)*

ERGÄNZENDE PROJEKTE UND STUDIEN

Das LESO an der EPFL beteiligt sich am EU-Projekt ***SUNtool*** [14], welches ein allgemeines Modellierungswerkzeug zur Nachhaltigkeit im urbanen Kontext darstellt. Es soll typischerweise eine Gruppe von Gebäuden bis zu einem Stadtviertel (< 1 km^2) energetisch und stoffflussbezogen abbilden können. Das Werkzeug baut auf umfassenden Modellen zu den einzelnen Aspekten auf und soll diese mit einem graphischen Benutzerinterface zusammenführen. Die EPFL entwickelt dazu entsprechend stochastische Benutzungsmodelle und hat diese weitgehend validiert. Die Gemeinden Lausanne und Morges stellten für Fallstudien Daten zur Verfügung. Aufgrund von Projektverzögerungen erfolgt der Projektabschluss anfangs 2006.

Enecolo ist am EU-Projekt ***PVSAT2*** beteiligt [15a]. In diesem Projekt wurde die satellitengestützte Performance Überwachung weiterentwickelt, indem einerseits präzisere Satellitendaten verwendet werden und andererseits die Produktionsdaten der PV-Anlagen zentral erfasst werden. Insgesamt sollte dadurch ein zuverlässiges und kosteneffizientes System zur Überwachung von kleinen Photovoltaik-Anlagen entstehen, für welche eine Messdatenerfassung vor Ort zu aufwendig wäre. Im Berichtsjahr konzentrierte sich *Enecolo* auf die im PV-SAT Verfahren entwickelte Fehlerdetektionsroutine (Fehler von PV-Anlagen). Die Testphase zeigte, dass PV-SAT-2 Prozedur für die Fernüberwachung von PV-Anlagen nützlich ist; verschiedene Fehler konnten detektiert werden (z.B. Leistungsbegrenzung durch unterdimensionierte Wechselrichter, Wechselrichterausfall, Schneeabdeckung, usw.). Es zeigte sich aber auch, dass das System weiter verbessert werden kann, insbesondere in Bezug auf den eingesetzten Datenlogger, die Fehlerdetektionsroutine, eine genügende Anlagenbeschreibung, Ausschluss von nicht behebbaren Fehlern (z.B. Wechselrichter, Verschattung, Degradation) sowie bezüglich der Strahlungsberechnung. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Zur kommerziellen Umsetzung der Resultate hat *Enecolo* zusammen mit *Meteotest* die neue Dienstleistung *SPYCE* [47] entwickelt. *Enecolo* ist auch am verwandten Projekt der esa ***ENVISOLAR*** [15b] beteiligt. In diesem Vorhaben sollen die der esa zur Verfügung stehenden Daten aus der Erdbeobachtung marktorientiert (http://www.eomd.esa.int) verarbeitet werden, insbesondere in Hinsicht auf das Thema *Solarstrahlung für Energieanwendungen*.

Das CUEPE an der Universität Genf beteiligt sich am EU-Projekt ***Heliosat 3*** [16a] zur energiespezifischen Bestimmung der Solarstrahlung aus Meteosat-Daten. *Heliosat3* nutzt u.a. die neuen Meteosat Second Generation (MSG) Satelliten und erarbeitet Solarstrahlungsdaten mit höherer Auflösung in zeitlicher, räumlicher und spektraler Hinsicht. Diese Daten können die Entscheidungsgrundlagen für Investitionen, Planung und Management im Solarenergiebereich verbessern. Als mögliche Anwendungsbeispiele im PV-Bereich werden Standortoptimierung, Anlagen- und Netzmanagement genannt (s. auch *ENVISOLAR*). Im abschliessenden Projektjahr wurde besonderes Gewicht auf die Validierung des Solarstrahlungsschemas gelegt.

Mit Unterstützung der interdepartementalen Plattform (seco, DEZA, BUWAL (neu BAFU), BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit ***REPIC*** [48] erarbeitet das CUEPE ein Modul für die Photovol-

taiksoftware ***PVSYST*** [49], welches ***Photovoltaik Wasserpumpen*** [16b] simuliert.

Das LEEE-TISO und *Solstis* sind Partner im EU-Projekt ***PV-Catapult*** [12d, 17]. Dieses Querschnittprojekt hat zum Ziel, in verschiedenen strategischen Bereichen der Photovoltaik, sowohl in Forschung, Umsetzung wie Markt, entsprechende Aktionen zur Marktbeschleunigung zu identifizieren und auszulösen. Unter anderem wurde dazu eine SWOT-Analyse der europäischen Photovoltaik durchgeführt. Das LEEE-TISO bearbeitet in diesem Projekt Fragen der Performanzmessungen und –voraussage während sich *Solstis* an einer Roadmap für das Thema des PV-thermischen Hybridkollektors beteiligt.

Das PSI beteiligt sich im Rahmen des *Integrierten* EU-Projektes ***FULLSPECTRUM*** [18] an den internationalen Arbeiten zum Thema der Thermophotovoltaik (TPV). Gestützt auf frühere Projekte bearbeitet das PSI in diesem Projekt im Modul zur Thermophotovoltaik systemtechnische Aspekte in einem Gasbetriebenen Testsystem. Der experimentelle Aufbau in einem Prototypen umfasst IR-Filter, Emitter, Zellenverschaltung und –kühlung sowie die entsprechende Messdatenerfassung. Seitens des PSI gelangen dazu Silizium Solarzellen zum Einsatz während bei anderen Instituten GaSb Solarzellen weiterentwickelt werden.

Das symbolträchtige Projekt ***SOLARIMPULSE*** [19] von Bertrand Piccard und verschiedenen Partnern wurde im Berichtsjahr fortgesetzt. Das Ziel dieses Projekts ist die ununterbrochene Weltumrundung mit einem photovoltaisch betriebenen Flugzeug. Das Projekt ist eine grosse Herausforderung in Hinsicht auf Material und Design sowie insbesondere auf die Energieversorgung und das Energiemanagement unter extremen Bedingungen (z.B. UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Temperaturen, Frost, Alterung, mechanische Vibrationen). Die photovoltaische Energieversorgung des Flugzeugs und ein äusserst sparsamer Energieeinsatz müssen dabei genügend Energie für den momentanen Antrieb, die Heizung des Flugzeugs und die Speicherung in Hinsicht auf den Nachtflug bereitstellen. Im Jahr 2005 wurde das technische Konzept erstellt. Gemäss dem aktuellen Stand der Arbeiten wird das Flugzeug 80 m Spannweite, 220 m^2 Flügelfläche, ca. 2 t Gewicht, 8 kg/m^2 Flügelbelastung und rund 40 kWp PV-Leistung haben; gemittelt über 24 Stunden soll die Motorenleistung 10 kW betragen. Das Flugzeug soll bei Tag auf 12’000 m steigen und nachts langsam absinken.

INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IEA PVPS) wurde im Berichtsjahr mit Kontinuität fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene wie im ***Executive Committee (ExCo)*** [50]. Die Schweiz hält weiterhin den Vorsitz dieses weltweiten Programms inne. Für die Beteiligung an ausgewählten Projekten im Rahmen des IEA PVPS Programms ist es im Berichtsjahr gelungen, einen gemeinsamen Schweizer IEA PVPS Pool zu gründen. Dieser Pool wird derzeit getragen durch das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz), den Kanton Basel Stadt und die *Gesellschaft Mont-Soleil*. Weitere Partner sind derzeit noch in Abklärung und neue Partner sind weiter erwünscht. Mit diesem Ansatz soll der stärkere Einbezug verschiedener Zielgruppen in die Arbeiten im Rahmen von IEA PVPS sichergestellt werden.

Nova Energie vertritt die Schweiz in Task 1 von IEA PVPS, welcher ***allgemeine Informationsaktivitäten*** [20] zur Aufgabe hat. Im Berichtsjahr wurde ein weiterer nationaler ***Bericht über die Photovoltaik in der Schweiz bis 2004*** [51] erstellt; auf dieser Grundlage wurde die ***10. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern*** erstellt [52]. Dieser Bericht wurde im Berichtsjahr insbesondere auch für die aktuellen Analysen der Photovoltaik durch den Finanzsektor verwendet [53, 54, 55]. Im Berichtsjahr wurde anlässlich der 20. Europäischen Photovoltaik-Konferenz in Barcelona unter Schweizer Leitung ein Workshop zum Thema Umweltaspekte der Photovoltaik organisiert; dieses Thema wird das PVPS Programm weiter beschäftigen, möglicherweise als neuer Task. Der ***IEA PVPS-Newsletter*** [56] informiert regelmässig über die Arbeiten in und rund um das IEA-Programm.

In IEA PVPS Task 2 über ***Betriebserfahrungen*** [21] stellt *TNC* den Schweizer Beitrag. Die PVPS-Datenbank ***Performance Database*** (Ausgabe Juni 2005 [57]) wurde mit neuen Daten ergänzt und umfasst nun 431 Photovoltaik-Anlagen aus 21 Ländern mit insgesamt rund 15’500 Monats-Betriebsdaten und 12.3 MWp Anlagenleistung. Aus der Schweiz sind 64 Anlagen mit einer totalen Leistung von 2 MWp in der Datenbank enthalten. In diesem Teilprojekt soll eine breit abgestützte Informations- und Datenbasis für die Entwicklung der PV-Systempreise und Unterhaltskosten geschaffen werden. Dazu können die verfügbaren Projekt- und Betriebsdaten für einen ***Global Survey*** eingeben werden [58]. Die so gesammelten Daten, aus möglichst vielen Regionen der Welt und aus möglichst verschiedenen Zeitperioden, werden von Task 2 bezüglich der Kostenentwicklung analysiert.

Im Rahmen der interdepartementalen Plattform (seco, DEZA, BUWAL (neu BAFU), BFE) zur Förderung der erneuerbaren Energien in der internationalen Zusammenarbeit ***REPIC*** [48] leistet *entec* den Schweizer Beitrag zu IEA PVPS Task 9 über die ***Photovoltaik-Entwicklungszusammenar-***

beit [22a]. Die Schweiz ist in diesem Projekt für die Koordination der Arbeiten mit multilateralen und bilateralen Organisationen verantwortlich. Im Berichtsjahr wurden im Rahmen dieses Projektes nebst den üblichen Projekttreffen Workshops in Vietnam, Burkina Faso und China durchgeführt. Task 9 war zudem an Konferenzen in Bangkok, Washington und Barcelona vertreten.

Meteotest [23] und das ***CUEPE an der Universität Genf*** [16c] erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum neuen Task 36 (*Solar Resource Knowledge Management*) des IEA SHC Programms. Dieses Projekt sieht vor, die verschiedenen Methoden und Datengrundlagen von Solardaten global aufzuarbeiten und verfügbar zu machen. Task 36 ist organisatorisch Bestandteil des IEA SHC Programms, inhaltlich ist es jedoch für alle Solartechnologien relevant; dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IEA Programmen zur Solarenergie (IEA PVPS und IEA PACES).

Alpha Real vertritt im Namen des Fachverbandes SOLAR (neu SWISSOLAR) die Schweiz im TC 82 der IEC und leitet die Arbeitsgruppe, welche internationale ***Normenvorschläge*** [24a] für Photovoltaiksysteme vorbereitet und verabschiedet. *Alpha Real* beteiligt sich ausserdem an *PV-GAP* [24b] (PV Global Approval Program), einem weltweiten Programm zur Qualitätssicherung und Zertifizierung von Photovoltaik-Systemen.

Die Beteiligung am EU-Projekt ***PV-ERA-NET*** [22b], welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien aus 13 Ländern unter dem ***ERA-NET Schema*** [59] zusammenführt, wurde durch die Photovoltaik Programmleitung (BFE, *NET Nowak Energie & Technologie*) sichergestellt. Die Schweiz leitet in diesem Projekt das ersten Arbeitspaket zum Informationsaustausch über Europäische Photovoltaik Programme. Im Berichtsjahr wurden ausführliche Berichte zu den Ausrichtungen und Inhalten dieser Programme zusammengestellt und Hinsicht auf eine verstärkte Zusammenarbeit analysiert [60].

Internationale Zusammenarbeit

Auf der Projektebene konnte die erfolgreiche **Zusammenarbeit innerhalb der EU** in bestehenden und neuen Projekten fortgesetzt werden. Im Jahr 2005 waren es 16 Projekte im 5. bzw. 6. Rahmenforschungsprogramm der EU, die Beteiligung an zwei neuen *Integrierten Projekten* beginnt anfangs 2006. Ein weiteres Projekt fand mit der esa statt. Die Schweizer Photovoltaik konnte sich damit sehr erfolgreich an den Ausschreibungen im 6. Rahmenforschungsprogramm der EU beteiligen. Es findet ein regelmässiger Kontakt mit Programmverantwortlichen in EU-Ländern statt, ebenso mit den zuständigen Einheiten bei der Europäischen Kommission.

Aufgrund des Berichtes ***A Vision for Photovoltaic Technology*** [61] des *Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV TRAC)* der Europäischen Kommission wurde 2005 die ***Europäische Photovoltaik Technologie Plattform*** gegründet [62]. Technologie Plattformen sind ein neues Instrument, welches für ausgewählte Technologien eine breitere Trägerschaft und eine gemeinsame Strategie der beteiligten Akteure ermöglichen soll, indem typischerweise Forschungskreise, Industrie, der Finanzsektor und staatliche Stellen in einer gemeinsam getragenen Plattform eingebunden sind und die notwendigen F&E Anstrengungen sowie die Massnahmen zur Umsetzung koordiniert angehen. Von besonderer Bedeutung ist dabei einerseits die starke Einbindung der Industrie, welche im Rahmen der Technologie-Plattformen eine tragende Rolle spielt. Andererseits wird im Rahmen einer Technologie-Plattform ein strategischer Forschungsplan definiert und umgesetzt. Dieser ist für die Photovoltaik insbesondere auf die Ausgestaltung des 7. Rahmenforschungsprogramms der EU von Wichtigkeit. Durch die Gründung dieser Photovoltaik Technologie Plattform wird die langfristige strategische Bedeutung der Photovoltaik hervorgehoben. Die Schweiz ist sowohl im Steuerungsausschuss wie in einzelnen Arbeitsgruppen vertreten.

Weitere Kontakte wurden mit internationalen Stellen mit Bedeutung für die Entwicklungszusammenarbeit gepflegt (Weltbank, GEF, IFC, UNDP, UNEP, GTZ, KfW, REEEP u.a.). Die Schweizer Photovoltaik ist angesichts dieser zahlreichen Wechselwirkungen international weiterhin sehr präsent.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde die vielfältige nationale Zusammenarbeit anlässlich von verschiedenen Projekten weiter gepflegt; daran beteiligt waren Hochschulen, Fachhochschulen, Forschungsinstitute und die Privatwirtschaft. Die Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen konnte deutlich intensiviert werden und das Interesse an der Photovoltaik hält auch bei einem gedämpften Schweizer Markt an.

Auf Programmebene wurde die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter gepflegt. Besonders hervorzuheben sind dazu der stete Austausch mit dem Staatssekretariat für Bildung und Forschung SBF, der KTI, dem BUWAL (neu BAFU), der DEZA und dem seco sowie aus der Elektrizitätswirtschaft dem VSE, der *swisselectric* und der *Gesellschaft Mont-Soleil*. Diese vielfältigen Kontakte erlauben die anhaltend wichtige breite Abstützung des Programms. Als konkretes Beispiel dieser erfolgreichen Zusammenarbeit ist der im Berichtsjahr neu geschaffene IEA PVPS Pool zu erwähnen (vgl. oben).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die aufgrund des Entlastungsprogramms 2003 des Bundes beschlossenen Kürzungen sind seit 2004 vorab für die Mittel für P+D Vorhaben wirksam und haben damit eine einschneidende Wirkung auf die Ausgestaltung und die Möglichkeiten im Programm Photovoltaik. Im Berichtsjahr 2005 konnten wie bereits 2004 **keine neuen P+D Projekte** mit BFE-Mitteln unterstützt werden. Diese Entwicklung ist sehr zu bedauern, weil damit ein wesentliches Glied in der Umsetzung von Forschung und Entwicklung hin zu industriellen Produkten und Verfahren, und damit zum Markt stark geschwächt wird. Dies trifft die Photovoltaik zu einem Zeitpunkt, in dem sich nach langem Aufbau eine verstärkte Umsetzung im Programm Photovoltaik abzeichnet.

Der weltweite Photovoltaikmarkt boomt aufgrund grossangelegter Förderprogramme bzw. Einspeisevergütungen immer mehr Länder weiterhin mit jährlichen Wachstumsraten von rund 35%. 2005 erreichte die weltweite Modulproduktion gegen 1’500 MWp. Damit sind zur Zeit gute Exportmöglichkeiten für innovative Produkte vorhanden. Demgegenüber stagniert der schweizerische Photovoltaikmarkt seit rund 10 Jahren, er hielt sich im Jahr 2005 den dank der Initiative einzelner innovativer Stromversorger etwas über dem Vorjahreswert von ca. 2 MWp.

Die noch verbleibenden Photovoltaik P+D Projekte behandelten schwerpunktmässig weiterhin die Thematik der **Photovoltaik Gebäudeintegration**, insbesondere für Anlagen auf Flachdächern und die Verwendung von Dünnschicht Modulen.

Einige P+D Erfolge der letzten Jahre im Überblick

An dieser Stelle wird auf eine Auswahl von **erfolgreichen Photovoltaik P+D Projekten** der letzten Jahre hingewiesen, die entweder nachhaltig im Markt umgesetzt wurden, oder die mit verschiedenen Auszeichnungen die Innovationskraft dieser Projekte und Produkte belegen.

Das mit der ***15-kWp-Anlage in Trevano*** erstmals im Massstab 1:1 getestete *Sarnasol* System bestehend aus amorphen Dünnschichtzellenmodulen verbunden mit einer dichten Kunststofffolie [25a] wird von Sarnafil in Zusammenarbeit mit *Solar Integrated* neu unter dem Namen *Solar Dach* oder *Smart*Roof*!* ® vermarket. Bisher konnten mit diesem System diverse Anlagen erfolgreich realisiert werden (siehe Fig. 4).

Mit etwas verzögerter Wirkung konnte das Projekt ***Montagesystem AluTec*** (Abschluss 2002 [26b]) bzw. die Weiterentwicklung ***Montagesystem AluStand®*** [26a] (siehe Fig. 5) erfolgreich umgesetzt werden. Im Jahr 2005 wurden vor allem in Deutschland Profile für eine PV Leistung von 10 MWp verkauft. Insgesamt konnten mit diesem System seit der Markteinführung bisher Anlagen mit einer Leistung von rund 30 MWp installiert werden.

Geradezu beispielhaft konnte die Firma Sputnik Engineering im Rahmen von Photovoltaik For-

Figur 4: *188-kWp-Solar Dach in Fulda (Bildquelle Sarnafil)*

Figur 5: *27-kWp-Anlage Alustand Hünenberg (Bildquelle Urs Bühler Energy Systems)*

Figur 6: *Solarmax 2000 / 3000*
(Bildquelle: Sputnik Engineering)

Figur 7: *5-MWp-Dachintegration Sonnenfleck*
(www.sonnenfleck.com)

schungs- und P+D-Projekten in Zusammenarbeit mit der Bieler Fachhochschule die notwendigen Grundlagen im Bereich der Photovoltaik Wechselrichtertechnologie erarbeiten, Prototypen entwickeln und im praktischen Einsatz 1:1 testen. Die SolarMax® Geräte (siehe Fig. 6) sind heute die Nummer 3 auf dem Europäischen Markt. 2005 wurden Wechselrichter für eine PV Anlagenleistung von rund 125 MWp produziert (mehr als das 50-fache des Schweizer Markts), was im In- und Ausland bei Sputnik und den Zulieferfirmen rund 120 Arbeitsplätze sichert.

Ein weiteres Beispiel aus der Liste erfolgreicher Projekte ist die von den beiden Firmen Schweizer Metallbau und Enecolo in Zusammenarbeit realisierte Photovoltaik P+D Entwicklung ***Dachintegrationsrahmen SOLRIF®*** [27c] (siehe Fig. 7). Seit der Markteinführung wurden auf dem Europäischen Markt SOLRIF® Rahmen für dachintegrierte Anlagen mit einer Gesamtleistung von über 10 MWp ausgeliefert.

Wie SolarMax®, SOLRIF® oder AluStand® beispielhaft aufzeigen, bildeten innovative Photovoltaik Forschungs- und P+D Vorhaben in Vergangenheit immer wieder die Basis für die erfolgreiche Umsetzung von Produkten im Binnenmarkt und im Export.

LAUFENDE P+D PROJEKTE

Bei den laufenden Projekten zeigte die ***integrierte 15.4-kWp-Flachdachanlage CPT Solar*** (Centro Professionale Trevano) mit amorphen Dünnschichtzellen [25a] (siehe Fig. 8) das Potential dieses Konzepts auf. Der bisher erreichte hohe Ertrag von deutlich über 1’000 kWh/kWp (2004: 1’070 kWh/kWp; 2005: 1’077 kWh/kWp) belegt die optimale Planung und Auslegung dieser Installation mit nahezu horizontal (3°) ausgerichteten Modulen.

Die noch bis Sommer 2006 laufenden Untersuchungen zur ***25-kWp-Gründachanlage Solgreen Kraftwerk 1*** [27a] (siehe Fig. 9) belegen deutlich, dass die Kombination von Gründach und Photovoltaik aus Sicht der Solarstromerzeugung und aus Sicht der Dachbegrünung eine erfolgreiche Variante darstellt. Mit rund 1’000 kWh/kWp liegt die Jahresproduktion auf einem vergleichsweise hohen Niveau. Bei allen verwendeten Bodensubstraten liegt der pH-Wert im neutralen Bereich und ist für die im Boden verankerte Unterkonstruktion unproblematisch. Bei allen Bodensubstraten findet eine mehr oder weniger starke Dachbegrünung statt. Auf extensiven Flächen überschritten keine Pflanzen die Modulunterkanten, auf humusreicheren Versuchsflächen traten vereinzelt höhere Pflanzen auf, die aus Beschattungsgründen entfernt werden mussten.

Figur 8: *15.4-kWp-PV-Flachdachintegration CPT*
(Bildquelle: NET)

Figur 9: *Solgreen Kraftwerk 1*
(Bildquelle: NET)

Die laufenden Projekte umfassen (in chronologischer Reihenfolge):

Komponentenentwicklung

- ***Neues PV Fassadensystem für Module mit Dünnschichtzellen*** (Entwicklung eines universellen Fassadensystems wahlweise mit oder ohne thermischer Isolation für Dünnschichtzellenmodule; Leitung: *Zagsolar / Wyss Aluhit)* [28a]

Anlagen

- ***15.4-kWp-Flachdachintegration CPT Solar*** (Pilotmässiger Einsatz einer neu entwickelten Kombination von amorphen Dünnschichtzellenmodulen mit einer dichten Kunststofffolie; Leitung: *LEEE-TISO*) [25a] (siehe Fig. 8)
- ***Autonome 5.7-kWp-Photovoltaik-Anlage in Kombination mit einem BHKW*** (Ganzjährige autonome Energieversorgung von 2 Chalets mittels Photovoltaik, BHKW, thermischen Kollektoren und Holz; Leitung: *A. Reinhard*) [29]
- ***17.6-kWp-Flachdachanlage mit Dünnschichtzellenmodulen ETHZ*** (Optisch diskrete Flachdachanlage mit amorphen Zellen; Leitung: *BE Netz*) [30]
- ***12-kWp-Solight-Pilotanlage*** (Pilotmässige Umsetzung von zwei verschiedenen Solight Varianten; Leitung: *Energiebüro*) [31a]
- ***Kleine, autonome Stromversorgungen mit Photovoltaik und Brennstoffzellen*** (PV Insel Kleinsysteme mit Brennstoffzellen als Backup Stromlieferant zur autonomen Versorgung von netzentfernten Messsystemen im Pilotbetrieb; Leitung: *Muntwyler Energietechnik*) [32]
- ***25-kWp-Gründachintegration Solgreen Kraftwerk 1, Zürich*** (Piloteinsatz einer neu entwickelten Modulhaltekonstruktion für den Gründachbereich; Leitung: *Enecolo*) [27a] (siehe Fig. 9)

Messkampagnen

- ***Messkampagne Wittigkofen*** (Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80-kWp-Fassade Wittigkofen; Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [33a]

Studien - Hilfsmittel - diverse Projekte

- ***Photovoltaikstatistik der Schweiz 2004*** (Leitung: *Ingenieurbüro Hostettler*) [33b]
- ***Solarstrom vom EW*** (Leitung: *Linder Kommunikation*) [34]
- ***Solar Electri City Guide - Schweizer Solarstromführer für die Gemeinden*** (Leitung: *NET*) [35a]
- ***Solarenergie Potential in Genf*** (Studie zum Flächenpotential für thermische Solaranlagen und Photovoltaikanlagen im Gebäudepark der öffentlichen Hand im Kanton Genf (Leitung: *NET*) [35b]

IM JAHR 2005 ABGESCHLOSSENE PROJEKTE

Im Jahr 2005 wurden die folgenden P+D Projekte abgeschlossen (in chronologischer Reihenfolge):

Anlagen

- ***23.5-kWp-PV-Anlage Zollhof Kreuzlingen*** (Flachdach Demonstrationsanlage mit Grossanzeige an gut frequentierter Lage; Leitung: *Böhni Energie und Umwelt*) [36] (siehe Fig. 10)
- ***62-kWp-Flachdachanlage mit PowerGuard Solardachplatten*** (Multifunktionale PV Flachdachanlage mit gleichzeitiger thermischer Isolation des Dachs, wobei die thermischen Dämmelemente auch die Funktion der Modulhaltekonstruktion übernehmen; Leitung: *Zagsolar*) [28b] (siehe Fig. 11)
- ***Photovoltaik Anlagen Corvigliabahn und Piz Nair St. Moritz*** (Realisierung einer 17.8-kWp-Anlage entlang der Corvigliabahn und einer 9.7-kWp- und 13.5-kWp-Fassadenintegration in die Talstation, bzw. die Bergstation der Piz Nair Seilbahn; Leitung: *SunTechnics Fabrisolar*) [37]
- ***27-kWp-AnlageAluStandHünenberg(Demonstrationsanlage mit Verwendung der Flachdachvariante des Modulhaltesystems AluTec*** (AluStand®); Leitung: *Urs Bühler Energy Systems and Engineering*) [26a] (siehe Fig. 5)
- ***3-kWp-Anlage Ferme Amburnex*** (Inselanlage mit Hilfs-Dieselaggregat zur elektrischen Versorgung einer Alp, autonome Anlage; Leitung: *Services Industriels Lausanne*) [38]
- ***RESURGENCE – Renewable Energy Systems for Urban Regeneration in Cities of Europe*** (Realisierung von total 1.3-MWp-PV-Anlagen im städtischen Raum in den 5 Ländern England, Holland, Dänemark, Deutschland und der Schweiz, EU Projekt; Leitung Schweizer Teil: *Enecolo*) [27b]

Messkampagnen

- ***PV DünnFilmTest Migros Zürich*** (18 Testanlagen mit PV Dünnschichtzellen-Modulen im direkten Vergleich, Gesamtleistung: 24.5 kWp; Leitung: *Energiebüro*) [31b] (siehe Fig. 12)
- ***Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III*** (Detaillierte Messkampagne zur revidierten 100 kWp PV Anlage entlang der SBB Linie Bellinzona-Locarno; Leitung: *LEEE-TISO*) [25b] (siehe Fig. 13)
- ***Messkampagne 100-kWp-Anlage A 13*** (Leitung: *TNC Consulting*) [39]

Studien - Hilfsmittel - diverse Projekte

- ***Integration der neuen IEC Norm 60364-7-712 für Photovoltaik in die nationalen Installationsnormen NIN*** (Aktualisierung, bzw. Ersatz der veralteten PV Normen; Leitung: *Electrosuisse*) [40]

- ***GISS Gebäude-Integrierte-Solarstrom-Systeme*** (Studie zur besseren Umsetzung von gebäudeintegrierten Solarstromsystemen durch Abbau von Hindernissen und Informationsmängeln und Erhöhung der Fachkompetenz bei Planern, Investoren und Bauherren; Leitung: *SZFF Schweizerische Zentralstelle für Fenster- & Fassadenbau*) [41]

Figur 10: *PV Anlage Zollhof Kreuzlingen (Bildquelle NET)*

Figur 12: *PV DünnFilmTest (Bildquelle NET)*

Figur 11: *62-kWp-Anlage mit PowerGuard Modulen (Bildquelle: Zagsolar)*

Figur 13: *Messkampagne zur 100-kWp-Anlage AET III (Bildquelle: TISO)*

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Global war das Jahr 2005 für die Photovoltaik ein überaus erfolgreiches Jahr. In einer durch hohes Wachstum gezeichneten Marktdynamik konnte die Photovoltaik Industrie ihren Ausbau fortsetzen. Die von der Landesbank Baden-Württemberg publizierte Branchenanalyse [53] bringt die Entwicklung mit einem Satz auf den Punkt: „Das industrielle Zeitalter beginnt“. Durch das rasche Wachstum hat sich aber ein Engpass in der Verfügbarkeit von Rohsilizium eingestellt. Dieser Engpass führt zu enormem Druck für die Industrie, Produktionskapazitäten können nicht ausgelastet werden, Produkte können nicht geliefert werden und zudem steigen damit naturgemäss auch die Preise. Silizium ist dabei keine wirkliche Mangelware, bekanntlich gibt es davon sprichwörtlich wie „Sand am Meer.“ Aufgrund des schnellen Marktwachstums der Photovoltaik wurde aber die sich abzeichnende Verknappung des Rohsiliziums früher als erwartet erreicht, insbesondere früher als die neu geplanten Fertigungskapazitäten von Silizium bereit stehen. Es wird allgemein erwartet, dass diese Situation während 2006 anhalten und frühestens 2007 eine Entspannung auftreten wird. Für die Dünnschichtsolarzellen entsteht aber aufgrund dieser angespannten Situation ein interessantes „window of opportunity“ – sprich Chancen für diese Technologien.

Vor diesem Hintergrund ist auch die Situation der Schweizer Photovoltaik zu beurteilen: Forschung und Technologie befanden sich bisher aufgrund einer breiten Abstützung auf einem auch international betrachtet hohen Niveau. Industrielle Umsetzung und internationale Ausrichtung werden durch die zahlreichen KTI- und EU-Projekte be-

legt. Andererseits bestehen durch die fehlenden P+D-Mittel und dem stagnierenden Markt gewichtige Nachteile für die Umsetzung im eigenen Land. Trotz diesen erschwerten Bedingungen finden auch in der Schweiz wachsende industrielle Photovoltaik Aktivitäten statt. Gestützt auf Umfragen wird das Exportvolumen der Schweizer Photovoltaik für 2005 auf mindestens 80 Mio. Fr. geschätzt. Zusammen mit dem Heimmarkt kann der Gesamtumsatz der Schweizer Photovoltaik mit mindestens 100 Mio. Fr. beziffert werden.

Die bisherigen Anstrengungen im Schweizer Photovoltaik Programm bilden die wissenschaftlich-technische Ausgangslage, um im rasch wachsenden Photovoltaik Markt mit Schweizer Innovationen und Produkten präsent zu sein. Die lange praktische Erfahrung mit dem Bau und Betrieb von zahlreichen Photovoltaik Anlagen führten zu wichtigen Erkenntnissen, welche die Zuverlässigkeit der Anlagen und eine hohe spezifische Energieproduktion zur Folge haben. Damit sind die technologischen Voraussetzungen gegeben, dass die Schweizer Photovoltaik mit ihrem wissenschaftlich-technischen Know-how und ihren Produkten auch im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig und erfolgreich sein kann.

Nebst der bekannten Tatsache, dass die Schweiz bezüglich den Rahmenbedingungen am Markt international zusehends ins Hintertreffen gerät, zeichnet sich aber auch im Bereich der Forschung in letzter Zeit eine ähnliche Entwicklung ab. Internationale Erhebungen zeigen, dass die Aufwendungen für die Photovoltaik Forschung in vielen Ländern steigen und die Bedeutung der Forschung generell zunimmt. Nicht zuletzt wird dies auch durch die Schaffung der Europäischen Photovoltaik Technologie Plattform unterstrichen. Demgegenüber wird die Situation in der Schweiz, trotz breiter Abstützung des Programms, immer schwieriger. Damit entsteht eine weitere internationale Diskrepanz, welche der bisherigen Leistung der Schweizer Photovoltaik, sowohl in Forschung wie in der Industrie, nicht gerecht wird. Bestens international auf allen Ebenen vernetzt und mit einem weltweit anerkannten Know-how hat die Schweizer Photovoltaik das Potenzial, im rasch wachsenden Markt eine bedeutende Rolle zu spielen.

Das Programm Photovoltaik wird auch in Zukunft bestrebt sein, durch die breite Abstützung eine kritische Grösse zu bewahren. Dazu soll von allen möglichen Fördermechanismen Gebrauch gemacht werden und diese gleichzeitig optimal koordiniert und zielführend eingesetzt werden. Dies wird aber allein nicht genügen, um das Potenzial der Schweizer Photovoltaik nachhaltig umzusetzen. Gefragt sind Massnahmen und eine Trendumkehr in der Entwicklung der finanziellen Mittel, welche es erlauben, auch in der Forschung international mitzuhalten. Die Schweizer Photovoltaik hat in den letzten Jahren eindrücklich den Beweis erbracht, dass sie zu Spitzenleistungen in der Lage ist, welche mutige Schritte in diese Richtung rechtfertigen.

Die EMPA organisierte im April 2005 ein Fachseminar zur Solarzellenforschung [63]. Die Schweizer Photovoltaik war auch an der 20. europäischen Photovoltaik Konferenz im Juni in Barcelona mit ihren Beiträgen gut vertreten [64]. Bei den SIG in Genf fand im November 2005 die besonders aus Industriekreisen gut besuchte 6. Nationale Photovoltaik Tagung statt [65]. Der nationale Informations- und Erfahrungsaustausch bleibt damit in der Schweiz weiterhin ein wichtiges Thema. Die Photovoltaik Webseite http://www.photovoltaic.ch beinhaltet alle wesentlichen Informationen sowie Berichte und dient damit als wichtiges Informationsinstrument, das laufend unterhalten wird.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Publikationsnummern in Klammern)

Einzelne Jahresberichte und Schlussberichte können von http://www.photovoltaic.ch heruntergeladen werden. Unter den aufgeführten Internet-Adressen sind weitergehende Informationen vorhanden.

[1] C. Ballif, (ballif@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, *Neuchâtel: a)* ***Thin film silicon solar cells: advanced processing and characterization*** (JB) • *b)* ***High rate deposition of µc-Si:H silicon thin-film solar cell devices in industrial KAI PE-CVD reactor*** (JB) • *c)* ***Stability of advanced LP-CVD ZnO within encapsulated thin film silicon solar cells*** (JB) • *d)* ***Optical nano-gratings and continuous processing for improved performance flexible solar cells*** (JB) • *e)* ***FLEXCELLENCE*** www.unine.ch/flex/ • *f)* ***ATHLET*** http://www.hmi.de/projects/athlet/ / www.unine.ch/pv.

[2] Ch. Hollenstein, (christophe.hollenstein@epfl.ch), CRPP / EPFL, *Lausanne: a)* ***A new large area VHF reactor for high rate deposition of micro-crystalline silicon for solar cells*** (JB) • *b)* ***Numerical Modelling for large area plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) reactor development*** (JB) http://crppwww.epfl.ch/crpp_proc.htm.

[3] F. Baumgartner, (Franz.Baumgartner@ntb.ch), NTB, *Buchs,*: ***Spectral photocurrent measurement system of thin film silicon solar cells and modules*** (JB) http://www.ntb.ch/pv.

[4] S. Schneeberger, (sschneeberger@hct.ch), HCT SHAPING SYSTEMS, *Cheseaux*: ***Bifacial thin industrial multi-crystalline silicon solar cells - BITHINK*** http://www2.hct.ch.

[5] A.N. Tiwari, (tiwari@phys), ETH, *Zürich*: *a)* ***FLEXCIM: Flexible CIGS solar cells and mini-modules*** (JB) • *b)* ***New buffer layers for efficient chalcopyrite solar cells (NEBULES)*** (JB) • *c)* ***LARCIS*** • *d)* ***ATHLET*** http://www.hmi.de/projects/athlet/ / http://www.tfp.ethz.ch.

[6] M. Grätzel, (michael.graetzel@epfl.ch), EPFL, *Lausanne: a)* ***Dye-sensitised Nanocrystalline Solar Cells*** (JB) • *b)* ***Voltage Enhancement of Dye Solar Cells at Elevated Operating Temperatures*** (JB) • *c)* ***MOLYCELL - Molecular Orientation, Low bandgap and new hYbrid device concepts for the improvement of flexible organic solar CELLs*** (JB) http://isic.epfl.ch/.

[7] A. Meyer, (andreas@solaronix.com), SOLARONIX, *Aubonne: a)* ***A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum – FULLSPECTRUM*** http://www.fullspectrum-eu.org/ • *b)* ***The European Polymer Solar Battery EURO-PSB*** (JB) http://www.solaronix.com.

[8] J.A.E. Månson, (jan-anders.manson@epfl.ch), EPFL / LTC, *Lausanne*: **Photovoltaic Textile** (JB) http://dmxwww.epfl.ch/ltc/ltc_main.htm.

[9] G. Calzaferri, (gion.calzaferri@iac.unibe.ch), UNI, *Bern:* ***Photoelektrochemische und Photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie*** (JB) http://www.dcb.unibe.ch/groups/calzaferri/.

[10] T. Szacsvay, (sz@3-s.ch), 3S, *Lyss: a)* ***Photovoltaics Modules with Antireflex Glass*** (JB) • *b)* ***BIPV-CIS - Improved integration of PV into existing buildings by using thin firm modules for retrofit*** (JB) http://www.3-s.ch.

[11] R. Züst, (reinhard.zuest@telsonic.com), TELSONIC, *Bronschhofen:* ***CONSOL - Connection Technologies for Thin-Film Solar Cells*** (JB) http://www.telsonic.com.

[12] A. Bernasconi , (angelo.bernasconi@supsi.ch), LEEE, SUPSI, *Canobbio: a)* ***Centrale LEEE-TISO Periodo VII : 2003-2006*** (JB) • *b)* ***PV Enlargement*** (JB) • *c)* ***PERFORMANCE*** http://www.pv-performance.org/ • *d)* ***PV Catapult*** (JB) http://www.leee.supsi.ch.

[13] H. Häberlin, (heinrich.haeberlin@hti.bfh.ch), HTI, *Burgdorf:* ***Photovoltaik-Systemtechnik 2005-2006 (PVSYTE)*** (JB) http://www.pvtest.ch.

[14] N. Morel , (nicolas.morel@epfl.ch), LESO-PB / EPFL, *Lausanne*: ***SUNtool - A Sustainable Urban Neighborhood Modelling Tool*** (JB) http://www.suntool.net, http://lesomail.epfl.ch.

[15] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, *Mönchaltorf: a)* ***PVSAT2 - Intelligent Performance Check of PV System Operation Based on Satellite Data*** (JB) • *b)* ***Envisolar*** http://envisolar.com, http://www.solarstrom.ch.

[16] P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, *Genève: a)* ***Energy specific Solar Radiation Data from Meteosat Second Generation: The Heliosat-3 project*** (JB) • *b)* A. Mermoud, andre.mermoud@cuepe.unige.ch, ***Erweiterung der Simulationssoftware PVSyst für solare Wasserpumpen*** (JB) • *c)* P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), ***Solar Resource Management, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 36*** http://www.unige.ch/cuepe.

[17] P. Affolter, (pascal.affolter@solstis.ch), SOLSTIS, *Lausanne*: ***PV Catapult*** http://www.solstis.ch.

[18] W. Durisch, (wilhelm.durisch@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum – FULLSPECTRUM*** http://www.fullspectrum-eu.org/.

[19] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com) SOLAR IMPULSE, *Lausanne*: ***Solarimpulse*** http://www.solar-impulse.com.

[20] P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, *Aarau:* ***Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm Task 1*** (JB) http://www.novaenergie.ch/.

[21] Th. Nordmann, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, *Erlenbach:* ***IEA PVPS Programm Task 2 Schweizer Beitrag 2005*** (JB) http://www.tnc.ch.

[22] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, *St. Ursen: a)* ***REPIC: Renewable Energy Promotion in International Co-operation*** (JB) http://www.repic.ch • *b)* ***PV-ERA-NET: Networking and Integration of National and Regional PV Programmes*** (JB) http://www.pv-era.net, http://www.netenergy.ch.

[23] S. Kunz, (kunz@meteotest.ch), METEOTEST, *Bern:* ***Solar Resource Management, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 36,*** http://www.meteotest.ch.

[24] M. Real, (alphareal@access.ch), ALPHA REAL, *Zürich: a)* ***IEC Normenarbeit für PV Systeme*** (JB) http://www.iec.ch • *b)* ***PVGAP,*** http://www.pvgap.org/.

Liste der P+D-Projekte

[25] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), LEEE-TISO, *Canobbio: a)* ***Flat roof integration CPT Solar*** (JB) • *b)* ***Monitoraggio dell'impianto PV da 100 kWp AET III a Riazzino*** (SB) (250077) http://www.leee.supsi.ch.

[26] U. Bühler (u.bue@bluewin.ch), URS BÜHLER ENERGY SYSTEMS AND ENGINEERING, *Cham: a)* ***27-kWp-Anlage Hünenberg, Montagesystem Alustand, Freizeit- und Sportgebäude Ehret*** (JB) • *b)* **Slopedroof- and façade – mounting-system AluTec / AluVer** (SB) (220181) http://www.alustand.ch.

[27] M. Meier, (info@enecolo.ch), ENECOLO, *Mönchaltorf: a)* ***Solgreen Kraftwerk 1 Zürich*** (JB) • *b)* S. Stettler (sandra.stettler@enecolo.ch), R. Kröni (robert.kroeni@edisunpower.com), EDISUN POWER, *Zürich:* ***RESURGENCE - Renewable Energy Systems for Urban Regeneration in Cities of Europe*** (JB) • *c)* P. Toggweiler, (info@enecolo.ch): ***SOLRIF (Solar Roof Integration Frame)*** (SB) http://www.solarstrom.ch.

[28] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, *Kriens: a)* ***Photovoltaic- Façade, Mounting System for Thin-Film-Modules*** (JB) • *b)* **62 kWp Flachdachanlage mit PowerGuard Solardachplatten** (SB) (250038) http://www.zagsolar.ch.

[29] A. Reinhard, ***Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und BHKW***.

[30] A. Kottmann, (kottmann@benetz.ch), BE NETZ AG, *Luzern:* ***17.6 kWp Installation with Thin-Film-Modules on the Flat Roof at the CNB-Building of the ETHZ*** (JB) http://www.benetz.ch.

[31] Ch. Meier, (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, *Zürich: a)* ***Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT*** (JB) • *b)* ***PV-ThinFilmTest*** (SB) (250052) http://www.energieburo.ch.

[32] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK, *Zollikofen:* ***Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzellen*** (JB) http://www.solarcenter.ch.

[33] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, *Bern: a)* ***Messkampagne Wittigkofen*** (JB) • *b)* ***Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2004*** (JB).

[34] E. Linder, (zuerich@linder-kom.ch), LINDER KOMMUNIKATION, *Zürich:* ***Solarstrom vom EW*** (JB) http://www.linder-kom.ch / http://www.erneuerbar.ch/d/oekostrom/index.htm#top.

[35] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, *St. Ursen: a)* ***Solar Electri City Guide -Publikationen ‚Solarstrom in der Gemeinde'*** (JB) • *b)* ***Solar Energy Potential in Geneva*** (JB) http://www.netenergy.ch.

[36] Th. Böhni (boehni@euu.ch), BÖHNI ENERGIE UND UMWELT, *Frauenfeld:* ***23.5-kWp-PV-Anlage Zollhof Kreuzlingen*** (SB) (250037) http://www.euu.ch.

[37] S. Leu (info@SunTechnics.ch), SUNTECHNICS FABRISOLAR, *Küsnacht:* ***PV St. Moritz - Corvigliabahn - Piz Nair*** (http://www.suntechnics.ch).

[38] J. Pahud, (jose.pahud@lausanne.ch), SERVICES INDUSTRIELS, *Lausanne:* ***Amburnex Solar Farm (3 kWp)*** http://www.lausanne.ch/energie.

[39] Th. Nordmann, (mail@tnc.ch), TNC CONSULTING, *Erlenbach:* ***100- kWp- PV-Netzverbundanlage A13 Messkampagne, Periode 2005*** (JB) http://www.tnc.ch.

[40] J. Keller, (jost.keller@electrosuisse.ch), ELECTROSUISSE, *Fehraltorf:* ***Integration der neuen IEC Norm 60364-7-712 für Photovoltaik in die nationalen Installationsnormen NIN*** http://www.electrosuisse.ch/.

[41] R. Locher, (rlocher@szff.ch), SCHWEIZERISCHE ZENTRALSTELLE FÜR FENSTER - + FASSADENBAU (SZFF), *Dietikon:* ***Gebäude-Integrierte-Solarstrom-Systeme GISS*** (SB) (250097) http://www.szff.ch/.

Referenzen

[42] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007***, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2004.

[43] ***Forschungskonzept Photovoltaik 2004 – 2007***, Bundesamt für Energie, 2005, http://www.photovoltaic.ch.

[44] www.dyesol.com.

[45] http://www.pvtest.ch > Publikationen.

[46] http://www.pvtest.ch > PV-Messdaten.

[47] http://www.spyce.ch.

[48] http://www.repic.ch

[49] http://www.pvsyst.com

[50] ***Annual Report 2005***, IEA PVPS, 2006, http://www.iea-pvps.org/.

[51] ***National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2004***, P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, May 2005.

[52] ***Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2004***, IEA PVPS Task 1 – 14: 2005, http://www.iea-pvps.org.

[53] ***Branchenanalyse Photovoltaik 2005 – Das industrielle Zeitalter beginnt***, Landesbank Baden-Württemberg, April 2005.

[54] ***Sun screen II - Investment opportunities in solar power***, M. Rogol, CLSA, July 2005.

[55] ***Nachhaltigkeitsstudie – Solarenergie 2005***, M. Fawer-Wasser, Sarasin, November 2005.

[56] ***IEA PVPS Newsletter***, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pius.huesser@novaenergie.ch).

[57] ***Performance Database***, IEA PVPS Task 2, Version 1:19, June 2005, http://www.task2.org.

[58] ***Global Economic Survey***, IEA PVPS Task 2, http://www.iea-pvps-task2.org/Survey/index.htm

[59] http://europa.eu.int/comm/research/fp6/index_en.cfm?p=9_eranet

[60] http://www.pv-era.net > Results & Publications

[61] ***A Vision for Photovoltaic Technology***, Photovoltaic Technology Research Advisory Council (PV-TRAC), 2005.

[62] ***European Photovoltaic Technology Platform,*** http://www.eupvplatform.org

[63] ***Conference Photovoltaics of the Future,*** 12. April 2005, EMPA AKADEMIE, Überlandstrasse 129, Dübendorf

[64] ***Die 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition Barcelona 06. - 10.06.2005 aus Schweizer Sicht***, zu beziehen bei NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, http://www.photovoltaic.ch.

[65] ***6. Nationale Photovoltaiktagung 2005***, SIG Genf, November 2005, Unterlagen zu beziehen bei NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@photovoltaic.ch

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN
Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2005

PROGRAMM SOLARCHEMIE / WASSERSTOFF

Armin Reller
armin.reller@physik.uni-augsburg.de

Funktionsmaterialien für regenerative Energietechnologien

Um konzentrierte Solarstrahlung mit hohem Wirkungsgrad in chemische Energieträger oder in Wertstoffe umwandeln zu können, sind geeignete, hochtemperaturbeständige Metalloxide unerlässlich. Auf dem Bild sind Komponenten aus Zirkonoxid, Hafniumoxid und anderen Metalloxiden gezeigt, die für den unter extremen Bedingungen arbeitenden Solarreaktor unabdingbar sind.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Ziel der Arbeiten des Programms *Solarchemie / Wasserstofftechnologie* ist die Bereitstellung von international konkurrenzfähigen, zuverlässigen Funktionsmaterialien und Verfahrenstechniken für die Entwicklung und den Einsatz geeigneter Energiewandler, regenerativer Energieträger und Energietechnologien.

In den vergangenen Jahren hat das Spektrum der Projektarbeiten des Programms eine Fokussierung auf zwei Schwerpunktsthemen erfahren, indem in einem ersten die regenerative Erzeugung, die Speicherung und die Nutzung von Wasserstoff und von Zink als sekundäre Energieträger untersucht werden. Der zweite Themenschwerpunkt ist der effizienten, oftmals selektiven Umwandlung von Solarstrahlung in nutzbare Energieformen wie Wärme oder Elektrostrom gewidmet.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

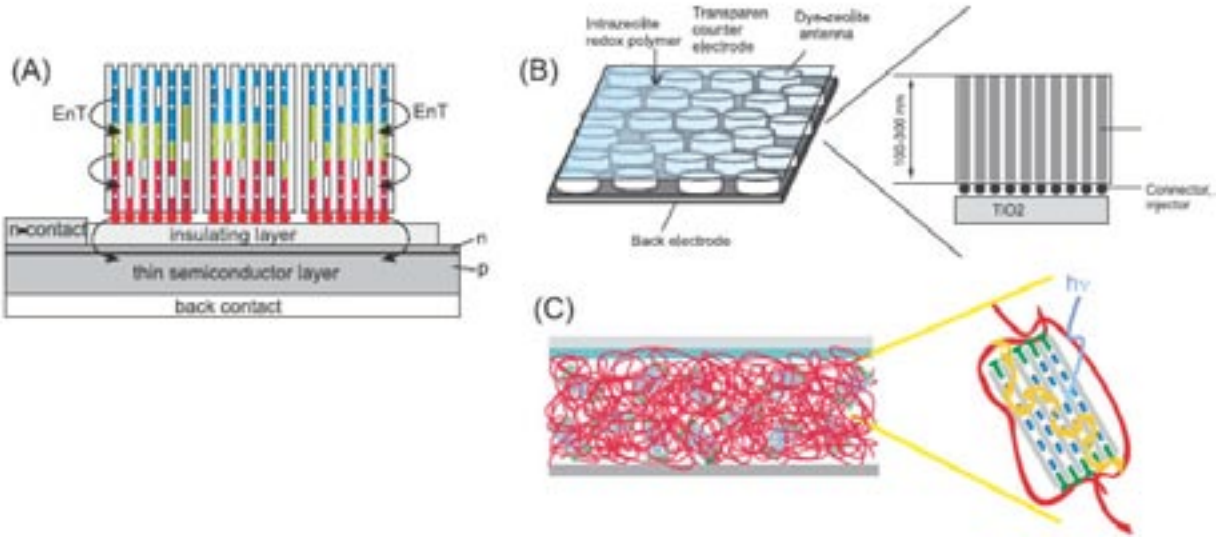
WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Solare Wasserspaltung mittels photokatalytischer und photoelektrochemischer Verfahren

Wirkungsvolle photovoltaische, photokatalytische und photoelektrochemische Systeme zur solar betriebenen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser beruhen auf der Verfügbarkeit von verlässlich funktionierenden und synergetisch zusammenwirkenden Materialien. Vom Forschungsverbund der Universität Bern, der EPFL Lausanne und der Université de Genève wurden auf diesem Gebiet bemerkenswerte und international anerkannte Fortschritte erzielt. So gelang es im Projekt ***Photochemische, photoelektrochemische und photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie*** [1], solare Strahlungsenergie mit den im Kanalsystem von Zeolith-Mikrokristallen insertierten organischen Farbstoffmolekülen effizient einzufangen und zielgerichtet auf ein Absorbersystem zu leiten. Diese Art von Antennen-Solarzelle kann nicht nur für die Tandemsolarzelle zur Wasserspaltung eingesetzt werden, sie verspricht auch für Plastik- und Dünnschichtsolarzellen sowie für Lumineszenz-Solarkonzentratoren als Funktionseinheit nutzbar zu sein (s. Fig. 1).

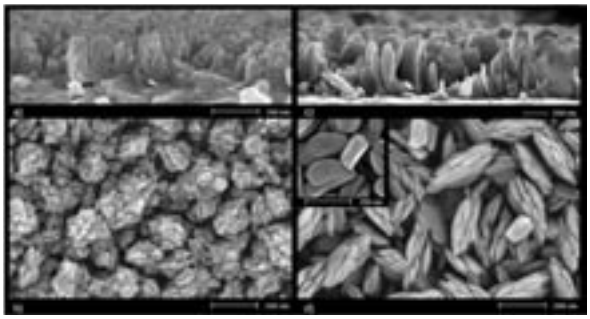
Für die photoelektrochemisch betriebene Wasserspaltung konnten mit der Kombination aus Silberchlorid als Photoanode und amorphem Silizium als Solarzelle weitere wichtige Fortschritte erzielt werden. Durch das Wechselspiel zwischen der Bildung von Silberclustern als Photsensibilisatoren mit einer in den sichtbaren Wellenbereich reichenden Absorption und Silberionen als Oxidationsmittel konnte ein funktionsfähiges System geschaffen werden. Darüber hinaus wurde der Nachweis erbracht, dass die Verbesserung der Photoanode sowie die Verwendung von mesoporösen Trägermaterialien zu markanten Wirkungsgradsteigerungen führen.

Eine komplementäre Funktionseinheit mit ebenso vielversprechenden Eigenschaften wurde im Projekt ***Generation of hydrogen by water splitting with visible light*** [2] in Form der Tandemzelle weiter optimiert. Auch hier konnten durch zielgerichtete Modifikationen der Elektrodenmaterialien



Figur 1: *Prinzip der Dünnschicht-Antennen-Solarzellen. (A) sensibilisierte Festkörper-Solarzelle, (B) sensibilisierte Farbstoff-Solarzelle und (C) sensibilisierte Plastik-Solarzelle*

sowie der Photosensibilisatoren überzeugende Resultate bezüglich des für die Wasserstoffproduktion nutzbaren Photostroms erzielt werden. Die entscheidenden Verbesserungen gelangen einerseits durch eine Silizium-Dotierung der Eisenoxid- bzw. Hämatit-Photoanode, andererseits durch die Nanostrukturierung dieses Funktionsmaterials (s. Fig. 2). Mit weiter modifizierten, auf Ruthenium-Komplexen basierten Sensibilisatoren konnte ebenfalls ein verbessertes Absorptionsverhalten sowie eine erhöhte Photostromdichte, aber auch eine höhere Photon-zu-Strom-Konversionsrate erzielt werden.



Figur 2: *Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von unterschiedlich hergestellten, mit Silizium dotierten Eisenoxid- bzw. Hämatit-Elektrodenmaterialien jeweils in der Seitenansicht (Schnittbilder a und c) und in der Aufsicht. Die beiden Schnittbilder zeigen die Ausprägung der parallel angeordneten lanzenförmigen Kristallite, die eine optimale Absorption der einfallenden Strahlung garantieren. In Abbildung d ist eine Aufnahme von undotiertem Hämatit eingefügt.*

In dem an der Université de Genève bearbeiteten Projekt ***La photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire*** [3] wurden ebenfalls materialwissenschaftliche Studien an den Elektrodenmaterialien durchgeführt. Hier wurden halbtransparente Eisenoxid-Elektroden mit Zink(II)-Ionen als p-Dotierung und Titan(IV)-Ionen als n-Dotierung modifiziert und es konnten signifikante Effekte bezüglich Photostrom-Spannungs-Charakteristik festgestellt werden. Gezielte Modifikationen des Photoelektrodenmaterials Titandioxid erlaubten eine Erweiterung des Absorptionsbereichs bis zu einer Wellenlänge von 430 nm sowie eine erstaunliche Verbesserung der Photon-zu-Strom-Umwandlungseffizienz von 30% (bei 400 nm Wellenlänge).

Die erzielten Resultate der drei genannten Forschungsteams widerspiegeln die Bedeutung der innovativen Erforschung und kompetenten Funktionalisierung von geeigneten Materialien als unabdingbares Kriterium für die Entwicklung effizienter regenerativer Energiesysteme. Da der Aufbau des notwendigen Fachwissens und der entscheidenden Erfahrungen für die Praktikabilität der Systeme vieler Jahre bedarf, hat sich die kontinuierliche finanzielle Sicherstellung der Arbeiten durch als entscheidender Faktor erwiesen.

Solarthermische Spaltung von Wasser zur Wasserstoffproduktion

Mit konzentrierter Solarstrahlung betriebene Metalloxidzyklen haben über viele Jahre des Erarbeitens der chemischen, energetischen und verfahrenstechnischen Prozessparameter dazu geführt, dass über ein für Industriekreise interessantes Scale-Up diskutiert werden kann und muss. Aufgrund umfassender experimenteller Recherchen, aber auch aufgrund ökologischer und ökonomischer Kriterien konnte als Metall/Metalloxid-System der Zink/Zinkoxid-Zyklus identifiziert werden. Im Projekt ***Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO_2-Ausstosses*** [4] wurden die chemisch-physikalischen Bedingungen gemessen und modelliert, welche eine effiziente, selektive und technisch realisierbare Separation des Zinkdampfs von den restlichen Gasen am Ausgang der verwendeten Solarreaktoren erlauben. Dieser Schritt ist von entscheidender Bedeutung für die effiziente Nutzung des Zink/Zinkoxidzyklus´ zur technisch funktionierenden Herstellung von Wasserstoff oder Zink. Die Entwicklung von geeigneten Reaktoren für diesen Prozess, die technisch äusserst schwierig zu handhabende solarthermische Reduktion von Zinkoxid, konnte mit der Realisierung des neuartigen 10 kW Prototypreaktors *Zirrus* weitgehend abgeschlossen werden. Die Testresultate, die in den Projekten ***Solar Chemical Reactor Engineering for the Solar Thermal Production of Zinc*** [5] und ***Solar Thermal Production of Zinc - Final Steps towards Scale-Up*** [6] bilden eine solide Basis für die nun anstehende Entscheidungsfindung, ob ein weiterer Scale-Up-Schritt oder ob eine Weiterführung der Arbeiten mit Industriebeteiligung an einem geeigneten Standort an die Hand genommen werden soll. Jedenfalls konnte klar gezeigt werden, dass die Umsetzung von dem solarthermisch produzierten Zink mit Wasser zu Zinkoxid und Wasserstoff mit Ausbeuten bis zu 70% gefahren werden kann. Dieses beeindruckende Ergebnis gelang vor allem mittels Bildung und Umsetzung schnell sowie vollständig hydrolysierender Zink-Nanopartikel.

Sowohl die beschriebene solarthermische Erzeugung von Wasserstoff als auch die weiter untersuchte Bildung von Synthesegas mittels der nun verlässlich kontrollierbaren Zink-Zinkoxid-Redoxprozesse sind vielversprechende Optionen für die Substitution der konventionellen, mit hohen Kohlendioxid-Emissionen verbundenen Herstellungsweisen von sekundären Energieträgern und/oder Wertstoffen. Sie leisten gleichzeitig einen wichtigen Beitrag auf dem Weg zu einer immer notwendiger erscheinenden Kreislaufwirtschaft. Die PSI-

Aktivitäten konnten aber auch aufzeigen, dass moderne, innovative Energieforschung Spin-off-Potentiale für interessante und relevante technologische Erkenntnisse aufweisen.

Als wichtige technische Innovation wurde am PSI ein High-Flux-Solarsimulator aufgebaut (Figur 3). Damit lassen sich zu jeder Zeit Experimente mit hoher Strahlungskonzentration im Temperaturbereich von 1000 – 3000 K durchführen.

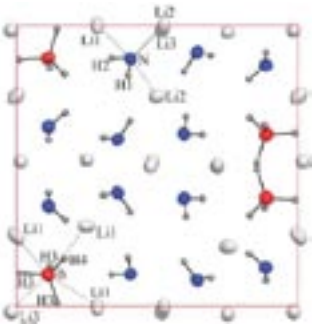
Figur 3: *Mit dem am PSI installierten High-Flux-Solarsimulator können Strahlungsleistungen bis zu 75 kW und Leistungsdichten bis zu 11´000 kW/m2 erreicht werden. Damit ergänzt diese Installation den bestehenden Solarofen in optimaler Weise.*

Solarthermische Herstellung von Wasserstoff oder Synthesegas aus fossilen Rohstoffen

Die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von Synthesegas und/oder Wasserstoff ist zu einem äusserst aktuellen Forschungs- und Entwicklungsfeld geworden. Vor diesem Hintergrund wird im Projekt ***Sauerstoff-Transfer-Materialien für die Biomassevergasung*** [7] ein indirektes Wirbelschichtvergasungsverfahren entwickelt. Diese Technologie ist ein vielversprechender Ansatz, ein stickstofffreies, wasserstoffreiches Produktgas herzustellen. Für ein solches Produktgas gibt es eine Vielzahl von Anwendungen, sei es für die Stromerzeugung über einen Gasmotor oder eine Brennstoffzelle, sei es für die Synthese von chemischen Produkten oder für die Nutzung in industriellen Prozessen. Aufgrund früherer Untersuchungen mit chemisch inerten oder auch reaktiven Bettmaterialien konnte gezeigt werden, dass chemisch reaktive Materialien den Abbau der unerwünschten Teere fördern. Die Untersuchungen an Olivin, einem Magnesium-Eisen-Silikat $(Mg,Fe)_2SiO_4$, in Wirbelschicht- und Festbettreaktoren erbrachten, dass die Sauerstoffabgabe durch das Bettmaterial bei der Oxidation von Methan eine entscheidende Rolle spielt. Als chemisch aktive Phase wurde Eisenoxid identifiziert. Mit dem Ziel Bettmaterialien zu entwickeln, welche mehr Sauerstoff in die Vergasung einspeisen und somit den Teerabbau noch stärker fördern, wurden verschiedene Metalloxide mit Perovskitstruktur getestet. Die Messungen zeigten, dass die Umsetzung von Kohlenwasserstoffen durch leicht verfügbaren Gittersauerstoff markant erhöht werden kann. Aufgrund von Messreihen wurde $Sr_{0.7}Ba_{0.3}Fe_{0.9}Mn_{0.1}O_3$ als vielversprechender Kandidat identifiziert, deshalb für vertiefende Messungen und für eine nun erforderliche Kosten-Nutzen-Abschätzung des Gesamtprozesses ausgewählt.

Speicherung von Wasserstoff

Obwohl Wasserstoff als einer der wichtigsten Energievektoren der Zukunft gilt, sind zentrale Fragen betreffend seiner Speicher- und Transportfähigkeit noch nicht befriedigend gelöst. Vor allem die für viele Einsatzgebiete ungenügende Energiedichte verhindert eine baldige, ökonomisch konkurrenzfähige Substitution fossiler Energieträger. Unter den drei gegenwärtig untersuchten Speichermethoden - Flüssiggasspeicherung bei extrem tiefen Temperaturen, Druckgasspeicherung und Metallhydridspeicherung – konzentrierten sich die Projektarbeiten auf die letztgenannte Option. An der Université de Fribourg und an der Université de Genève wurden in den Projekten ***Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden*** [8] sowie ***Destabilisation of Metal Hydride Complexes and Theoretical Modelling*** [9] materialwissenschaftliche Studien an Metallverbindungen mit hoher Wasserstoff-Speicherkapazität durchgeführt. Im erst genannten Projekt galt das Hauptaugenmerk dem günstige Eigenschaften aufweisenden Lithiumborhydrid $LiBH_4$. Mit der Bestimmung des detaillierten Energiediagramms dieser Verbindung gelang es, die einzelnen Schritte der Abgabe und der Aufnahme von Wasserstoff zu charakterisieren. Als wichtigster Befund konnte festgestellt werden, dass bei optimalen Druck- und Temperaturverhältnissen die De- bzw. Adsorption reversibel ist. Das Genfer Projekt hat eher grundlagenwissenschaftlichen Charakter, indem neben den obengenannten Leichtmetallhydriden vor allem intermetallische Phasen bzw. Hydride mit vielversprechenden Absorptionskapazitäten - für $LaMg_2NiH_7$ bis zu 2.8 Gew.-% Wasserstoff - und vergleichsweise tiefen Desorptionstemperaturen - für $LaNi_3BH_3$ 100°C bei 1 bar Wasserstoff - synthetisiert und bezüglich Kristallstruktur und Speichereigenschaften charakterisiert wurden. Es resultierte eine erstaunlich reichhaltige Anzahl von Metallegierungen bzw. deren Hydride, die als potentielle Wasserstoffspeichermaterialien zur Diskussion stehen (Fig. 4a). Auf technischer Ebene konnte einerseits die Betriebssicherheit von Wasserstoff-Metallhydridspeichern (Fig. 4b) erbracht, andererseits die Funktionstüchtigkeit des nunmehr seit 14 Jahren mit Wasserstoff getriebenen Rasenmähers (Fig. 4c) bewiesen werden.



Figur 4 a: Die Kristallstruktur des neuartigen komplexen Metallhydrids $Li_4BN_3H_{10}$

Figur 4 b: Wasserstoff getriebener Rasenmäher

Figur 4c: der seit 14 Jahren funktionierende, der in der Praxis genutzte Metallhydrid-Wasserstoffspeicher

Nutzung von Wasserstoff und Kohlendioxid zur Herstellung von Grundchemikalien

Für eine zukünftige regenerative Energiewirtschaft und eine nachhaltig produzierende Industrie wird es unerlässlich sein, durch chemische Prozesse auf der Basis von Wasserstoff und Kohlendioxid als unbegrenzt verfügbarer "Rohstoff" und gleichzeitig als unkonventionelles, jedoch neuartige synthesewege erlaubendes Lösungsmittel Energieträger sowie Chemikalien mit hoher Wertschöpfung zu generieren. Dieser Forderung entsprechende innovative Ansätze werden in dem an der ETH-Zürich verfolgten Projekt ***Katalytische Synthesen ausgehend Kohlendioxid*** [10] entwickelt. Die katalytische Umsetzung von anthropogen erzeugtem Kohlendioxid als Rohstoff wurde mit Aminen zu Formamiden sowie mit Epoxiden zu zyklischen organischen Carbonaten erfolgreich demonstriert. Auch die Untersuchung von katalysierten Reaktionen in überkritischem Kohlendioxid - hier wird Kohlendioxid als Reagens und/oder als umweltverträgliches Lösungsmittel eingesetzt - führte bei der genannten Formamidsynthese, aber auch bei der Oxidation von festen Alkoholen zu erstaunlichen und vielversprechenden Erkenntnissen: z.B. wurde der technisch relevante Zimtalkohol als Substrat verwendet und eine Reihe von Katalysatoren sowie Co-Solventien untersucht. Die auf zunehmende internationale Resonanz stossenden Forschungsarbeiten belegen, dass das viel geschmähte Kohlendioxid durchaus als Roh- oder Werkstoff eingesetzt werden kann. Gerade die Kombination zwischen Kohlendioxid und Wasserstoff-Chemie erlaubt, neuartige, selektiv katalysierte Synthesen einzuführen, die auf dem Weg zu einer energie- und prozesstechnisch optimierten Kohlendioxidwirtschaft einen vielversprechenden Meilenstein darstellen.

KOMPLEMENTÄRE ENERGIEWANDLER

Selektive Absorbersysteme

Im Projekt ***Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung*** [11] werden grundlagenwissenschaftlich geprägte Material- und Prozessanalysen durchgeführt, die jedoch - was den konzeptuellen Ansatz sehr spannend macht - direkt zur Optimierung technischer Einrichtungen genutzt werden. Es konnte in den vergangenen Jahren gezeigt werden, dass auf Glas oder anderen (Fassaden-)Substraten aufgebrachte, die Solarstrahlung selektiv absorbierende und/oder reflektierende nanostrukturierte Metalloxidfilme sehr wirkungsvolle Funktionen für verschiedene Anwendungszwecke haben können: so gelang es durch die gezielte Variation der durch die Zusammensetzung der Metalloxidschicht steuerbaren Transmission Energieverluste bei Glasfenstern zu minimieren. Mit derselben Technologie - dem Magnetron-Sputtern - konnten Antireflexschichten auf optischen Gläsern oder dielektrische Vielschichtsysteme auf unterschiedlichen Substraten aufgebracht werden. Als Materialien für diese Dünnschichtsysteme wurden einfache und deshalb ökonomisch äusserst attraktive Metalloxide wie Aluminium-, Silizium- und Titanoxide eingesetzt. Zusätzlich wurde das genannte Magnetron-Sputtern für eine technisch realisierbare Produktion der Funktionseinheiten optimiert und insgesamt zu einer zukunftsweisenden physikalisch-chemischen Verfahrenstechnik zur Herstellung thermischer Absorbersysteme entwickelt.

Thermoelektrische Energiesysteme

Die seit wenigen Jahren (wieder-)erforschte Umwandlung von thermischer Energie - konzentrierte Solarstrahlung ist dabei nur eine mögliche Energiequelle - in elektrische Energie unterliegt einer erstaunlichen Dynamik, indem vor allem im ostasiatischen Raum sehr viele Forschungsprojekte zur Bereitstellung effizienter Thermoelektrika initiiert wurden. Diese Entwicklung ist eigentlich gar nicht so erstaunlich, da einerseits das Prinzip seit langem bekannt ist und in technischen Produkten wie dem Peltier-Kühlschrank eingesetzt wird, andererseits sehr viele Quellen vorhanden sind, die Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgeben, also ständig Energieverluste erleiden. Um in thermoelektrisch arbeitenden Energietransfor-

matoren hohe Wirkungsgrade zu erzeugen, sind grosse Temperaturdifferenzen zwischen heissem und der kaltem Teil des Systems erforderlich, was von den thermoelektrischen Funktionsmaterialien eine hohe thermische und chemische Stabilität erfordert. Deshalb werden im Projekt ***Materials Development for Solar Thermoelectric Generators*** [12] Metalloxide bzw. Metallkeramiken identifiziert und charakterisiert, die bis zu hohen Temperaturen auch unter Atmosphärenbedingungen technisch eingesetzt werden können. Dass diese Materialien einen hohen Seebeck-Koeffizienten, hohe elektrische und geringe thermische Leitfähigkeit aufweisen, ist Grundbedingung für ihre Einsatzfähigkeit. Im Berichtsjahr konnten komplexe Cobaltoxide synthetisiert und betreffend der genannten Eigenschaften spezifiziert werden. Die Weiterführung dieses vielversprechenden, aber hohe Anforderungen stellenden Projekts erfolgt im Programm *Elektrizität*.

Nationale Zusammenarbeit

Die bisherigen Kooperationen zwischen Hochschulen auf nationaler Ebene, insbesondere im Bereich der photokatalytischen Wasserspaltung, haben sich bewährt. Eine verstärkte Integration von Industrieunternehmen in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konnte nur in Einzelfällen erzielt werden. Im Bereich der Solarchemie liegt das grossenteils in der Natur der Sache, für den Bereich Wasserstofftechnologie müssen Industriebeteiligungen in Zukunft jedoch offensiver angegangen werden. Hydropole, die schweizerische Wasserstoffvereinigung, wird dabei eine wichtige unterstützende Funktion ausüben. Darüber hinaus konnten Projektpartner aus unterschiedlichen Forschungsprogrammen zu direkten Zusammenarbeiten gewonnen werden, so dass in naher Zukunft möglicherweise klar spezifizierte, die bisherigen Programme übergreifende Themenkreise definiert werden, in denen das synergetische Zusammenwirken von einzelnen Funktionseinheiten angestrebt wird. Als Beispiel kann die Hochtemperaturbrennstoffzelle mit (thermoelektrischer) Wärmerückgewinnung genannt werden. Insgesamt könne die Forschungsaktivitäten sicher noch effizienter verknüpft und für den Technologiestandort Schweiz zu wettbewerbsfähigen Exportsystemen entwickelt werden, wenn es gelingt, die vorhandenen Kompetenzen zu bündeln und über die notwendigen Zeiträume auf den Ebenen einer profunden Ausbildung, einer zielgerichteten Forschung und Entwicklung, sowie einer effizienten Umsetzung und Implementierung in die Praxis kontinuierlich zu fördern.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit wird auf verschiedenen Ebenen intensiv gepflegt. Durch die Leitungsfunktion von Schweizer Vertretern in den beiden IEA-Programmen ***SolarPACES*** (Solar Power and Chemical Energy Systems) [13] und ***Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems*** [14] sind die nationalen Aktivitäten sehr eng mit den internationalen verknüpft. Kennzeichnend ist auch, dass vor allem die Forschungsarbeiten im Bereich der solarthermischen und der photoelektrokatalytischen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser oder aus Biomasse Ausgangspunkt für befruchtende Kooperationen mit den folgenden Instituten und Institutionen waren:

- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organistation (CSIRO), Australien Deutsche
- Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln
- Solarforschungszentrum Odeillo, Frankreich
- Solar Energy Research Center, The Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel
- National Institute of Industrial Science and Technology (AIST), Japan
- Korea Institute of Energy Research (KIER), Südkorea
- Plataforma Solar de Almerìa, Tabernas, Spanien
- The Florida Solar Energy Center (FSEC), USA
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA

Aber auch die vielgestaltigen materialwissenschaftlichen Arbeiten konnten auf zahlreichen internationalen Kongressen vorgestellt werden und derart neue Kooperationen initiieren. Besondere Erwähnung verdient der an der EMPA Dübendorf *ausgerichtete International Conference on Perovskites - Properties and Applications*, an dem diese für verschiedene Energietechnologien unabdingbare Klasse von Funktionskeramiken präsentiert wurde.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Das Berichtsjahr war nicht nur durch das erfolgreiche Voranschreiten der Projektarbeiten geprägt. Auch auf organisatorischer und logistischer Ebene wurden wichtige und notwendige Weichenstellungen vollzogen. Die gesteckten Forschungsziele wurden grösstenteils erreicht; die zielgerichtete Bündelung der Aktivitäten konnte im Rahmen der Möglichkeiten vorgenommen werden. Besonders erwähnenswert sind neben den anvisierten und erfolgreich realisierten Forschungszielen vor allem auch Spin-Offs, also innovative, insbesondere auch die materialwissenschaftlichen Ergebnisse aufgreifende Unterfangen. Als Beispiel eines derartigen "Nebenprodukts" sei das an der Université de Genève entwickelte Sensorsystem erwähnt [3].

Ab 2006 wird eine neue Programmstruktur realisiert. Vor diesem Hintergrund erscheint die aktuelle Gruppierung der Projekte für eine Integration in neu definierte Themenschwerpunkte gut geeignet zu sein. Entscheidend für eine erfolgreiche Weiterführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wird die sinnvolle Vernetzung von jeweils ein Kompetenzfeld vertretenden einzelnen Gruppen zu Kooperationseinheiten, die gemeinsam inhaltlich gut definierte Energiesysteme oder Energieprozesse untersuchen bzw. lösen. Damit könnten die in den vergangenen 15 Jahren akkumulierten Kenntnisse gewinnbringend in nützliche, zukunftsweisende Lösungen für anstehende nationale, als "Exportprodukte" auch für internationale Energieprobleme umgesetzt werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)

[1] G. Calzaferri (gion.calzaferri@iac.unibe.ch) UNI *Bern:* ***Photochemische, photoelektrochemische und photovoltaische Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie*** (JB).

[2] M. K. Nazeeruddin und M. Grätzel (Michael_Graetzel@icp.dc.epfl.ch) EPF-*Lausanne:* ***Generation of Hydrogen by Water Splitting with Visible Light*** (JB).

[3] J. Augustynski (Jan.Augustynski@chiam.unige.ch) M. Ulmannn, UNI *Genève:* ***La photolyse de l'eau et la production d'hydrogène et d'oxygène au moyen de l'énergie solaire*** (JB).

[4] M. Sturzenegger (m.sturzenegger@psi.ch) I. Alxneit, H. R. Tschudi, PSI *Villigen:* ***Solarchemische Beiträge zur Reduktion des CO_2-Ausstosses*** (ZB, SB).

[5] A. Meier (anton.meier@psi.ch), PSI *Villigen:* ***Solar Chemical Reactor Engineering for the Solar Thermal Production of Zinc*** (SB).

[6] A. Meier (anton.meier@psi.ch), PSI *Villigen:* ***Solar Thermal Production of Zinc - Final Steps towards Scale-Up*** (SB).

[7] S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch) M. Sturzenegger und S. Stucki, PSI *Villigen:* ***Sauerstoff-Transfer-Materialien für die Biomassevergasung*** (JB).

[8] A. Züttel (andreas.zuettel@unifr.ch) UNI *Fribourg:* ***Wasserstoffspeicherung in Metall- und komplexen Hydriden*** (JB).

[9] K. Yvon (klaus.yvon@cryst.unige.ch) UNI *Genève*: ***Destabilisation of metal hydride complexes and theoretical modelling*** (SB).

[10] A. Baiker (baiker@tech.chem.ethz.ch) ETH-*Zürich:* ***Katalytische Synthesen ausgehend von mineralischen Kohlendioxid-Quellen*** (ZB, JB).

[11] Shui-Ching Ho, G. Reber, D. Kohler, R. Steiner und P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch) UNI *Basel:* ***Materialien für nachhaltige Technologien in der Energieumwandlung und Energieeinsparung*** (ZB, SB).

[12] A. Weidenkaff und R. Robert (anke.weidenkaff@empa.ch) EMPA *Dübendorf*: ***Materials Development for Solar Thermoelectric Generators*** (JB).

[13] A. Steinfeld (aldo.steinfeld@psi.ch) ETH *Zürich*: ***Leitung des IEA-Programms SolarPACES*** (Solar Power and Chemical Energy Systems) (JB).

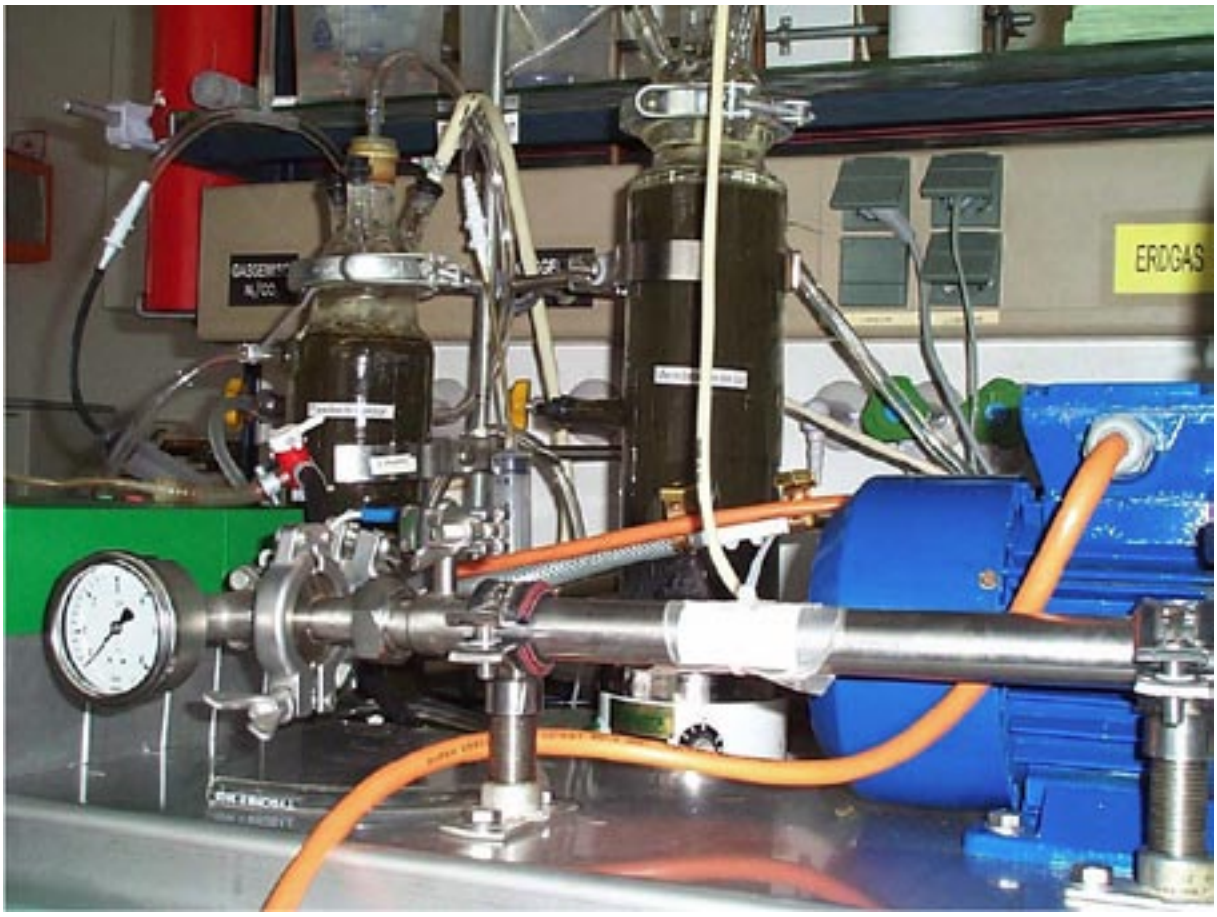
[14] A. Luzzi (girasola@cyberone.com.au) SPF TH *Rapperswil:* **Leitung des IEA-Programms Photoproduction of Hydrogen and Case Studies of Integrated Systems** (JB).

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN
Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2005

PROGRAMM BIOMASSE

Daniel Binggeli **Bruno Guggisberg**

daniel.binggeli@bfe.admin.ch bruno.guggisberg@bfe.admin.ch



Labor-Membranbioreaktor (MBR)

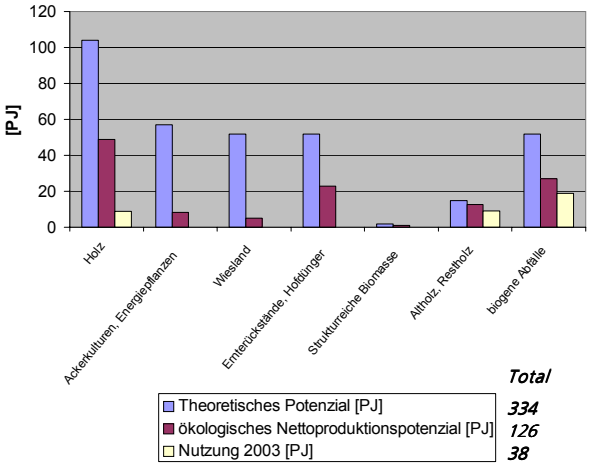
Der Labor-MBR ist im Hintergrund (Bildmitte), die Membrantrennanlage im Vordergrund zu sehen. In einer Versuchsanlage wurden verschiedene Güllefraktionen in Batchversuchen vergoren. Flankierend dazu wurden mit dem Labor-MBR Vergärungsversuche mit Dünngülle durchgeführt. (Quelle [7])

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

EINLEITUNG

Das Forschungsprogramm *Biomasse* konzentriert sich auf die effiziente Umwandlung von Biomasse in Wärme, Strom und Treibstoff. Es soll mithelfen, den Beitrag der Biomasse zur schweizerischen Energieversorgung stetig zu erhöhen.

Die verfügbare Menge an Biomasse und damit das theoretische Potenzial ist in der Schweiz auf Grund der Landesgrösse und der klimatischen Verhältnisse beschränkt. Das unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte energetisch nutzbare Langfristpotential (ökologisches Nettoproduktionspotenzial 2040) beträgt rund **126 PJ**. Das heutige ökologische Potenzial liegt bei ca. **123 PJ**, wird jedoch lediglich zu knapp **einem Drittel (38 PJ)** energetisch genutzt (Figur 1).



Figur 1 *Potenzial Biomasse 2040*

Der Anteil der Biomasse am schweizerischen Endverbrauch erbrachte 2004 rund 4.1% (thermisch und elektrisch). Dies entspricht einem Anteil am Endverbrauch der erneuerbaren Energien von 25 % (Figur 2). Das mittelfristige politische Ziel des Bundes ist jedoch mindestens eine Verdoppelung der energetischen Nutzung von Biomasse.

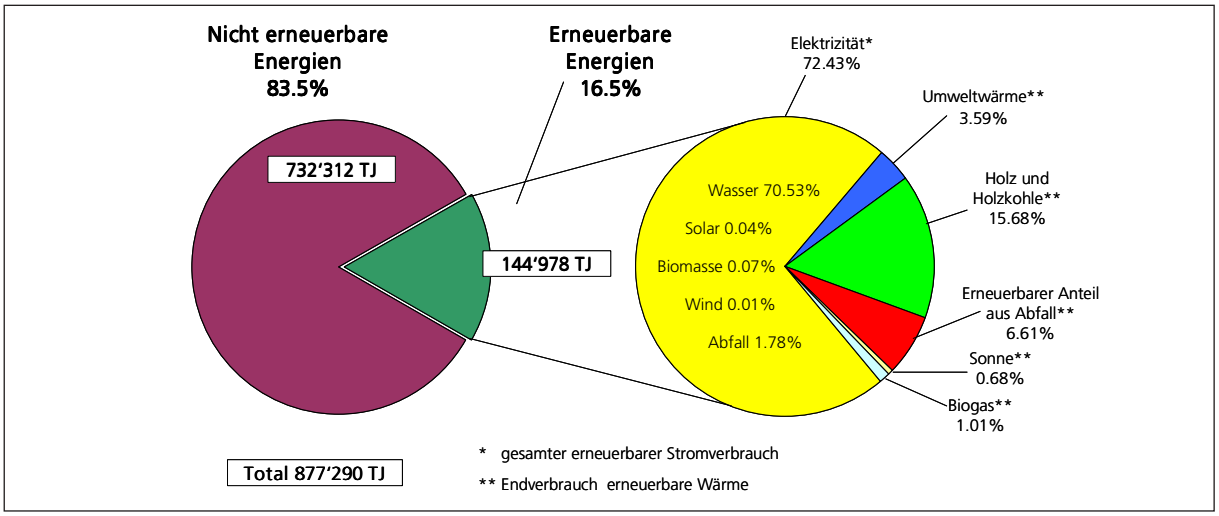
PROGRAMMSCHWERPUNKTE

Das Forschungsprogramm musste in den letzten Jahren nicht zuletzt aus finanziellen Gründen stark fokussiert werden. Die primären Aktionsfelder liegen insbesondere dort, wo

- grosses Biomassepotenzial vorhanden ist;
- grosses Optimierungspotenzial zu erwarten ist;
- hohe Fachkompetenz / Know-how vorhanden ist (auch im Hinblick auf den Exportmarkt).

Als Schwerpunktsbereiche ergeben sich folglich **Holz** (mit den entsprechenden Technologien) und **Landwirtschaft** (anaerobe Vergärung). Bis 2007 werden die folgenden Schwerpunkte verfolgt:

- Verfahren optimieren (→ Wirkungsgrad, Emissionen); im Vordergrund: Reduktion Partikelemissionen bei Holzfeuerungen und Verbrennung anderer Biomasse
- Stoffflüsse analysieren, optimieren; insbesondere landwirtschaftliche Biomasse und biogene Abfälle (→ nasse/wenig verholzte Biomasse in die Vergärung, Nährstoffabtrennung und Qualitätssicherung von Kompost/Gärgut)
- Entwicklung neuer effizienter Umwandlungstechnologien; Bsp.: hydrothermale Vergasung von Biomasse (inkl. verholzter Biomasse), KDV (katalytische drucklose Verölung)
- Grundlagen, Studien, Konzepte; im Vordergrund: Ökobilanz von Bio-Treibstoffen, Wirkung von Verbrennungspartikeln, Stromerzeugungen aus Biomasse



Figur 2: *Schweizerischer Endenergieverbrauch 2004*

ANVISIERTE ZIELE 2005

In Übereinstimmung mit dem Konzept der Energieforschung des Bundes [29] wurden 2005 folgende Ziele verfolgt:

- Qualitätssicherung:
  - bessere Kenntnis über organische Schadstoffe in Kompost/Gärgut und über die Nutzenaspekte in Kompost/Gärgut
  - Auswertung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit Co-Vergärung
  - Diverse Projekte zur Optimierung und Schadstoffminderung bei Holzfeuerungen
- Neue Technologien:
  - Weiterentwicklung hydrothermale Vergasung, Inbetriebnahme einer Laboranlage mit kontinuierlicher Biomassezufuhr
  - erste Versuche mit KDV-Anlage
  - Verbrennungsversuche verschiedener Biomassen
- Ökobilanz von Energieprodukten
  - Abschluss Teilprojekt 1 (Datenerhebung)
  - Start Teilprojekt 2 (ökologische Bewertung) mit konkreten Fragestellungen

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

VERFAHRENSOPTIMIERUNG

Gemäss Abschätzungen des Bundesamts für Umwelt tragen die Verbrennungsprozesse zu rund 44% zur gesamten PM10-Belastung bei. Der Anteil der Holzbrennstoffe wird auf 8% des gesamten Feinstaubs geschätzt, weitere 7% werden der offenen Verbrennung und der Verbrennung von Forstabfällen zugeordnet. Die Holzheizungen tragen damit zu 18% der Verbrennungspartikel bei, die offene Verbrennung zu 16%. Holzheizungen und offene Verbrennung verursachen zusammen annähernd gleich viel Feinstaub wie die Dieselmotoren, welche 39% der Verbrennungspartikel ausmachen. Die Holzheizungen verursachen zudem ein Mehrfaches an Feinstaub wie sämtliche Öl- und Gasheizungen, obwohl sie einen geringeren Anteil zur Wärmeerzeugung leisten. In Bezug auf die Überschreitung der Feinstaubgrenzwerte wird die Bedeutung der Holzheizungen noch dadurch verschärft, dass sie während der bezüglich Feinstaubs kritischen kalten Jahreszeit betrieben werden und ihre Emissionen zudem im Siedlungsraum anfallen. Der Beitrag der Holzfeuerungen zur lokalen Feinstaubbelastung kann deshalb besonders im Winter noch deutlich höher sein als im Jahresdurchschnitt in der Schweiz. Massnahmen zur Verminderung der Feinstaubemissionen aus Holzfeuerungen sind deshalb vordringlich, wobei Unterschiede bezüglich der verschiedenen Brennstoffe und Feuerungstypen zu berücksichtigen sind. Bei Feuerungsanlagen für Holz und anderer Biomasse hat die Reduktion des Staub- und Stickoxidgehaltes deshalb hohe Priorität. Im Folgenden werden die wichtigsten Projekte aufgeführt:

Mit der ***Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen*** [12] wird eine neue Dienstleistung für Betreiber von automatischen Holzfeuerungen angeboten. Sie hat zum Ziel, dass bestehende automatische Holzfeuerungen ökologisch und ökonomisch optimal betrieben werden. Den Schwerpunkt bilden Holzkessel zwischen 300 kW und 1 MW, die seit mindestens fünf Jahren in Betrieb sind. Beurteilt werden die Bereiche Brennstoff, Technik und Betrieb in Bezug auf technische und wirtschaftliche Optimierung. Als Verbesserungsmöglichkeiten werden betriebliche, technische und logistische Massnahmen aufgezeigt und wo möglich umgesetzt. Für Massnahmen mit Investitionsfolgen werden Potenzial und Kosten aufgezeigt und die Realisierung unterstützt. Die Erkenntnisse der Systemoptimierung wurden bei der Erarbeitung eines Handbuchs berücksichtigt, an Symposien und Planungskursen an Fachleute vermittelt und in Zeitschriften und Tagungsbänden publiziert.

Im Projekt ***NOS*** [15] wurde an einer stationären und einer mobilen Anlage versucht, mit neuer Geometrie der Ausbrennkammer, wassergekühlten Zyklon und mit einem Keramik-Kondensations-Wärmetauscher die Staubabscheidung und die Stickoxide zu reduzieren. Die Staubemissionen konnten um ca. 40%, die NOx-Werte jedoch kaum reduziert werden. Das Projekt wird aufgrund des tiefen Umsetzungs-Potenzials nicht weitergeführt.

Aufbauend auf Untersuchungen zum *Low-Particle-Konzept wird eine* ***Low-Particle Unterschubholzfeuerung*** [12] zur Verbrennung von naturbelassenen Holzschnitzeln für den Leistungsbereich von 200 bis 800 kW entwickelt. Bei Wald- und Sägerestholz mit Rindenanteil von unter 5 Gew.-% sollen Partikelemissionen vor Zyklon von unter 50 mg/mN3 (bei 13 Vol.-% O2) erreicht werden. Dazu ist im Berichtsjahr eine Prototypanlage mit einer Leistung von 300 kW realisiert worden. 2006 wird nach einer Optimierungsphase eine umfangreiche Erfolgskontrolle durchgeführt.

Im Rahmen des BFE-Projekts *Qualitätsmanagement Holzheizwerke* wurden Standard-Schaltungen für Holzheizungsanlagen definiert. Diese beschreiben zwar generell die Schnittstellen, das Regelkonzept und die Mess-Datenerfassung zur Betriebsoptimierung, die detaillierte Planung und Realisierung wird jedoch weitgehend den beteiligten Firmen überlassen. Mit Projekt ***Regelkon-***

zepte für bivalente Holzheizungsanlagen [16] sollen verschiedene definierte Standartschaltungen auf ihre Tauglichkeit in einer Feldmessung bestätigt werden. Im Erstprojekt *Azmoos* handelte es sich um eine bivalente Holzheizungsanlage mit Speicher. Im vorliegenden Messprojekt *Kaisten* wird eine Anlage ohne Speicher untersucht. Die ersten Zwischenresultate werden im Sommer 2006 vorliegen.

Die Entwicklung eines günstigen ***Rohrelektrofilters*** [19] für Anlagen im Bereich zwischen 200 und 1000 kW hat die gewünschten Eigenschaften erreicht. Der Aufbau des Filters ist sehr kompakt und kann damit gut für Anlagen für die vorgesehenen Grössen eingesetzt werden. Bei einem hohen Rohstaubgehalt von 530 bis 712 mg/m3 wurden nach dem E-Filter Werte im Bereich von 3 bis 16,5 mg/m3 bei 13 % O_2 erreicht. Die Abreinigung mit Reinigungsbürsten funktioniert.

Gemäss Studie [30] ist das Potenzial anderer verholzter Biomasse als Holz beträchtlich. Die ***Thermische Nutzung*** *dieser* ***anspruchsvollen Biomassebrennstoffe*** [13] ist aber noch wenig erprobt. Auf einer Pilotanlage wurden in einer ersten Serie Verbrennungsversuche mit Brennstoffmischungen Pferdemist/Holz, Pferdemist/Getreideabgang, Pilzkompost/Holz und 100% Getreideabgang durchgeführt. Die Versuche zeigten, dass bei optimaler Beimischung zum Grundbrennstoff Holz ein kontinuierlicher Abbrand gewährleistet werden kann. Die Staubemissionen lagen zum Teil nach dem Elektrofilter wesentlich höher als mit dem Normbrennstoff Holz. Bei weiteren Verbrennungsversuchen soll deshalb auch die Problematik des Elektrofilters vertieft untersucht werden.

Eine weitere gute Möglichkeit zur Reduktion von Partikel- und NOx-Emissionen ist die direkte Verbrennung von Holzgas aus Holzvergaser in einem Gaskessel oder mittels BHKW. An der ***Vergaseranlage Pyroforce*** [18] in Spiez konnte mit weiteren Optimierungen der Betrieb ohne Beobachtung wesentlich auf 6 bis 12 Stunden gesteigert werden und die Verfügbarkeit wurde mit über 90% bei einzelnen Betriebsphasen ausgewiesen. Aktuelle Daten sind laufend unter www.pyroforce.ch abrufbar.

BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht [6]**:** Damit weiterhin die hocheffizienten Zündstrahlmotoren zur Nutzung des Biogases auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt werden können, müssen die Abgase nachbehandelt werden, um die gesetzlichen Grenzwerte einhalten zu können. Die Stickoxidfracht schwankt wegen der ständig ändernden Biogasqualität (Methangehalt) sehr stark. Es wurde ein Abgasreinigungskatalysator entwickelt, der mit diesen Anforderungen und den einzigartigen Rahmenbedingungen auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen umgehen kann. Es gelang, einen standardisierten Katalysator auf SCR-Basis zu entwickeln, der alle Schwankungen im Abgas von BHKW in Biogasanlagen auszugleichen vermag. Die Werte der Luftreinhalteverordnung (LRV) werden mit dem neuen System problemlos eingehalten. Sollten sich in Zukunft die Abgasgrenzwerte weiter verschärfen, so kann der Katalysator entsprechend ausgebaut werden. Es wurden bereits mehrere Katalysatoren erfolgreich auf verschiedenen Biogasanlagen in der Schweiz eingebaut.

Développement d'un concept combiné de production de biogaz et d'élimination de l'ammoniac appliqué aux effluents agricoles [8] **:** Le projet a pour but de développer un concept intégré de production de biogaz et d'élimination biologique de l'ammoniac dans un contexte caractérisé par un développement de nouvelles installations de biogaz agricole. Il comporte deux parties expérimentales, la première en laboratoire et la seconde sur un système de bioréacteurs pilote, qui pourraient être suivies, en cas de succès, d'un développement pratique sur des unités de méthanisation à la ferme. La première partie a débuté au cours du second semestre 2005.

ANALYSE UND OPTIMIERUNG DER STOFFFLÜSSE

MBR-Messkampagne [7]: Ziel des Projekts ist die Abklärung der Eignung des Membranreaktors (MBR) im Einsatz sowohl mit Gülle allein als auch mit Gülle und Co-Substraten. Anhand von Laboruntersuchungen und einer Versuchsanlage wurden Erkenntnisse erarbeitet, die in den Betrieb einer P&D-Anlage einfliessen sollen. Die Versuchsanlage ist prozesstechnisch geprüft und in Betrieb gesetzt worden. Die Biomasse kann im Fermenter vollständig zurückgehalten werden. Dies erlaubt eine Reduktion des Fermentervolumens um derzeit mindestens 75 %. Der Gärprozess im MBR verläuft stabil.

Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz [9]: In der Schweiz werden jährlich rund 600'000 t biogene Abfälle zu hochwertigem Kompost verarbeitet und so in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Die Kompostierung ist damit von grosser ökologischer und volkswirtschaftlicher Bedeutung. Mit den Ausgangsmaterialien können auch unerwünschte Substanzen (organische Schadstoffe und Schwermetalle) in den Kompost gelangen. Im Rahmen dieses Gemeinschaftsprojekts mit dem BAFU soll eine solide Datenbasis als Grundlage für Qualitätssicherung und Risikomanagement erarbeitet werden. Der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung wird massgeblich mit potenziellen, nicht genügend bekannten Auswirkungen des Eintrags von organischen Schadstoffen durch Klärschlammdüngung in die Böden begründet. Eine ähnliche

Entwicklung muss bei Kompost und Gärgut wegen deren grossen ökologischen und volkswirtschaftlichen Bedeutung vermieden werden.

Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit [10]: In der Schweiz werden zurzeit rund 600'000 t TS biogene Abfälle rezykliert. Längerfristig werden jedoch nur die Komposte und das Gärgut abgesetzt werden können, die eine Wertsteigerung der Böden bewirken. Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Qualitätsparameter gezielt in diese Richtung zu erweitern und die Auswirkungen von Kompost- und Gärgutapplikationen auf Pflanzenwachstum und -gesundheit, die Bodenparameter und die Umwelt zu evaluieren. Das vorliegende Projekt ist mit dem Projekt *Organische Schadstoffe in Komposten* der EPFL bzw. EAWAG und der FAL koordiniert.

Teilstatistik Biogas 2004 [11]: In der Biogasstatistik 2004 wurden die Daten der Produktion und Nutzung von Biogas der Bereiche Landwirtschaft, Industrieabwasservorreinigung, Bioabfallvergärung sowie Co-Vergärung in den Faulanlagen von Kläranlagen präsentiert und kommentiert. Die Daten sind in die Statistik der erneuerbaren Energien 2004 eingeflossen.

NEUE UMWANDLUNGSTECHNOLOGIEN

Im Projekt ***Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung*** [4] wird ein hydrothermales Vergasungsverfahren für nasse Biomassesortimente entwickelt, mit dem Ziel, die Biomasse vollständig zu Methan und CO2 zu vergasen und Nährsalze zurück zu gewinnen. Die Laborversuche mit 9-10 Gew% Holz in einem absatzweise betriebenen Hochdruck-Reaktor bei 390-400°C und ca. 300 bar waren erfolgreich. Es konnte gezeigt werden, dass Holz vollständig zu CH4, CO2 und H2 vergast werden kann. Für die kontinuierliche Anlage im Labormassstab haben sich wiederholte apparative Schwierigkeiten zur Förderung gemahlener Holzsuspensionen ergeben. Es wurde deshalb beschlossen, feststofffreies Gülle-Retentat ab Ultrazentrifuge zu verwenden. Dadurch ist sowohl die Verwendung reeller Biomasse gewährleistet – eine der Leitideen dieses Projekts – als auch die Umschiffung weiterer vermeidbarer Probleme durch die kleine Grösse der Anlage. Im Weiteren wurde die Suche nach stabilen Katalysatoren als prioritär eingestuft (Ziel: keine nennenswerte Deaktivierung während 100-120 Stunden). Als sehr aussichtsreich hat sich ein Ruthenium/Kokosnusskohlenstoff Katalysator herausgestellt. Bis jetzt konnten ca. 50 h Dauerversuch akkumuliert werden, ohne dass eine Deaktivierung beobachtet wurde.

Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle [5]: Der Einsatz von unverändertem Pflanzenöltreibstoff im Fahrzeug- und Stationärmotor erfährt als nachwachsende Energiequelle und Produktionsnische für die Landwirtschaft zunehmende Bedeutung. Die wenigen, bisher verfügbaren pflanzenöltauglichen Motorumrüstungen erfüllen indessen die aktuellen Abgasvorschriften nicht. Für Pflanzenöl-BHKW im Leistungsbereich von 50 bis 500 kW besteht zudem eine Angebotslücke. Ein breit abgestütztes Konsortium will deshalb ein mit Rapsöl betriebenes Blockheizkraftwerkes (BHKW) mit eigener Ölversorgung entwickeln, welches die Schweizer Abgasnormen erfüllt. Besonders untersucht werden dabei auch die Möglichkeiten des ökologisch optimierten Anbaus von Ölkulturen. Das Projekt erfährt eine zusätzliche Unterstützung vom Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern.

Im EU-Projekt ***Bio-Pro*** [20] fokussiert sich der Schweizer Partner auf die Entwicklung der Brennertechnologie mit flammloser Oxidation der Firma WS-Wärmeprozesstechnik (D). In einem ersten Schritt galt es, den Verbrennungsprozess des Prototypenbrenners auf den vom Projektkonsortium definierten Referenzbrennstoff Erdgas zu untersuchen. Prozesstechnisch konnte der Brennerstart vereinfacht werden. Dadurch gelang es, die Aufheizphase der Brennkammer auf die erforderliche Prozesstemperatur für die flammenlose Verbrennung zu verkürzen. Die Emissionswerte des Referenzbrennstoffs Erdgas unterschritten für NOx mit 5 bis 30 mg/m^3 den Zielwert von 40 mg/m^{3}deutlich. Die Kohlenmonoxidwerte erreichten bis 5 mg/m^{3}bei einem Zielwert von 10 mg/m^3. Ein zweiter Projektschritt beinhaltete den Betrieb des Brenners mit Gasen von geringem Heizwert bis um 5 MJ/m^3. Es wurde eine Mischeinrichtung aufgebaut, mit der sich aus Erdgas und Abgas, Schwachgas mit verschiedenen Heizwerten erzeugen lässt. In Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass sich der flammlose Betrieb auch mit Brenngasen mit geringem Heizwert einstellt. Die NOx-Emissionen lagen unter denen des Referenzbrennstoffs Erdgas.

Das in Vorversuchen chargenweise betriebene Verfahren der ***katalytischen Direkt-Verflüssigung (KDV)*** [17] von Biomasse soll zu einer kontinuierlichen Versuchsanlage im Technikums-Massstab mit einem Durchsatz von 20 bis 100 kg pro Stunde erweitert und in mehreren Versuchsreihen ausgemessen werden. Anhand von Messungen sollen die wichtigsten Kenngrössen der Anlage bestimmt sowie die Produktströme zur Analyse erfasst werden. Damit werden eine Stoff- und Energiebilanz im stationären Zustand erstellt und der Umwandlungswirkungsgrad zu Treibstoff bestimmt. Im Weiteren werden die Zusammensetzung der Produkte sowie die Eignung des Hauptprodukts als Dieseltreibstoff nach EN 590 bestimmt. Im Berichtsjahr wurde die Laboranlage planmässig erweitert und eine Rektifikationskolonne zur Produktfraktionierung nachgeschaltet.

Ab 2006 erfolgen die Inbetriebsetzung der Anlage sowie die Vorbereitung für die Durchführung der ersten Messreihen.

GRUNDLAGEN, STUDIEN, KONZEPTE

Ökobilanz von Energieprodukten [1]: In diesem Projekt wird die Erarbeitung von Sachbilanzdaten für Energieprodukte aus Biomasse durchgeführt. Diese Daten sollen zur Ergänzung der ecoinvent Datenbank dienen. Im Jahr 2005 wurden Sachbilanzdaten zu den Themen *Biogas*, *BTL/synthetische Treibstoffe*, *Transport* und *Sonstige* erarbeitet. Alle Daten und Berichte wurden durch den Projektleiter mehrmals reviewt. Die Daten wurden eingelagert und die kumulierten Ergebnisse berechnet.

RENEW - Life Cycle Assessment for BTL-fuel production [2]: Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes RENEW (Renewable Fuels for Advanced Powertrains) werden Verfahren für die Herstellung von Treibstoffen aus Biomasse mittels Vergasung und anschliessender Fischer-Tropsch Synthese entwickelt. Die verschiedenen Umwandlungsverfahren werden mit einer Ökobilanz nach ISO 14040 ff verglichen. Dabei wird der Lebenszyklus von der Biomasse Produktion bis zur Bereitstellung des Kraftstoffs untersucht. Im Jahr 2005 wurde die Zieldefinition für die Ökobilanz von Biomass-to-liquid (BTL) fuels fertig gestellt. Ausserdem wurde mit der Datenerhebung für die Biomasseproduktion und die Syntheseverfahren begonnen.

RENEW - Erzeugung von synthetischem Erdgas aus Holz, Stroh und Black liquor zur Nutzung als Biotreibstoff [3]: Ziel des EU-Projekts ist die Weiterentwicklung und die Bewertung unterschiedlichster Herstellverfahren für Biotreibstoffe der zweiten Generation. Im Vordergrund stehen flüssige Treibstoffe wie synthetischer Diesel und Benzin, Dimethylether (DME), Methanol und Ethanol, die aus Holz, Stroh oder Black liquor (Schwarzlauge) hergestellt werden. Als gasförmiger Treibstoff wird zu Vergleichszwecken synthetisches Erdgas betrachtet. Alle diese Treibstoffe werden über einen katalytischen Prozess aus Synthese- bzw. Produktgas hergestellt. Je nach erwünschtem Treibstoff muss ein anderer Katalysator verwendet und das Synthesegas entsprechend gereinigt und konditioniert werden. Das Ziel des Arbeitspakets 5.5 ist die Erarbeitung von technischen Konzepten für die Umwandlung von Biomasse in synthetisches Erdgas. Darauf aufbauend sollen techno-ökonomische Daten für viel versprechende Herstellverfahren bereitgestellt werden. Das PSI ist für dieses Arbeitspaket verantwortlich.

Partikel aus vollständiger Holzverbrennung sind grösstenteils Salze, während Partikel von Dieselmotoren hauptsächlich aus Russ bestehen. Das interdisziplinäre Forschungsprojekt ***Wirkung von Verbrennungspartikeln*** [12] soll einen Beitrag liefern zum Vergleich der Gesundheitsrelevanz von Abgaspartikeln aus vollständiger Holzverbrennung, aus unvollständiger Holzverbrennung sowie aus Dieselmotoren. Dazu werden die Zytotoxizität und die Mutagenität der Partikel mit in-vitro Tests beurteilt. Bis anhin wurden Partikelproben an einer automatischen Holzfeuerung und an einem modernen PW-Dieselmotor ohne Partikelfilter gesammelt und untersucht. Die Resultate der Zytotoxizitätstests an V79-Zellen zeigen, dass der Dieselruss eine stärkere Zellschädigung hervorruft als die gleiche Menge Feinstaub aus der automatischen Holzfeuerung. 2006 werden die standardisierten Zelltests zur Zytotoxizität auf die Proben aus Kleinfeuerungen ausgeweitet. Ausgehend von diesen Proben soll das potenzielle Krebsrisiko mit Hilfe des Mikrokerntests untersucht werden.

Die Studie ***Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoff-Biomasse*** [20] evaluiert den technischen Forschungsstand und die Wirtschaftlichkeit von Wärme-Kraft-Koppelungsanlagen im Leistungsbereich <1 MWth. Für den Vergleich werden auch Betriebserfahrungen und ökonomische Daten von Anlagen >1 MWth erhoben. Auch für dezentrale Feststoff-Biomasse-WKK-Systeme mit BHWK-Anlagen, die mit zentral hergestellten Fischer-Tropsch-Biofuels betrieben werden sollen, wurden Kenndaten einer Biomass-to-Liquid (BTL) Anlage erhoben. Das technische Potential für Biomasse WKK-Anlagen in der Schweiz wurde anhand der Statistik über die Verteilung des Heizwärmebedarfs nach Wärmehöchstleistungsklassen berechnet. Für zwei Szenarien wurde angenommen, dass 10% bzw. 25% der WKK-Anlagen realisiert werden könnten. Diese Anlagen würden dann 3.2 - 8.1 PJ Biomasseenergie benötigen. Dies entspricht 13 - 33% der gesamten potentiell ökologisch nutzbaren Biomasse in der Schweiz.

Die Konzeptstudie ***Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz*** [12] stellt die kombinierte Nutzung von Holz und Erdgas in einem Kombikraftwerk vor. Im Weiteren werden das Potenzial in Form von Waldholz, Restholz und Altholz für die Schweiz aufgezeigt und die Stromgestehungskosten abgeschätzt. Die Anlagentechnik basiert auf einer grosstechnischen Wirbelschichtvergasung für Holz und einem für Erdgas und Holzgas ausgelegten Kombikraftwerk, in dem 20% der Gesamtleistung durch Holz erbracht werden. Das gereinigte Holzgas soll dazu in einer Gasturbine genutzt und die Abwärme zum Antrieb einer Dampfturbine eingesetzt werden. Während mit Erdgas nach diesem Prinzip Wirkungsgrade von rund 60% erzielt werden können, wird der Wirkungsgrad für Holz durch die Umwandlung zu Holzgas vermindert. Bei einem Vergasungswirkungsgrad von 75% ist ein Wirkungsgrad von Holz zu Strom

von gegen 45% möglich. Allerdings sind sowohl der erzielbare Wirkungsgrad als auch die spezifischen Investitionskosten stark von der Anlagengrösse abhängig. In der Studie wird der Einfluss der Anlagengrösse auf den Wirkungsgrad und die Stromgestehungskosten aufgezeigt und dabei auch der mit zunehmender Anlagengrösse steigende Transportaufwand berücksichtigt. Im Weiteren wird ein Vergleich zwischen einem reinen Holzgas-Kombikraftwerk und einem kombinierten Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk diskutiert.

Nationale Zusammenarbeit

Die meisten Projekte wurden direkt mit der Industrie und zusammen mit diversen Fachhochschulen, den ETH oder privaten Organisationen durchgeführt. Dieses Vorgehen erlaubt einen effizienten Technologietransfer von der Forschung in die Wirtschaft. Ausserdem wird laufend mit anderen Bundesämtern wie z.B. BAFU, BLW und ARE zusammengearbeitet. Die Finanzierung von Projekten wird – nicht zuletzt wegen erhöhtem Budgetdruck - möglichst breit abgestützt. Solange die gesetzlichen Rahmenbedingungen beim Bau von Verbrennungs- und Vergärungsanlagen ohne grosse Schwierigkeiten eingehalten werden können, sind neue Forschungsarbeiten mit dem Ziel, tiefere Emissionen und Kosten sowie höhere Wirkungsgrade zu erreichen, mit privaten Unternehmen schwierig zu realisieren. Für neue kostspielige und risikoreiche Entwicklungsprojekte fehlen der Industrie oft die Mittel, d.h. es müssen neue Finanzierungsmöglichkeiten, beispielsweise in Form eines Fonds, angestrebt werden. Hinzu kommt, dass die Branche - insbesondere im Bereich übrige Biomasse (ohne Holz) - finanziell noch nicht sehr potent ist.

Weitere Ausbildungs-, Informations- und Imageprojekte zur Verwendung der Ressource Biomasse finden über die Biomasse-Partner des Aktionsprogramms EnergieSchweiz statt (www.holzenergie.ch, www.biomasseenergie.ch).

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligte sich auch im Berichtsjahr im Rahmen des Implementing Agreements Bioenergy der International Energy Agency (**IEA**) an 3 Tasks:

- Task 32: ***Biomass Combustion and Co-firing*** [12]
- Task 33: ***Thermal Gasification of Biomass*** [13]
- Task 37: ***Energy from Biogas and Landfill Gas*** [14]

Ziele sind die Förderung des Erfahrungs- und Informationsaustauschs, die Verbreitung der Informationen zur Produktion und Verwendung der verschiedenen Biomassesortimente und Umwandlungstechnologien, die Anregung neuer Projekte in den Bereichen Forschung, Entwicklung, Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie die Markteinführung.

Die **EU** nimmt ebenfalls eine wichtige Rolle ein. Im Bereich *Biomasse* beteiligt sich die Schweiz an verschiedenen Projekten, sie können über folgende Links eingesehen werden:

- ***Biotreibstoffe*** [2] und [3]: www.renew-fuel.com
- ***Gasification Network*** [13]: http://www.thermalnet.co.uk/
- ***QM-Holzheizwerke*** [12]: www.qmholzheizwerke.ch
- ***Biopro*** [20]: www.eu-projects.de

Pilot- und Demonstrationsprojekte

VERFAHRENSOPTIMIERUNG

Kompaktbiogasanlage Gansner [21]**:** Die Biogasanlage Gansner ging im Juni 2004 in Betrieb. Während des ersten Betriebsjahres wurden die Eckdaten, welche zum Betrieb einer Biogasanlage gehören, erfasst. Zusätzlich wurde vor allem die nachgeschaltete Kompostiereinheit beobachtet. Damit kann mit der Abwärme des Motors der separierte Feststoffanteil nach dem Fermenter automatisch nachkompostiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden konstruktive, betriebliche und analytische Verbesserungsmöglichkeiten für die Nachrotte des Gärguts aufgezeigt. In Versuchsreihen wurde beispielsweise die Animpfstrategie mittels Kompostzugabe zur Nachrotte des Gärgut-Feststoffs optimiert. Optimale Milieubedingungen für den Rotteprozess ermöglichen eine vollständige Hygienisierung. Die effiziente Überführung des anaeroben Materials in die aerobe Heissrotte vermindert Stickstoffverluste in Form von Ammoniak und ermöglicht die optimale Ausnutzung der Rottetrommeln. Um die VKS-Richtlinien 2001 für eine Anwendung im Garten- und Landschaftsbau und ein stabiles Produkt mit bodenverbessernden Eigenschaften zu erreichen, ist jedoch bei dem aktuellen hohen Durchsatz trotz der zwei hinter-

einander geschalteten Trommeln eine zusätzliche Kompostierung nötig.

Kompaktbiogasanlage Winzeler [22]: Die landwirtschaftliche Biogasanlage Winzeler ging am 19. November 2004 in Betrieb. Nebst den Eckdaten, welche zum Betrieb einer Biogasanlage gehören, wurde vor allem das Wärmemanagement beobachtet. Das Biogas-BHKW liefert mit zwei Holzschnitzelfeuerungen Wärme für ein lokales Fernwärmenetz. Die Biogasanlage liefert mit rund 125 kW thermischer Leistung die Grundauslastung während des ganzen Jahres. Im Sommer 2005 wurde eine 500 kW Holzschnitzelheizung in Betrieb genommen. Zusammen mit der bestehenden 100 kW Schnitzelheizung können insgesamt 725 kW in ein Heizwärmenetz eingespeist werden. Es wurde speziell die Kombination Biogas-BHKW und Holzfeuerung untersucht, da dieses Modell für landwirtschaftliche Betriebe besonders geeignet scheint. Die aufgetretenen Probleme sind allgemeiner Natur und nicht spezifisch für eine Biogasanlage.

Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik [24]: Im Januar 2005 konnte mit den Bauarbeiten begonnen werden. Im August konnte die Inbetriebnahme der Anlage erfolgen. Bereits im November 2005 produzierte die Anlage durchschnittlich 700 m^3 Biogas pro Tag. In verschiedenen Bereichen werden Betriebsoptimierungen durchgeführt. Beim Gülle-management mit der Zuführung von Co-Substraten liegt noch Potential für Vereinfachungen. Um solchen Anlagen bessere Rahmenbedingungen im Bereich Baubewilligung und Vergütung von Ökostrom zu bieten, hat sich das Komitee *gasgeben.ch* gebildet.

ANALYSE UND OPTIMIERUNG STOFFFLUSS

MBR-Pilot [23]: Die P&D-Anlage zur Vergärung von Schweinegülle und Abfällen mit zusätzlicher Nährstoffaufbereitung ist im Bau und wird mit einer Verarbeitungskapazität von rund 35'000 Jahrestonnen realisiert. Die Inbetriebnahme ist für Mitte 2006 vorgesehen.

NEUE UMWANDLUNGSTECHNOLOGIEN

SwissFarmerPower (Projekt prix pegasus) [25]: Der Bau einer in der Schweiz erstmaligen, überregionalen Biogasanlage mit Einspeisung des aufbereiteten Biogases ins lokale Erdgasnetz und nachgeschalteter, technischer Gülleaufbereitung, ist auf Kurs. Mit dem Baubeginn wird im Juli 2006 gerechnet. Mit jährlich über 45'000 Tonnen Verarbeitungskapazität, über 60 beteiligten Landwirten und Firmen sowie dem innovativen Betriebskonzept, bei welchem nebst der Einspeisung von aufbereitetem Biogas ins Erdgasnetz auch ein nachhaltiger Beitrag zur Nährstoffentlastung in einer tierreichen Region geleistet wird und dem CO2-Reduktionspotential im Treibstoffbereich von jährlich 2'700 Tonnen, dürfte das Projekt Gesamtschweizerische Ausstrahlung erhalten.

Biogasbetriebene Gelenkautobusse in Bern [26]: Das Gesamtprojekt Biogaserzeugung und -einspeisung ins Erdgasnetz (ARA Bern), Lieferung an BERNMOBIL sowie Nutzung als umwelt- und klimafreundlichen Treibstoff im öffentlichen Verkehr besitzt Innovationskraft. Das vorliegende Projekt begleitet die Einführung der Gasbusse und zeigt im Sinne einer Erfolgskontrolle auf, wie weit der Zielbeitrag zu einer ökologischen Mobilität erreicht werden kann. Namentlich sind die CO_2-Bilanz, energetische Wirkungen und der lufthygienische Nutzen aufzuzeigen. Gleichzeitig sind die Kosten, die technischen und betrieblichen Erfahrungen sowie die daraus ableitbaren Lektionen aufzuzeigen. Die Erfahrungen sollen anderen interessierten Städten zur Verfügung stehen und Anregung und Hilfestellung sein.

Biogaz agricole Installation de production de biogaz a partir de fumier et autres cosubstrats [27]: Das Projekt hat in der Bevölkerung Widerstände hervor gerufen, womit Verzögerungen entstanden. Die stetige Information sowie die gegenwärtige Entwicklung im Energiebereich (steigende Preise, Fragen zur Versorgungssicherheit etc.) haben die Problematik nun etwas entschärft.

Erhöhung des Gasertrags durch Co-Vergärung von protein- und fettreichen Stoffen [28]: Vor dem Hintergrund, eine Möglichkeit der besseren energetischen Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur einer ARA aufzuzeigen und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit einer Mikrogasturbine darzustellen, fand von Frühjahr bis Herbst 2004 in Frick AG ein Versuch zur Co-Vergärung von kommunalem Klärschlamm mit Frittieröl aus der Gastronomie statt. Dabei wurde dem Klärschlamm ein Substrat aus nicht gereinigtem, verbrauchtem Frittieröl beigemischt. Zur Umwandlung des in der Faulung entstehenden Biogases in elektrische Energie wurde eine Mikrogasturbine mit einer elektrischen Leistung von 30 kW verwendet. Es konnte festgestellt werden, dass das eingesetzte Co-Substrat gut abbaubar ist und eine Steigerung der Biogasproduktion erreicht wurde. Die Prozessstabilität und die Reinigungsleistung der ARA wurden nicht beeinträchtigt, da weder während des Projektes, noch im Nachhinein Veränderungen in den Abläufen der ARA gefunden werden konnten oder sonstige biotechnische Probleme aufgetreten sind. Grundsätzlich ist zu sagen, dass durch das Hinzufügen eines Co-Substrates eine wesentliche Erhöhung der Biogasproduktion möglich ist und man durch sehr geringe Änderungen an der Infrastruktur einer bestehenden Abwasserreinigungsanlage die Biogasproduktion erheblich steigern kann. Die Erfahrungen mit der Mikrogasturbine zeigen, dass die vom Hersteller

gepriesenen Vorteile der hohen Verfügbarkeit und des geringen Wartungsaufwand sich in der Praxis bestätigen lassen. Der elektrische Wirkungsgrad der 30 kW-Mikrogasturbine wird vom Hersteller mit 26 +/ 2 % angegeben. Eine Messung bei Inbetriebnahme ergab einen Wert von 25,4 %. Positiv zu vermerken ist, dass dieser Wirkungsgrad seit zwei Jahren praktisch gleich ist; das Degrading ist somit vernachlässigbar.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

- Qualitätssicherung:
  - Kompost-/Gärgut-Projekte: erste Erkenntnisse liegen vor
  - landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Co-Vergärung: zwei weitere Projekte konnten erfolgreich abgeschlossen werden; die entsprechenden Schlussberichte und Auswertungen liegen vor
  - Mit sechs Projekten konnte das Wissen für Optimierungen und Schadstoffminderungen ausgebaut und umgesetzt werden. Drei davon sind bereits erfolgreich abgeschlossen. Diese Aktivitäten werden auch in Zukunft weiter geführt.
- Neue Technologien:
  - hydrothermale Vergasung: die Inbetriebnahme einer Laboranlage mit kontinuierlicher Biomassezufuhr konnte nicht wie geplant durchgeführt werden
  - Bei der KDV-Anlage ist eine unwesentliche Verzögerung von rund drei Monaten aufgetreten. Konkrete Resultate sind noch keine verfügbar.
  - Eine erste Serie von Verbrennungsversuchen anderer Biomasse als Holz konnte erfolgreich durchgeführt und dokumentiert werden.
- Ökobilanz von Energieprodukten
  - Teilprojekt 1 (Die Datenerhebung konnte abgeschlossen werden; während der Erarbeitung der Fragestellungen für die ökologische Bewertung hat sich allerdings zusätzlicher Bedarf an Datensätzen ergeben
  - Teilprojekt 2 (ökologische Bewertung) konnte wie geplant gestartet werden

Allgemeine Betrachtungen:

Verbrennung: Die Verbrennung ist nach wie vor die wichtigste Technik zur energetischen Nutzung von Holz und gleichzeitig die einzige mit bewährten Anlagen und bedeutender Verbreitung. Die Feinstaub- und Stickoxidemissionen sowie die Kosten und Komfortansprüche der Betreiber sind die Haupthemmnisse zur weiteren Verbreitung der Nutzung von Energieholz. Im Berichtsjahr sind die konventionellen Energiepreise weiter angestiegen und blieben auf hohem Niveau. Folglich ist auch die Holzenergie im Betrieb wirtschaftlicher geworden. Trotz den hohen Investitionen für Holzfeuerungen konnten vor allem Pelletfeuerungen gut verkauft werden. Die aktuellen Diskussionen über Feinstaubimmissionen zeigen nun die Wichtigkeit der Qualitätssicherung von Brennstoff, Planung, Betrieb und Unterhalt von Holzheizungen.

Vergasung: Um Vergasersysteme für Treibstoff, Strom und/oder Wärme zügig weiter zu entwickeln, müssten die nächsten Pilotanlagen realisiert werden können. Dies bedingt jedoch gute Standorte, Einsatz und Wille aller Beteiligten.

Vergärung: Das Interesse am Bau von landwirtschaftlichen Biogasanlagen hat im Berichtsjahr erneut stark zugenommen. Obwohl die Streichung der P+D-Mittel hemmend wirkt, konnten einige Anlagen den Betrieb aufnehmen und daraus wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Weitere Anlagen sind in Planung. Sehr positiv zu werten ist das Engagement von Coop Naturaplan. Im Rahmen des Projekts Naturaplan_Biogas50 sollen in den nächsten 5 Jahren rund 50 landwirtschaftliche Biogasanlagen unterstützt werden.

Die geplante Teilrevision der Raumplanungsgesetzgebung sieht unter anderem eine zonenkonforme Bewilligung von Anlagen zur Erzeugung von Energie aus Biomasse in der Landwirtschaft vor. Diese Anpassungen sind wichtig, da die Erfahrung zeigt, dass landwirtschaftliche Biogasanlagen zurzeit nur wirtschaftlich betrieben werden können, wenn sie vollständig in den Landwirtschaftsbetrieb integriert sind und Co-Vergärung betreiben können. Insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe ist die Verstromung von Biogas die einfachste und zurzeit ökonomisch interessanteste Variante.

Im Zusammenhang mit der neuen ***Biomasse-Potenzialstudie*** [30] stellt sich die Frage, welche Strategie zur Nutzung der verschiedenen Biomassesortimente verfolgt werden soll. Welche Sortimente sollen beispielsweise für welche Energieprodukte (Strom, Wärme, Treibstoff oder entsprechende Kombinationen) verwendet werden? Welche Technologien sind dazu geeignet? Wie ist ein maximaler Gesamtnutzungsgrad erreichbar und welchen Beitrag leisten die übrigen erneuerbaren Energien? Diese Fragen sollen im Rahmen einer umfassenden Biomasse-Strategie beantwortet werden. Die entsprechenden Grundlagen sind zum Teil vorhanden (Potenzialstudie) oder in Arbeit (Energie-Perspektiven, Ökobilanz von Energieprodukten, Wirtschaftlichkeit von Biomasseanlagen, Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz, dezentrale Stromerzeugung mit Feststoff-Biomasse).

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, *Uster*: a) ***Vorstudie «Ökobilanz von Energieprodukten»*** (SB) b) ***Hauptstudie «Ökobilanz von Energieprodukten» (Teilprojekt 1)*** (JB) http://www.esu-services.ch/.

[2] N. Jungbluth (jungbluth@esu-services.ch), ESU-services, *Uster*: ***RENEW - Life Cycle Assessment for BTL-fuel production*** (JB) http.//www.renew-fuel.com.

[3] S. Biollaz (serge.biollaz@psi.ch), PSI *Villigen*: ***RENEW - Erzeugung von synthetischem Erdgas aus Holz, Stroh und Black liquor zur Nutzung als Biotreibstoff*** (JB) http.//www.renew-fuel.com.

[4] F. Vogel (frederic.vogel@psi.ch), PSI *Villigen*: ***Biogenes Methan durch hydrothermale Vergasung*** (JB) http://www.psi.ch/.

[5] M. Meyer (martin.meyer@shl.bfh.ch), Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, SHL, *Zollikofen*: ***Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes im unteren Leistungsbereich mit eigener Ölmühle*** (JB) http://www.shl.bfh.ch/.

[6] D. Ruch (ruch@genesys.ch), Genesys Gmbh, *Frauenfeld*: **BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht** (SB) http://www.genesys.ch/.

[7] Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE UF-Membran, c/o Ingenieurbüro HERSENER, *Wiesendangen*: ***Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Messkampagne)*** (JB).

[8] Y. Membrez et al. (yves.membrez@erep.ch), EREP, *Aclens*: ***Développement d'un concept combiné de production de biogaz et d'élimination de l'ammoniac appliqué aux effluents agricoles*** (JB).

[9] T. Kupper (thomas.kupper@eawag.ch), EAWAG, *Dübendorf*: ***Organische Schadstoffe in Kompost und Gärgut der Schweiz*** (JB).

[10] J. Fuchs (jacques.fuchs@fibl.ch), FiBL, *Frick:* ***Auswirkungen von Komposten und Gärgut auf die Umwelt, Bodenfruchtbarkeit und Pflanzengesundheit*** (JB).

[11] H. Engeli (engeli@compuserve.com), engeli engineering, *Neerach*: ***Schweizerische Statistik erneuerbarer Energieträger, Teilstatistik Biogas*** (SB).

[12] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch), Verenum, *Zürich*: a) ***IEA, Implementing Agreement Bioenergy,*** **Task 32: Biomass Combustion and Co-Firing** (JB) http://www.ieabcc.nl/ • b) **Systemoptimierung automatischer Holzfeuerungen** (SB) • c) **Low-Particle Unterschubholzfeuerung** (JB) • d) **Wirkung von Verbrennungspartikeln** (JB), **Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz** (SB).

[13] R. Bühler (rbuehler@mus.ch), *Maschwanden*: a) ***IEA, Implementing Agreement Bioenergy, Task 33: Thermal Gasification of Biomass*** (JB) http://www.gastechnology.org/webroot/app/xn/xd.aspx?it=enweb&xd=iea\homepage.xml • b) ***Thermische Nutzung anspruchsvollen Biomassebrennstoffe*** (SB).

[14] A. Wellinger (arthur.wellinger@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, *Aadorf*: ***IEA, Implementing Agreement Bioenergy, Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas*** (JB) http://www.novaenergie.ch/iea-bioenergy-task37/index.htm

[15] B. Salerno, (info@sesolar.ch), SALERNO ENGELER GMBH, *Langenbruck:* ***NOS*** (SB).

[16] H.R. Gabathuler, (gabathuler.ag@bluewin.ch), *Diessenhofen*: ***Regelkonzepte für bivalente Holzheizungsanlagen*** (JB)

[17] H. Ott, W. Müller Konstruktionen AG, *Flaach*, ***Katalytischen Direkt-Verflüssigung (KDV)*** (JB).

[18] H. Gemperle, www.pyroforce.ch, *Emmenbrücke:* ***Vergaseranlage Pyroforce*** (JB).

[19] H.J. Schmid, www.holzfeuerung.ch ,Schmid AG, *Eschlikon:* ***Rohrelektrofilter*** (SB).

[20] C. Gaegauf, M. Schmid, www.oekozentrum.ch, *Langenbruck:* a) ***Bio-Pro*** (JB) • b) ***Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoff-Biomasse*** (SB).

Liste der P+D-Projekte

[21] D. Ruch (ruch@genesys.ch), Genesys Gmbh, *Frauenfeld*: ***Kompakt-Biogasanlage Gansner, Graltshausen TG*** (JB) http://www.genesys.ch/.

[22] D. Ruch (ruch@genesys.ch), Genesys Gmbh, *Frauenfeld*: ***Kompakt-Biogasanlage Winzeler, Thayngen SH*** (JB) http://www.genesys.ch/.

[23] Jakob Bösch AG, *Schwellbrunn* und Hersener/Meier (hersener@agrenum.ch), ARGE *MBR*, c/o Ingenieurbüro HERSENER, *Wiesendangen:* ***Vergärung von Gülle im Membran-Bioreaktor (MBR-Pilot)*** (JB).

[24] Bruno Liesch (bruno.liesch@ines-energy.ch), INES Ingenieurbüro, *Bern:* ***Kompakt-Biogasanlage für die Landwirtschaft mit effizienter BHKW-Technik*** (JB).

[25] U. Brücker (ub@itz.ch), ARGE Swiss Farmer Power, *Horw*: ***SwissFarmerPower „Biogas vom Bauer wird zum Treibstoff von morgen" (prix pegasus)*** (SB).

[26] P. Maurer (peter.maurer@bernmobil.ch) Bernmobil, *Bern*: ***Biogasbetriebene Gelenkautobusse in Bern*** (JB).

[27] R. Bettex (info@fromagerie-bettex.ch), *Champtauroz:* ***Installation de production de biogaz.***

[28] B. Näf (beat.naef@verdesis.com), Verdesis Suisse S.A., *Erlinsbach*: ***Erhöhung des Gasertrags durch Co-Vergärung von protein- und fettreichen Stoffen*** (SB).

Referenzen

[29] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007***, ausgearbeitet durch die Eidg. Energieforschungskommision CORE, 1. Januar 2004, www.bfe.admin.ch

[30] ***Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz***, BFE, Dezember 2004.

PROGRAMM KLEINWASSERKRAFTWERKE

Manuel Buser
pl@smallhydro.ch

Pumpturbinen für Wasserversorgungen

Seit 15 Jahren, bzw. seit 1.5 Jahren, speisen die rückwärtslaufenden Pumpen der Wasserversorgungen Altstätten (links) und Sörenberg (rechts) erneuerbaren Strom ins Netz. Ein neuer Erfahrungsbericht mit Messprogramm analysiert die Dimensionierung solcher Anlagen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Kleinwasserkraft ist eine der bedeutendsten erneuerbaren Energietechnologien in der Schweiz. Über 1000 Anlagen produzieren jährlich 3439 GWh wertvolle Elektrizität aus einheimischen Ressourcen; das entspricht einer Zunahme von 2% innert Jahresfrist.

Allerdings werden auch viele Projekte nicht realisiert - sei es, weil die politischen Rahmenbedingungen zur Zeit als zu unsicher eingestuft werden, oder weil die Projekte die Rentabilitätsschwelle noch nicht erreichen.. Ziel des ***Forschungsprogramms Kleinwasserkraftwerke 2004-2007*** [16] ist es, Innovation und Know-how im Schweizer Kleinwasserkraft-Sektor zu stärken. Damit sollen kostengünstige, angepasste Lösungen für jene Potenziale entwickelt werden, welche zur Zeit noch nicht wirtschaftlich erschlossen werden können.

Prioritäre Forschungsgebiete sind:

- Optimierte Turbinen / Pumpen als Turbinen
- Niederdruck-Innovationen
- Steuerungs- und Messtechnik
- Drehzahlvariable Technologie
- CFD / numerische Strömungssimulationen
- Statistiken und Potenzialstudien

Für den P&D-Bereich liegen die Schwerpunkte bei Anlagen, die bezüglich Umweltverträglichkeit mustergültig sind, und bei innovativen Trink- und Abwasserkraftwerken.

Die enge Koordination des Forschungsbereichs mit den Aktivitäten von EnergieSchweiz unter dem gemeinsamen Dach des Programms Kleinwasserkraftwerke hat sich bewährt. In diesem Zusammenhang sei auf die zahlreichen Vorstudien und Grobanalysen hingewiesen, die das Programm Kleinwasserkraftwerke unterstützt. Auch weitere Begleitmassnahmen wie Veranstaltungen, Publikationen und ein Beratungsservice gehören zu den Aktivitäten des Programms Kleinwasserkraftwerke. Für weitere Informationen sei auf den ***EnergieSchweiz-Jahresbericht*** [18] und auf das ***Positionspapier*** [17] des BFE zur Kleinwasserkraft verwiesen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

OPTIMIERTE TURBINEN- UND PAT-KONZEPTE

Das 2004 gestartete Projekt ***Standardpumpen für kleine Leistung - Messprogramm*** [1] hatte zum Ziel, die Technik der rückwärtslaufenden Pumpen bzw. Pumpen als Turbinen (PAT) bei der Schweizer Zielkundschaft - Planer und Betreiber von Wasserversorgungen - bekannter zu machen. Anhand einer bestehenden Anlage in der Schweiz, dem Trinkwasserkraftwerk Emmensprung in Sörenberg, wurden, gestützt auf Messungen vor Ort, die Arbeitsschritte der Dimensionierung aufgezeigt und die Wirkungsgrade kontrolliert. Die Besonderheiten der PAT-Technologie wie Maschinendimensionierung, Teillastwirkungsgrade, Durchbrennen wurden ebenfalls behandelt. Bei der beispielhaft untersuchten 8kW-Anlage lag der Gestehungspreis mit einer rückwärtslaufenden Pumpe bei 12.1 Rp./kWh. Im Rahmen des Projekts wurde eine ergänzende Potenzialabschätzung durchgeführt. Gestützt auf die Erkenntnis, dass rückwärtslaufende Pumpen bereits ab 10 kW wirtschaftlich eingesetzt werden können, wurde ein Potenzial von 488 Anlagen errechnet, also bedeutend mehr als beispielsweise in den DIANE-Studien unter klassischeren Annahmen ausgewiesen. Das Projekt wurde von EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen in Zusammenarbeit mit der Pumpenherstellerin *Häny AG* als Industriepartnerin durchgeführt und 2005 abgeschlossen. Zur grösseren Bekanntmachung der Resultate beim Fachpublikum soll abschliessend ein Merkblatt erstellt werden.

Abbildung 1: *Bestimmung der Gehäusegeometrie einer grossen Pumpe zur Vorhersage der Turbinencharakteristik*

Von der Technologie der rückwärtslaufenden Pumpen ist, trotz schlechterer Wirkungsgrade, für bestimmte Anwendungen ein Kostenreduktionspotenzial zu erwarten. Eine wesentliche Hürde bleibt jedoch die Schwierigkeit, das Verhalten der Maschinen genau vorherzusagen. Das Projekt ***Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbe-***

trieb [2] der Fachhochschulen Genf und Sitten erforschte neue Methoden, um diese Lücke zu schliessen. Dazu wurde ein mathematisches Modell erarbeitet, welches aufgrund der Geometrie der Maschine die Fallhöhenverluste voraussagt. Mit diesem Modell wird dann das Verhalten im Turbinenbetrieb errechnet. Das Modell wurde anhand von vier bekannten Pumpengeometrien und von Messdaten auf dem Prüfstand der FH Genf überprüft; die Genauigkeit der vorausgesagten Fallhöhe im optimalen Betriebspunkt ist 4-5%. Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit *Sulzer Pumps* durchgeführt.

INNOVATIONEN IM NIEDERDRUCKBEREICH

Abbildung 2: *Hydrokinetische Doppelturbine, die wie ein «Drachen» mit Seilen in Fliessgewässern verankert wird. Leistung ca. 130 kW*

Verschiedentlich wurden Konzepte vorgeschlagen, um neben der potenziellen Energie auch die kinetische Energie in schnell fliessenden Gewässern nutzen zu können. Ein relativ weit fortgeschrittener Ansatz ist eine hydrokinetische Propellerturbine der Firma *UEK*, die auch als *elektrischer Unterwasser-Drachen* bezeichnet wird.

In der Schweiz gibt es einige denkbare Standorte für solche Anlagen. Ziel des neu angelaufenen Forschungsprojekts ***Floating Turbine UEK Swiss - Feasibility study*** [3] ist es, einen geeigneten Standort für ein Pilotprojekt ausfindig zu machen sowie Umweltverträglichkeit und gesetzliche wie praktische Hürden genau zu untersuchen. Konkrete Resultate werden im Jahr 2006 erwartet.

STATISTIKEN UND POTENZIALSTUDIEN

Die statistische Erfassung der Kleinwasserkraftwerke unter 300 kW, welche zahlenmässig die Mehrheit stellen, ist bis anhin komplex und aus Kostengründen nur sporadisch durchführbar. Um die jüngsten Trends wieder quantifizieren zu können, wurde das Projekt ***Ermittlung des Brutto-Zuwachses*** [4] kleinster Wasserkraftwerke durchgeführt.

Die Resultate bekräftigen die jüngeren Trends:

- Immer mehr Trinkwasserkraftwerke. Seit 1985 wurden in der Schweiz schon 130 solche Anlagen gebaut. Die Zahl liesse sich aber noch verdreifachen.
- Verhaltenes Wachstum bei Kleinkraftwerken unter 300 kW. Die politische Unsicherheit und die Sanierungen gemäss Gewässerschutzgesetz hinterlassen sichtbare Spuren.
- Demgegenüber weisen die Daten des ehemaligen Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG ein starkes Wachstum im Grössenbereich 300 kW – 1 MW und darüber auf, wobei die Ausbauleistung jeweils deutlich stärker wächst als die Jahresproduktion

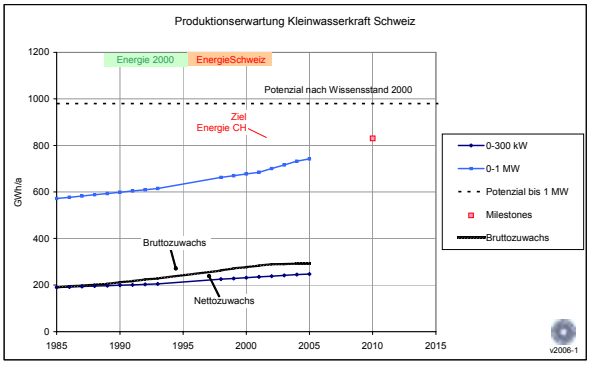


Abbildung 3: *Bestand, langfristiges Wachstum und Potenzial von Kleinwasserkraftwerken unter 1 MW*

Die Zahlen sind jedoch mit dem Vorbehalt behaftet, dass es sich letztlich um eine Extrapolation der umfassenden Erhebungen von 1985 handelt. Die Methode liefert zwar recht gute Resultate von einem Jahr aufs nächste, die Verlässlichkeit der absoluten Zahlen stösst jedoch nach dieser langen Zeit an Grenzen. Die Einführung besserer statistischer Methoden sowie die Erschliessung neuer Quellen wird angegangen.

2 neue Projekte sollen Grundlagen erarbeiten, um neben dem Zuwachs auch das Potenzial besser berechnen zu können. Beim Projekt ***Vorabklärung Potenzial Trink- und Abwasserkraftwerke*** [5] geschieht das durch eine Überprüfung der Diane-Potenzialdaten mit Hilfe verschiedener Quellen. Beim Projekt ***Vorgehensabklärung Potenzial Kleinwasserkraft*** [6] werden zwei grundlegend verschiedene Ansätze untersucht: ein Top-Down-Ansatz basierend auf einem digitalisierten Gewässernetz, und ein Bottom-Up-Ansatz basierend auf den Konzessionsregistern. Ziel ist es, die Machbarkeit der jeweiligen Methodik für eine gesamtschweizerische Potenzialerhebung abzuklären.

WEITERE PROJEKTE

In den letzten Jahrzehnten konnten bei realisierten Anlagen viele konkrete Erfahrungen mit KWKW gesammelt werden. In einigen Fällen haben sich dabei Qualitätsmängel gezeigt. Typischerweise erhöhen Qualitätsmängel die Gestehungskosten pro kWh merklich gegenüber der Planung.

Im Vorprojekt ***Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung*** [7] sollen typische Qualitätsmängel an bestehenden KWKW aufgezeigt werden. In einzelnen Fallstudien werden Beispiele von KWKW analysiert. Im Zusammenhang mit diesen Fallstudien soll der Nutzen von numerischer Festigkeitsberechnung und numerischer Strömungsberechnung zur Auslegung, respektive zur nachträglichen Verbesserung aufgezeigt werden. Ziel ist, die Erarbeitung eines Pflichtenhefts für Best Practice Guidelines zur Qualitätssicherung von KWKW.

Nationale Zusammenarbeit

Die Kleinwasserkraft beschränkt sich nicht auf hydraulische Maschinen, sondern ist vielmehr ein interdisziplinäres Gebiet, welches sich von Wasserbau, Mechanik, Elektrotechnik bis zu Geografie, Hydrologie und Umweltnaturwissenschaften erstreckt. Die Schweizer Kleinwasserkraft-Szene ist ausserdem relativ heterogen. So agieren zum Beispiel mehrere Verbände und gut 50 KMUs mit unterschiedlichsten Spezialisierungen im Markt. Entsprechend wichtig ist eine gute Vernetzung.

Traditionellerweise finanziert das BFE eher Projekte privater Firmen / Organisationen oder angewandte Forschung im FH-Bereich, während im ETH-Bereich meist umfangreichere Projekte durch den ETH-Rat, die KTI oder den Nationalfonds unterstützt werden. Wenn anspruchsvolle Fragen der Grundlagenforschung direkt in die Praxis überführt werden müssen, ergeben sich gemeinsame Vorhaben wie das Projekt ***Floating Turbine*** [3], das vom BFE und von den *Services industriels de Genève* finanziert und vom *Laboratoire des constructions hydrauliques LCH* der EPFL zusammen mit einer privaten Firma durchgeführt wird.

Das Programm Kleinwasserkraftwerke arbeitet strategisch mit dem Programm Energie in Infrastrukturanlagen zusammen. Dieser Zusammenarbeit entsprangen namentlich das ***Messprogramm an rückwärtslaufenden Standardpumpen*** [1] und das Forschungsprojekt zur ***Potenzialabklärung der Trink- und Abwasserkraftwerke*** [5]. Neben dieser Zusammenarbeit funktioniert auch jene mit dem Kompetenznetzwerk Wasser im Berggebiet gut, wie die Verleihung des Swiss Mountain Water Awards an die Stiftung Revita mit dem Projekt der ***Peltonturbine für geschlossene Systeme*** [9] gezeigt hat (siehe Abschnitt Pilot- und Demonstrationsprojekte weiter unten).

Internationale Zusammenarbeit

Die Akteure des Programms Kleinwasserkraftwerke sind gut in das europäische Umfeld integriert. So sind beispielsweise mit dem LCH und dem *MHyLab* gleich zwei Schweizer Organisationen im ***Thematic Network on Small Hydropower (TNSHP)*** [19] der *ESHA (European Small Hydropower Association)* vertreten. Das *TNSHP* hat am 30.6. und 1.7.2005 in Lausanne seinen fünften internationalen Workshop durchgeführt.

Die europäische Kommission finanziert im Rahmen des Programms ALTENER das Projekt SPLASH. Der Schweizer Beitrag besteht hierbei in der Beurteilung des mittel- und längerfristigen Potenzials der neuen Technologien in Bezug auf die Machbarkeit von Kleinwasserkraftanlagen an bestimmten Standorten, welche bisher als technisch unattraktiv galten. Das BFE unterstützt als ***Begleitmassnahme von SPLASH*** [8] die Aufarbeitung von bestehendem Know-how aus den DIANE- und PACER-Programmen.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Projekt ***Kleinstwasserkraftwerke für variable Volumenströme in geschlossenen Systemen*** [9] wurde eine spezielle Peltonturbine zur Nutzung der Druckreduzierenergie in geschlossenen Systemen (meist Trinkwasserversorgungen) entwickelt. Die Gesamtökobilanz von solchen Systemen ist hervorragend. Das Anwendungspotenzial ist beträchtlich – es ähnelt jenem für die rückwärtslaufenden Pumpen, für welches die Abschätzung im Rahmen des Projekts [1] neue Anhaltspunkte liefert.

Im Rahmen des BFE-Projekts hat die *Stiftung Revita* umfangreiche Berechnungen, Simulationen und Vorabklärungen durchgeführt. Für diese Arbeit wurde die Stiftung mit dem *Swiss Mountain*

Water Award 2005 ausgezeichnet. Es wird nun die Realisierung eines Prototyps in der Walliser Gemeinde Gregnols angestrebt.

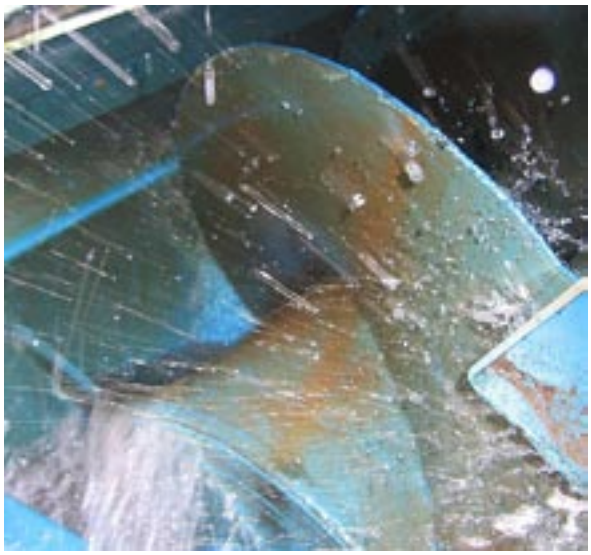


Abbildung 4: *Wasserkraftschnecke in Derendingen, eine in der Schweiz erstmals eingesetzte Technologie*

Die Technologie der Wasserkraftschnecke stammt aus dem Altertum und entspricht dem Prinzip der *archimedischen Schnecke*. Mit der im Februar 2005 in Betrieb genommenen ***Wasserkraftschnecke am Grüttbach in Derendingen*** [10] konnten nun erste Erfahrungen gesammelt werden. Bisherige Daten zeugen von der hohen Zuverlässigkeit der im Moment 6 Kilowatt abgebenden Anlage. Der hydraulische Wirkungsgrad am optimalen Betriebspunkt wird mit 85% angegeben. Nach und nach werden die Provisorien des Testbetriebs nun durch die endgültigen Anlageteile ersetzt.

Die Unterstützung durch den Bund war zwingend nötig, hätte doch sonst ein Stromgestehungspreis von 28.4 Rp./kWh resultiert. Die Wasserkraftschnecke ist die erste ihrer Art in der Schweiz. Die Technologie ist einfach und robust, und für kleine Fallhöhen und geringe Leistungen eine sehr gute Wahl. Ausserdem handelt es sich um eine sehr Fisch-freundliche Technologie, konnte doch der deutsche Hersteller in Tests eine Mortalität von 0% nachweisen.

Bei der Wiederinbetriebnahme stillgelegter Kleinwasserkraftwerke sind nicht nur strenge Umweltauflagen zu erfüllen, bisweilen stellen sich durch den Denkmalschutz auch besondere konstruktive Anforderungen an die Maschinen. Mit dem im Jahr 2003 gestarteten Projekt zur Entwicklung eines ***zweiteiligen Synchrongenerators mit Permanentmagneten*** [11] für das historische Kleinkraftwerk Wespi-Mühle in Winterthur wurde eine Lösung aufgezeigt, bei welcher der Generator direkt an die Turbinenwelle angebaut wird. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen, dass der Einsatz eines zweigeteilten Generators - unter den speziellen Voraussetzungen der Wespi-Mühle - wirtschaftlich ist. Dank einer Steigerung des Nutzungsgrades der Anlage resultiert eine markante Mehrproduktion zu Energiegestehungskosten von 3.8 Rp./kWh.

Das ***Dotierkraftwerk Verbois im Kanton Genf*** [12] hat die ersten zwei Betriebsjahre hinter sich. Die Anlage dotiert nicht eine Restwasserstrecke, sondern die Lockströmung für den im Jahr 2000 neu gebauten Fischpass. Somit kann der Energieverlust durch den Fischpass teilweise kompensiert werden. Die Interessen des Gewässerschutzes werden so mit jenen der nachhaltigen Energieproduktion in Einklang gebracht.

Abbildung 5: *Sanierte Staumauer des Kleinwasserkraftwerks Buchholz. In der Mitte das Treppengerinne der neuen zentralen Hochwasserentlastung.*

Abbildung 6: *Am 13.5.2005 eingeweihtes Trinkwasserkraftwerk Mettental*

Der Bau des ***Kleinwasserkraftwerks Buchholz*** [13] hat wesentliche Fortschritte gemacht. Der Rohbau ist grösstenteils fertig gestellt. Die geplanten schrittweisen Aktienkapitalerhöhungen der

Bauherrin konnten erfolgreich durchgeführt werden. Vor der Winterpause konnte noch mit dem Stahlwasserbau (Schütze für Spülung, Druckrohr und Fischschleuse) begonnen werden.

Das Projekt ***WERAP in Bubikon*** [14] zur Revitalisierung der historischen Anlage einer ehemaligen Streichgarn-Spinnerei wurde annulliert. Das Projekt hätte zu einer Reduktion des Abflusses über den benachbarten Wasserfall geführt. Die Natur-und Heimatschutzkommission des Kantons Zürich lehnte das Vorhaben ab und argumentierte, die Firma WERAP sei heute nicht mehr auf die Stromproduktion aus einem eigenen Kraftwerk angewiesen.

Nicht nur in diesem Fall wurde die Kleinwasserkraft von ihrer Vergangenheit im frühen Industriezeitalter eingeholt; damals führte eine rund zehnmal höhere Kleinkraftwerks-Dichte zu einer Übernutzung und Zerstörung der Gewässer. Heutige Projekte haben es offenbar immer noch schwer, diesen geerbten Imageschaden wettzumachen.

Das ***Ultra-Hochdruck-Trinkwasserkraftwerk Mettental*** [15], welches im Überblicksbericht 2005 ausführlicher vorgestellt wurde, konnte am 13. Mai 2005 erfolgreich eingeweiht werden. Die Anlage beweist, dass auch bei sehr grossen Fallhöhen eine Turbinierung in einer Etappe technisch machbar und sinnvoll ist.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Die realisierten Projekte haben gezeigt, dass mit dem Forschungsprogramm 2004-2007 ein umfassendes und auch praxistaugliches Konzept erstellt wurde. Alle Projekte stehen in engem Bezug zu den darin definierten Prioritäten; das Qualitätssicherungsprojekt nimmt eine übergeordnete Rolle ein.

In Anbetracht der relativ bescheidenen Mittel des BFE – die Budgets bewegten sich jeweils im Bereich von 100’000 CHF pro Jahr – konnte im Jahr 2005 doch eine ansehnliche Zahl von Projekten abgewickelt bzw. neu initiiert werden. Das darf sicher als Erfolg bewertet werden.

Im Jahr 2006 soll versucht werden, die beiden Vorprojekte zur Potenzialerhebung durch grössere Nachfolgeprojekte zur Umsetzung zu bringen. Die Finanzierung dafür ist momentan noch nicht gesichert.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Publikationsnummern in Klammern)

Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] Reto Baumann, Häny AG, *Meilen*, und Ernst A. Mueller (mueller@infrastrukturanlagen.ch) *Zürich:* ***Standardpumpen für kleine Leistung, Messprogramm*** (SB)

[2] Michel Dubas (michel.dubas@hevs.ch), Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale (HES SO), *Sion:* ***Caractéristiques des pompes fonctionnant en turbines / Charakteristiken von Pumpen im Turbinenbetrieb*** (SB).

[3] Karl Randall (karlrandall@gresham.ch), Gresham Sàrl, *Genève*: ***Floating Turbine UEK Swiss Project - Feasibility Study*** (-)

[4] Hanspeter Leutwiler, (hpleutwiler@iteco.ch), ITECO Ingenieurunternehmung AG, *Affoltern am Albis:* ***Brutto-Zuwachs für anonymisierte Statistiken*** (SB)

[5] Ernst A. Müller (mueller@infrastrukturanlagen.ch), Büro eam, *Zürich*: ***Vorabklärung Potenzial Trink- und Abwasserkraftwerke*** (-)

[6] Reto Dettli (reto.dettli@econcept.ch), econcept AG, *Zürich* in Zusammenarbeit mit dem geographischen Institut der Universität *Bern:* ***Vorgehensabklärung Potenzial Kleinwasserkraft*** (-)

[7] Thomas Staubli, tstaubli@hta.fhz.ch, Hochschule für Technik und Architektur *Luzern*: ***Optimierung von Kleinwasserkraftwerken durch Qualitätssicherung - Vorprojekt*** (-)

[8] Martin Roth (martin.roth@entec.ch), entec ag, *St. Gallen:* ***SPLASH – Spatial Plans and Local Arrangements for Small Hydro,*** Schweizer Beitrag zum EU-Forschungsprojekt (JB).

Liste der P+D-Projekte

[9] Bruno Schindelholz (bruno.schindelholzrevita.ch), Stiftung Revita, *Langenbruck:* ***Kleinstwasserkraftwerke für variable Volumenströme in geschlossenen Systemen*** (SB)

[10] Thomas Köhli (thomaskoehli@yahoo.com), *Derendingen:* ***Demonstrationskraftwerk alte Ziegelei am Grütbach, Derendingen*** (JB).

[11] Bruno Schindelholz, (bruno.schindelholz@revita.ch), Stiftung Revita, *Langenbruck:* ***Zweiteiliger Synchrongenerator mit Permanentmagneten*** (SB)

[12] Patrick Quercia, patrick.quercia@sig-ge.ch, und Jean Louis Martinez, Services industriels de *Genève:* ***Micro-centrale de Verbois*** (SB).

[13] Ivo Scherrer (info@entegra.ch), ENTEGRA Wasserkraft AG, *St. Gallen:* ***Kleinwasserkraftanlage Buchholz*** (JB)

[14] Adrian Bretscher und Stephan Gutzwiller, revita@revita.ch, Stiftung Revita, *Langenbruck*: ***Konzessionsprojekt KW WERAP*** (Projekt abgebrochen; Vorgängerbericht: SB 230081)

[15] Alois Spichtig (alois.spichtig@bluemail.ch), Wasserversorgung *Sachseln* Dorf und Umkreis (WVS): ***Trinkwasserkraftwerk Mettental*** (-)

Referenzen

[16] Manuel Buser, Hedi Feibel, entec ag, St. Gallen, ***Forschungsprogramm Kleinwasserkraftwerke 2004-2007***, Download: http://www.kleinwasserkraft.ch/web/deutsch/programm/forschung.html

[17] ***Positionspapier Energie aus Kleinwasserkraftwerken: Ziele und Prioritäten für die Nutzung von Energie aus Kleinwasserkraftwerken***, BFE, Version 1.2, Dezember 2004, Download: http://www.kleinwasserkraft.ch/web/deutsch/programm/

[18] ***4. Jahresbericht EnergieSchweiz 2004/05***, UVEK, Programmleitung EnergieSchweiz, BFE (Herausgeber), Download: http://www.bfe.admin.ch/energie/00556/

[19] ***Thematic Network on Small Hydropower***, ESHA, *Brüssel*, Website: http://www.esha.be/index.php?id=29

PROGRAMM GEOTHERMIE

Harald L. Gorhan
harald.gorhan@bluewin.ch

Umbau des Grand Hotels Dolder (ZH): Vor-und Rücklauf des Erdwärmesondenfeldes

72 Erdwärmesonden mit einer totalen Länge von 10.6 km entnehmen im Winter dem Untergrund Wärme, die dann über Wärmepumpen zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung verwendet wird. Im Sommer dient das Sondenfeld als Kältespeicher für die Kühlung von insgesamt 178 Gästezimmern [22]

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Forschungsschwerpunkt der ***tiefen Geothermie*** ist die Weiterentwicklung und Realisierung des ersten Hot-Dry-Rock / Hot-Wet-Rock-Projektes zur Strom- und Wärmeproduktion in der Schweiz. Die internationale Einbindung ist durch die intensive Zusammenarbeit mit der *European Geothermal Energy Council (EGEC)*, der *International Geothermal Association (IGA),* mit der *International Energy Agency (IEA)* bzw. durch Mitarbeit von Schweizer Fachleuten am EU- Geothermieprojekt in Soultz-sous-Forêts gegeben.

Bezüglich Forschung in der ***untiefer Geothermie*** stehen Untersuchungen zur Qualitätssicherung und Erhöhung der generellen Planungssicherheit sowie die Kälteproduktion mittels *Geo-cooling* von geothermischen Grossanlagen im Mittelpunkt

Pilot- und Demonstration sollen die Ergebnisse der Erfolgskontrollen im Rahmen von Energie-Schweiz im Sinne von guten Beispielen weiterverwendet und bekannt gemacht werden. Generell sollen die verschiedenen geothermischen Nutzungsmethoden auf regionaler und nationaler Ebene besser bekannt gemacht werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

RAHMENBEDINGUNGEN

Die bestehenden Strukturen der Geothermieszene Schweiz haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten rasant entwickelt. Zukünftig gilt es die Zusammenarbeit mit der Wirtschaft (KMUs), Politik, mit der Öffentlichkeit bzw. Forschung, inklusive Aus- und Weiterbildung, signifikant zu verbessern:

Taskforce Dachorganisation Geothermie Schweiz: Erarbeitung von Empfehlungen und Vorschlägen zuhanden des BFE [1]**:** In den Zukunftsperspektiven der schweizerischen Energieversorgung werden in die Geothermie grosse Erwartungen gesetzt. Die geothermischen Nutzungsmöglichkeiten sind vielfältiger geworden, die involvierten Personen, Firmen und Institutionen zahlreicher. Um diesen Erwartungen gerecht zu werden, sollen geeignete Hinweise für Planer, Bauherrschaften und Investoren integriert und neben wissenschaftlich-technischen Infos auch Wirtschaftlichkeitsaspekte und Potenzialabschätzungen berücksichtigt werden.

Überarbeitung Broschüre „Geothermie–praktische Nutzung der Erdwärme“ in deutsch und französisch [2]: Aktualisierte Informationen und Übersicht über den Stand der Technik und die Zukunftsaussichten bei der Nutzung der Geothermie sind die primären Ziele der Broschürenerneuerung. Zu diesem Zweck sollen speziell die Ergebnisse der noch laufenden P+D-Erfolgskontrollen (zweijährige Messkonzepte) an geothermischen Grossanlagen in die neue Broschüre einfliessen.

UNTIEFE GEOTHERMIE

Rafraîchissement par géo- cooling. Bases pour un manuel de dimensionnement [3]: Cette étude se consacre aux deux types de systèmes de rafraîchissement passif qui utilisent le sous-sol comme source de fraîcheur, que nous regroupons sous le terme de géo- cooling :

- Géo- cooling avec sondes géothermiques verticales,
- Géo- cooling avec sondes horizontales peu profondes (de type *puits canadiens* ou apparentés).

Le projet n’a pas pour but de créer de nouvelles connaissances mais de synthétiser celles déjà disponibles.

Manuel pour le refroidissement de bâtiments par «géo-cooling» sur sondes géothermiques verticales: critères d’intégration, potentiel de refroidissement et règles simplifiées de dimensionnement [4]: Le projet de recherche a mis en évidence le manque des connaissances actuelles relatives à l’intégration de ce genre de système dans un bâtiment et de son interaction avec ce dernier, et par voie de conséquence sur le potentiel d’utilisation de ce type de système. L’objectif principal du présent projet est de combler ces lacunes et de rédiger un manuel sur la thématique.

Etude du potentiel d’utilisation du «gé-cooling» d’une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie® à Chiasso [5]: Le nouveau bâtiment de la douane commerciale de Chiasso–Brogeda de 2’200 m^2 de surface de référence énergétique répartis sur 6 étages. Construit de manière à respecter le standard Minergie® avec une distribution de chaleur et de froid par dalles actives (donc avec des températures très basses pour le chauffage et très haute pour le refroidissement), il possède de bonnes caractéristiques pour une intégration optimale d’un système de chauffage et de refroidissement par un champ de sondes géothermiques.

Mini- module de chauffage pour tests de réponse thermique des terrains [6]: Un mini-module de chauffage pour déterminer les

caractéristiques thermiques des sols et des sondes géothermiques a été réalisé. Avec cet équipement unique en Europe, le transport et la manipulation sont grandement facilités. Tout l'appareillage tient dans une valise de type *flight case* et pèse environ 45 kg. Les caractéristiques et options de l'ancien module sont améliorées. La mise en place et le raccordement de ce mini-module de chauffage pour le test d'une géostructure ou d'une sonde géothermique devient de ce fait très aisé et permet de réduire les coûts des tests de réponse thermique.

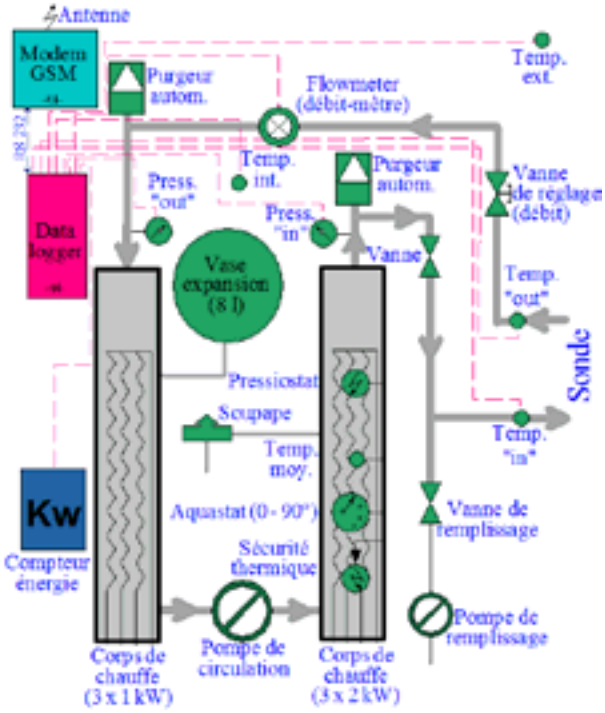
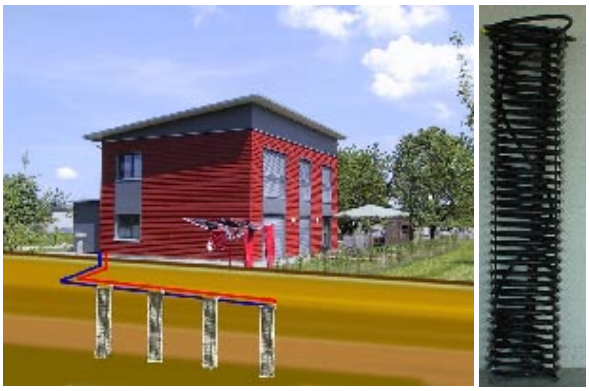


Figure 1: *Schéma de fonctionnement du mini-module de chauffage*

Groundwater Energy Designer (GED). Computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser [7]: Dieses Tool richtet sich an Planer und Ersteller von kleineren Anlagen sowie an Bewilligungsbehörden. Es berücksichtigt standortspezifisch den Energiebedarf und die hydrogeologischen Verhältnisse. Ausgehend von einer Wärme- oder Kältebedarfsanalyse werden interaktiv die Möglichkeiten der direkten Wärmenutzung des Grundwassers geprüft.

Erstellung von Richtlinien für Grundwasser-Wärme- und Kältenutzungsanlagen [8]: In vielen Kantonen sind derartige Anlagen nur in Randbereichen von Aquiferen erlaubt, also dort, wo die Bodendurchlässigkeiten mässig, der Sand- und Siltanteil hoch bzw. die Grundwasserchemie für einen Wärmepumpenbetrieb problematisch werden. Das Handbuch soll hier helfend eingreifen um eine optimale Dimensionierung, Erstellung und den problemlosen Betrieb von Nutzungsanlagen unter derartigen Bedingungen zu garantieren. Zusammen mit dem vorerwähnten *Groundwater Energy Designer* sollen die Ergebnisse dieser Arbeit zu praxisnahen Richtlinien verarbeitet werden.

Handbuch Erdwärmekörbe (Auslegung, Anwendungsbeispiele, Dokumentation) [9]: Erdwärmekörbe stellen eine innovative Entwicklung auf dem Gebiet der Nutzung untiefer Energieressourcen dar. Ein Energiekorb besteht aus einem Polyethylen-Rohr, das spiralförmig zusammengewickelt wird (Fig. 2). Der gesamte Korb hat eine Höhe von ca. 2 Metern und wird in einer Tiefe zwischen 1.5 und 3.5 m eingebaut. Das Prinzip der Erdwärmenutzung mit Erdwärmekörben ist dem der Erdwärmesonden sehr ähnlich. Im Heizbetrieb wird Wärme aus dem Erdreich extrahiert und zu einer Wärmepumpe gefördert. Ähnlich kann man im Sommer Wärme im Boden für Kühlungszwecke abführen. Es wurde gezeigt, dass ein Erdwärmekorb die jahreszeitliche Temperaturphasenverschiebung in den ersten Metern des Untergrundes nutzt. Die tiefsten Temperaturen kommen Anfangs Sommer vor, wenn die Heizung nicht mehr benötigt wird und die Anlage auch für Kühlzwecke eingesetzt werden kann.



Figur 2: *Heizen und Kühlen mittels untiefer Erdwärmekörbe*

Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde") mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kantons ZH bzw. der umliegenden Kantone [10]: Das Projekt dient zur Qualitätskontrolle von in-situ Wärmeleitfähigkeitsbestimmungen mittels der vom BFE geförderten und erst jüngst patentierten kabellosen Sonde *(Fisch)*. Diese soll zukünftig bei der Dimensionierung von grossen geothermischen Anlagen eingesetzt werden. Konkret soll das Temperaturfeld im Untergrund in 24 Erdwärmesonden gemessen werden. Aus den Daten wird ein detailliertes Temperatur-Tiefenprofil erwartet, welches die Temperaturverhältnisse im Untergrund widerspiegelt. Zur Berechnung bzw. Eichung von Daten des geothermischen Wärmeflusses sind des Weiteren verlässliche

Labormessungen der Wärmeleitfähigkeit und der Gesteinsdichte bez. der Porosität notwendig.

Nutzung der Erdwärme mit Gründungspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen. Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb-Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance [29]: Die primäre Aufgabe von Gründungspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen (allgemein als Geostrukturen bezeichnet) ist die Sicherstellung der Stabilität von Bauwerken. Werden diese Bauteile (z.B. Fundamentplatten, Schlitzwände, Fertigbeton-, Hohl- oder -Ortbetonpfähle, etc.) mit Wärmetauschern ausgerüstet, so können diese auch der Nutzbarmachung von untiefen geothermischen Ressourcen dienen. Bei der Energienutzung mittels Geostrukturen ergibt sich die einzigartige Möglichkeit, Raumheizung und Kühlung mit dem gleichen System zu realisieren. Hierzu wurde ein Planungs- und Ausführungsleitfaden für Bauherren, Planer und Entscheidungsträger erarbeitet. Beide, durch die SIA veröffentlichte Broschüren, wurden im Herbst 05 durch Vorträge an der ETHZ und EPFL, interessierten Kreisen nahe gebracht.

TUNNELWASSERNUTZUNG

Concept de drainage des tunnels en vue d'une optimisation de l'utilisation géothermique [11]: Le but visé par le projet est de définir les conditions dans lesquelles une amélioration du rendement énergétique des eaux souterraines des tunnels pourrait être atteinte. Il s'agit en particulier de l'accompagnement du processus de planification des tunnels à un stade précoce, afin que le potentiel géothermique soit géré au mieux dans l'intérêt à la fois de l'exploitant du tunnel et des éventuels utilisateurs de la chaleur.

TIEFE GEOTHERMIE

Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône (phase A) [12]: Le projet entend évaluer la faisabilité de produire de l'électricité d'origine géothermique, en exploitant les aquifères cristallins profonds de la vallée du Rhône dans les cantons du Valais et Vaud. Plus précisément le territoire à investiguer concerne les tronçons suivants : St-Maurice/Lavey-Saillon et Leuk-Brig/Naters. Les évaluations existantes montrent que le sous-sol de la vallée du Rhône en Valais et Vaud est caractérisé par un flux de chaleur anormal et localement par une bonne fissuration des roches. La preuve en sont les nombreux établissements de bains thermaux qui jalonnent le territoire. Le chimisme des eaux thermales de Lavey-Les-Bains (VD), tout comme celui des eaux de Brigerbad, montrent que le fluide thermal profond atteindrait une température de 110°C.

Erdwärmesonden (EWS) für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation [13]: Im Molassegebiet des Schweizerischen Mittellandes ist im ungestörten Erdreich in Tiefen von 400m mit Temperaturen von ca. 24-26 °C zu rechnen. Dies ist die minimale Temperatur, mit der heute ein gut wärmegedämmtes Gebäude mit Strukturheizung auf 20 °C beheizt werden kann. Das Projektziel ist also, dies mittels direkter Nutzung, d.h. ohne Beizug einer Wärmepumpe zu erreichen. In einer ersten Etappe soll analytisch untersucht werden, wie eine geschlossene Erdwärmesonde aussehen muss, damit eine minimale Temperatur von 24-26°C aus einer Tiefe von 500-600 m gefördert werden kann.

Update „SwEWS" Software zur Auslegung von Erdwärmesonden-Anlagen [14]: Bekanntlich werden EWS in immer grössere Tiefen installiert, d.h. grossteils in Molasseformationen im Schweizer Mittelland. Da es hierbei in erster Linie um geotherm. Grossanlagen handelt, kommt bei der Auslegung derartiger Anlagen eine genaue Kenntnis der thermischen Leitfähigkeit grosse Bedeutung zu. Die 1998 publizierte Software/Datenbank SwEWS soll daher mit neuen Daten aus Tiefbohrungen der letzten 7 Jahre ergänzt werden. Das Programm SwEWS wird auf ACCESS 2000 umprogrammiert bzw. die Benutzeroberfläche von den Daten getrennt, damit spätere Updates benutzerfreundlich gestaltet werden können.

Géothermie de grand profondeur (GGP) à Genève–travaux préparatoires du 1er forage d'exploitation [15]: Ausgehend von früher im Rahmen der allgemeinen DHM- Studien sowie des Projekts DHM Basel erarbeiteten Unterlagen wird ein Business-Plan für das Projekt GGP in Genf erarbeitet. Neben einer Zusammenstellung und Aufdatierung der Projektdaten werden dynamische Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen, zusammen mit der technischen Risikoanalyse erlauben es, das Projekt GGP bezüglich der wirtschaftlichen Aspekte zu beurteilen. Der Business-Plan soll für die privaten und öffentlichen Projektpartner eine Entscheidungsgrundlage für die nächsten Projektphasen bilden.

Geothermal Resource Atlas of Switzerland, Phase 2005 [16]: Für das Modellgebiet Basel-Solothurn wurden die geothermisch relevanten geologischen Strukturen identifiziert, und ein konzeptuelles Strukturmodell erstellt. Die 2004 neu begonnene Unsicherheitsanalyse zur Bewertung der Reichweite der vorhandenen Temperaturdaten konnte abgeschlossen werden. Basierend auf einer variabeln Mächtigkeit der Aquifere OMM und Oberer Malm, einer heterogenen Wärmeleitfähigkeitsverteilung im Kristallin sowie der Integration

advektiver Effekte, wurde die Temperaturverteilung für die Nordostschweiz simuliert. Unter Anwendung des Gringarten- Ansatzes konnte eine Neubewertung der nutzbaren Energie aller relevanten Aquifere der Schweiz vorgenommen werden.

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie, Vorstudie und Arbeitsprogramm [17]: Das vorliegende Forschungsprojekt soll mithelfen, dass Hot-Dry-Rock oder Deep-Heat-Mining (DHM) Projekte von Beginn an ganzheitlich betrachtet und damit auch gesamtwirtschaftlich optimiert werden können. Parallel dazu sollen die Ergebnisse jedoch auch für die Nutzung anderer Quellen in ähnlichem Temperaturbereich – wie z. B. Abwärme oder Wärme aus Biomasse-Nutzung – verwendet werden können.

Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie, Hauptstudie [18]: Die Arbeiten in Zusammenhang mit den Schweizer DHM- Aktivitäten haben gezeigt, dass zur Optimierung einer Anlage die gegenseitige Abstimmung von Ressource und Energieumwandlung von grosser Bedeutung ist (siehe vorheriges Projekt). Aus diesem Grund sollen die geothermie- spezifischen Fragen der Energiekonversion in einem eigenen Forschungsprogramm näher untersucht werden. In einer ersten Phase wurden die verfügbaren Prozesse systematisch erfasst sowie anhand eines Kriterienkatalogs beurteilt. Neben den im Zentrum stehenden thermodynamischen Zyklen wurden auch festkörperphysikalische Prozesse kurz beleuchtet.

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr, wurde mit den folgenden Schweizer Institutionen eng zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** ETHZ (Institute für Erdwissenschaften bzw. für Energietechnik, FG Hochspannungstechnologie), Hochschule Wädenswil, Centre d'hydrogéologie de l' Université de Neuchâtel (da im besonderen mit dem im Frühjahr 2005 neugegründetem *Centre de recherche en géothermie, CREGE*, www.crege.ch), Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations de l'EPFL, Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie de la Université de Genève, Naturhistorisches Museum Basel, Instituto di scienze della terra e laboratorio di energia, ecologia ed economia della scuola universitaria della Svizzera italiana, Haute école valaisanne und Fachhochschule Burgdorf.
- **Stromindustrie und Wärmeversorgung:** Siemens Schweiz AG, BKW, ATEL, Elektra Baselland, Industrielle Werke Basel Aarau Lausanne Freiburg und Genf, Verband Fernwärme Schweiz (VFS, etc).
- **Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE, APES), Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES), BAFU, BBW, BWG, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), energie-cluster, bau-schlau, u.a.
- **Energiefachstellen:** Zusammenarbeit mit allen Energiefachstellen in der Romandie und im Tessin und mit denjenigen der grösseren deutschsprachigen Kantone.

Internationale Zusammenarbeit

Schlüsselprojekt bei der tiefen Geothermie bleibt das *Deep-Heat-Mining* in Basel (Strom- und Wärmeproduktion aus grossen Tiefen), wo mit der ersten Tiefbohrung im Frühjahr 2006 begonnen werden wird.

Angesichts der Bedeutung dieses Projektes für die Energieforschung sowie wegen der erheblichen finanziellen und technischen Risiken, wird während der gesamten Projektdauer ein wissenschaftlicher Beirat die Projektleitung unterstützen. Dem Beirat gehören international anerkannte Experten aus England, Deutschland, Frankreich und weiteren Ländern an. Die Zusammensetzung des Beirats wird den aktuellen Fragestellungen und Projektphasen angepasst [19].

Zusätzliches, praxisnahes Fachwissen bezüglich der Nutzung von tiefer Geothermie, wird aufgrund der Teilnahme an den beiden folgenden internationalen Projekten in die Schweiz gebracht:

Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA [20]: Prof. Dr. L. Rybach ist weiterhin Vice Chairman des GIA Das 14th Meeting des wurde von L. Rybach und Th. Mégel organisiert und fand an der ETH Zürich am 22./23.9.2005 statt. Durch die Teilnahme der Schweiz am GIA ist der regelmässige Erfahrungsaustausch mit Ländern, die in der Geothermie führend sind, gewährleistet; darüber hinaus kann das spezifische Know-how der Schweiz im internationalen Rahmen Anerkennung erfahren.

European Geothermal Project for the Construction of a Scientific Pilot Plant based on enhanced Geothermal System, Soultz- sous- Forêts, Alsace, France [21]: Im kommenden Jahr sollen

diverse Testphasen abgeschlossen bzw. probeweise mit der Produktion von elektrischem Strom begonnen werden.

Im Berichtsjahr, wurde des Weiteren mit den folgenden internationalen Institutionen eng zusammengearbeitet:

Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe ENGINE, *Integrated Geophysical Exploration Technologies I-GET*, *European Geothermal Energy Council EGEC*, *International Geothermal Association IGA*, *Bureau de Recherches Géologiques et Minières BRGM*, *Aménagement du Territoire, Planification Énergétique et Promotion des Energies Renouvables AMETER*, *Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie ADEME*, etc.

Im Ausland wurden von Herrn Prof. *L. Rybach* die folgenden Vorträge gehalten (Auswahl):

- *Geothermal Energy for Electricity Generation - The R&D Priorities.*
- *Environmental aspects of geothermal development.*
- *Ground source heat pumps–Geothermal energy for anyone, anywhere: Current worldwide activity.*
- *Development and application of a new, powerful single well groundwater heat pump system for space heating and cooling.*
- *Environmental aspects of geothermal energy development and utilization, and related legal, institutional and social implications.*
- *Shallow geothermal resources–utilization, status, perspectives.*
- *A new, powerful groundwater heat pump system for space heating and cooling.*
- *A geotermikus energiahasznositas környezetvédelmi kérdései (Umweltschutzaspekte der Geothermienutzung).*
- *Utilization on renewable energy on a global scale – achievements and prospects.*
- *The present and future of geothermal energy in* Europe.

Anlässlich der Ausstellung im Rahmen des ***World Geothermal Congress 2005*** (Antalya/TR) wurde auch ein Schweizer Geothermie- Poster präsentiert.

Die folgende Tabelle zeigt die Stellung der Schweiz im internationalen Vergleich in der geothermischen Energienutzung [40, nach einer Auswertung und Zusammenstellung von Prof. L. Rybach]. Besonders erfreulich dabei der Spitzenplatz der Schweiz bei der Erdwärmenutzung in Einfamilienhäuser (letzte Kolonne in der Tabelle).

Capacity installed (MWt)	Energy use (TJ/yr)	Capacity per area (MWt/km²)	Capacity per capita (MWt/capita)	Energy per area (GJ/yr per km²)	Energy per capita (GJ/yr per capita)	Units per area (12 kW equivalent units per km²)
1. USA (7'200)	1. S (36'000)	1. CH (1.3E-2)	1. S (430.0)	1. DK (91.6)	1. S (4.03)	1. CH (1.08)
2. S (3'840)	2. USA (22'214)	2. S (8.5E-3)	2. N (132.0)	2. S (80.0)	2. DK (0.73)	2. S (0.71)
3. CHN (631.0)	3. CHN (6'569)	3. DK (7.2E-3)	3. CH (73.0)	3. CH (69.6)	3. N (0.68)	3. DK (0.60)
4. N (600.0)	4. DK 3'940)	4. NL (6.0E-3)	4. DK (57.4)	4. A (17.3)	4. CH (0.39)	4. NL (0.50)
5. CH (532.4)	5. CH (2'854)	5. A (3.6E-3)	5. FIN (50.0)	5. NL (16.3)	5. FIN (0.38)	5. A (0.30)

Figur 3: *Weltweiter Vergleich in der Nutzung von geothermischen Wärmepumpen*

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich [22]: Die Bohr- und Installationsarbeiten der 72 Erdwärmesonden von je 152 m Tiefe wurden im Frühjahr 2005 abgeschlossen. Danach wurde die gesamte Installation nach DIN 4279-7 auf Druck und Durchfluss geprüft, und anschliessend mit der 70 cm dicken Bodenplatte des Neubaus zugedeckt. Nach Bauabschluss soll dann im Jahr 2007 der Heiz- bzw. Kühlbetrieb mit geothermischer Energie aufgenommen werden. Entlang einer Reihe von 3 Erdwärmesonden, d.h. am Rand des EWS-Feldes und den dazugehörigen Anschlussleitungen, wurde ausserdem ein Glasfaserkabel installiert, welches für zukünftige Messungen der Betriebssoletemperatur dienen wird. Zusätzlich wurden 2 EWS in der Mitte des EWS-Feldes mit Temperaturfühler ausgerüstet.

EWS-Anlage Überbauung „Bahnhof Süd“ in Aarau [23]: Anfang 2002 wurden 16 Erdwärmesondenbohrungen à 150 m niedergebracht. Die Anlage wird im Winter zur Beheizung des Gebäudes, im Sommer-unter Umgehung der Wärmepumpen-zum Kühlen (sog. Free-cooling) verwendet. Von den 16 Sonden wurden 8 Sonden im obersten Bereich bis in eine Tiefe von 8 m isoliert, die anderen 8 Sonden wurden konventionell eingebaut. Ziel war es, mit dieser Ausstattung den Kosten-Nutzen-Effekt einer Isolierung der obersten Schichten eruieren und messen zu können.

Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung (Unteres Hompeli, SG) im Minergie-Standard [24]: Die effektiv für die Beheizung von 2 Mehrfamilienhäusern benötigte Energie übersteigt die ursprünglich projektierte Energie um ca. 35%. Um den effektiv benötigten Energiebedarf decken zu können, muss dem Boden somit mehr Wärme entzogen werden als anfänglich für dieses Projekt kalkuliert und dimensioniert. Insofern kann sich der Untergrund mit der aktuellen Konstellation nicht in ausreichendem Masse regenerieren. Die JAZ der Anlagen von heute 3.8 resp. 4.3 wird deshalb auch zukünftig, über die Jahre hinweg, schlechter werden.

Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen [25]: En raison de mauvaises conditions géologiques (terrain meuble formé par d’anciens fonds lacustres), le bâtiment a dû être construit sur 440 pieux de fondation. Dans le but de contribuer au chauffage et au refroidissement du bâtiment, plus de 300 pieux sont utilisés en pieux énergétiques. Les premiers résultats montrent que le système fonctionne avec satisfaction. Un coefficient de performance moyen de la pompe à chaleur de 4.3 (sans les pompes de circulation) a été mesuré pour l’hiver 2004–2005. Un potentiel d’amélioration existe dans la distribution de froid: la température de retour de l’eau dans le circuit de distribution est 4 à 5 K plus basse que prévue dans le concept du système, ce qui pénalise l’énergie de refroidissement couverte par géo-cooling. Ceci nécessite le réglage des équipements pour l’émission de froid afin de garantir une température de retour plus élevée.

Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG [26]: Die Messungen zeigen, dass das realisierte Konzept mit den verschiedenen Betriebsarten sehr gut funktioniert. Im Sommer sind rund 80% der Kälteenergie durch Free-cooling oder Doppelnutzung (nutzbare Kühlenergie im Heizbetrieb) aus den Energiepfählen erbracht worden. Die Ein- und Austrittstemperaturen der Energiepfähle zeigen einen ausgeglichenen Verlauf. Auch die Wirtschaftlichkeit dieses Systems schneidet sehr gut ab. Die jährlichen Betriebskosten der Anlage sind rund 35% günstiger als bei einer herkömmlichen Anlage (Heizkessel und Kältemaschine).

Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG): Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden [27]: Das Gefängnis wird mit einer zweistufigen Wärmepumpe monovalent durch 114 Energiepfähle und 6 Erdwärmesonden mit Heiz- und Kühlenergie versorgt. Die durchschnittliche Energiepfahllänge liegt bei 22 m, während die 6 Erdwärmesonden Längen von je 150 m aufweisen. Bei den Energiepfählen handelt es sich um Hohlpfähle vom Typ Sacac. Die Energiepfähle sind im Gegensatz zu den Erdwärmesonden das ganze Jahr über in Betrieb. Sie liefern im Sommer zusätzlich Energie zur Kühlung und zur Brauchwarmwasser-Erwärmung. Die Funktionstüchtigkeit und Zuverlässigkeit der neuartigen geothermischen Kombianlage, bestehend aus EWS plus Energiepfählen, konnte klar nachgewiesen werden.

Grundwasser- Wärmepumpe mit Rückgabe-Turbinierung [28]: Bei diesem Pilotprojekt eines tief liegenden Aquifers wird erstmals das, nach der Wärmepumpe abgekühlte Grundwasser im Rückgabebrunnen dazu benutzt, einen Teil des elektrischen Pumpenstroms mithilfe einer kleinen Rohrturbine zurück zu gewinnen. Die Unterwasserpumpe befindet sich in einer Tiefe von 55 m bzw. die Turbine in 45 m. Mit der Turbine können ca. 15 % des für die Unterwasserförderpumpe benötigten Stroms zurück gewonnen werden.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

FORSCHUNG

Nachdem die Finanzierung der ersten geothermischen Tiefbohrungen des Deep Heat Mining Projektes in Basel gesichert werden konnte, wird anfangs 2006 mit den geplanten Bohrarbeiten am Standort IWB Werkhof Kleinhüningen begonnen werden. Nebst diesem Projekt in Basel werden auch in Genf-unter finanzieller Beteiligung von Kanton und Stadt-die Projektierungsarbeiten für ein HDR-Kraftwerk weitergeführt. Die Realisierung eines geothermischen Kraftwerks in der Schweiz (mit Strom- und Wärmeproduktion) bleibt somit eines der wichtigsten Ziele bis 2010. Mehrere unterstützende, nationale und internationale Forschungsprojekte sollen des Weiteren 2006 fortgesetzt werden.

Die Forschungsziele 2005 in der untiefen Geothermie konnten voll erreicht werden. Damit die Anwendung der Geothermie einen festen Platz im Markt findet, werden für alle Nutzungstechnologien Qualitätssicherungs-Instrumente bzw. benutzerfreundliche Manuels und Computeranwendungen entwickelt. Diese müssen weiter verfeinert, überprüft und bei den massgebenden Stellen eingeführt werden.

P+D-PROJEKTE

Aufgrund steigender Sommertemperaturen findet die Gebäudekühlung mittels Sondenfeldern oder Energiepfählen (*Geo-* oder *Free-cooling*) eine stark steigende Popularität. Die Wirtschaftlichkeit von derartigen Anlagen ist dadurch nachgewiesen, dass diese sehr häufig mittels *Heat-Contracting* erstellt und betrieben werden (durch Stromproduzenten, wie z.B die EWZ, EKZ, BKW). Besonders erfreulich auch die Ausstrahlung von Know-how in das nahe und auch ferne Ausland, was bereits zu etlichen Aufträgen an Schweizer Firmen und Universitätsinstituten geführt hat.

Das überaus erfolgreiche Konzept der vergangenen Jahre, in verschiedenen Regionen der Schweiz den Bau und einwandfreien Betrieb von geothermischen P+D-Vorzeigeanlagen als kantonale oder regionale Kristallisationspunkte vorzuführen mit dem Ziel, eine Multiplikation solcher Anlagen zu erreichen, muss leider aufgrund politischer Entscheide zukünftig sehr stark reduziert werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter den angegebenen Projektnummern in Klammern)

[1] R. Wyss, (wyss@rwgeo.ch), DR. ROLAND WYSS GMBH, *Frauenfeld:* **Taskforce Dachorganisation Geothermie Schweiz: Erarbeitung von Empfehlungen und Vorschlägen zuhanden des BFE** (JB)

[2] J. Wellstein, (wellstein.basel@bluewin.ch), J. WELLSTEIN, *Basel*: **Überarbeitung Broschüre „Geothermie – praktische Nutzung der Erdwärme“ in deutsch und französisch** (JB)

[3] B. Lachal, (bernard.lachal@cuepe.unige.ch), UNIVERSITÉ DE GENÈVE - CUEPE, *Genève:* ***Rafraîchissement par géo-cooling. Bases pour un manuel de dimensionnement*** (SB 151’045)

[4] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEEE – SUPSI, *Canobbio*: ***Manuel pour le refroidissement de bâtiments par «géo- cooling» sur sondes géothermiques verticales: critères d’intégration, potentiel de refroidissement et règles simplifiées de dimensionnement*** (JB)

[5] D. Pahud, (daniel.pahud@dct.supsi.ch), LEEE – SUPSI, *Canobbio*: ***Etude du potentiel d’utilisation du «géo- cooling» d’une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie® à Chiasso*** (JB)

[6] L. Lalui, (lyesse.laloui@epfl.ch), EPFI – ENAC, *Lausanne:* ***Mini- module de chauffage pour tests de réponse thermique des terrains*** (SB 151’393)

[7] J. Poppei, *(*POJ@colenco.ch***),*** COLENCO POWER ENGINEERING AG, *Baden:* ***Groundwater Energy Designer (GED). Computergestütztes Auslegungstool zur Wärme- und Kältenutzung von Grundwasser*** (SB 151’331)

[8] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, *Aarau:* ***Erstellung von Richtlinien für Grundwasser- Wärme- und Kältenutzungsanlagen*** (JB)

[9] S. Bassetti, *(*bassetti@geowatt.ch*),* GEOWATT AG, *Zürich:* ***Handbuch Erdwärmekörbe (Auslegung, Anwendungsbeispiele, Dokumentation)*** (SB 151’362)

[10] U. Schärli, *(ueli.schaerli@geophysik.ch)****,*** DR. U. SCHÄRLI GEOLOGIE + GEOPHYSIK, *Zürich:* ***Thermische Leitfähigkeit: Eichung von in situ Messungen (d.h. „kabellose Temperatursonde“) mit Laborbestimmungen als Grundlage für die geothermische Kartierung des Kantons ZH bzw. der umliegenden Kantone*** (JB)

[11] J. Wilhelm, (jules.wilhelm@bluewin.ch), INGENIEUR-CONSEIL, *Pully:* ***Concept de drainage des tunnels en vue d’une optimisation de l’utilisation géothermique*** (JB)

[12] ***G. Bianchetti,*** (bianchetti@alpgeo.ch)***,*** ALPGEO SARL, *Sierre*: ***Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône (phase A)*** (SB 151’698)

[13] A. Huber, (huber@igjzh.com), HUBER ENERGIETECHNIK AG, *Zürich:* ***Erdwärmesonden für Direktheizung. Phase 1: Modellbildung und Simulation*** (SB 151'162)

[14] W. Leu (werner.leu@geoform.ch), GEOFORM AG, *Minusio*: ***Update „SwEWS" Software zur Auslegung von Erdwärmesonden- Anlagen*** (JB)

[15] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT DHM, *Genf:* ***Géothermie de grand profondeur (GGP) à Genève – travaux préparatoires du 1er forage d'exploitation*** (JB)

[16] E. Kissling (kissling@tomo.ig.erdw.ethz.ch), SCHWEIZERISCHE GEOPHYSIKALISCHE KOMMISSION (SGPK), *Zürich:* ***Geothermal Resource Atlas of Switzerland, Phase 2005*** (JB)

[17] R. Minder, (rudolf.minder@bluewin.ch), MINDER ENERGY CONSULTING, *Oberlunkhofen:* ***Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie, Vorstudie und Arbeitsprogramm*** (SB 151'144)

[18] R. Minder, (rudolf.minder@bluewin.ch), MINDER ENERGY CONSULTING, *Oberlunkhofen:* ***Energieumwandlungsprozesse für die Nutzung geothermischer Energie, Hauptstudie*** (JB)

[19] ***M. Häring,*** (*haring@geothermal.ch*), GEOPOWER AG, *Pratteln:* ***Wissenschaftlicher Beirat für Deep Heat Mining in Basel*** (JB)

[20] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), ARBEITSGEMEINSCHAFT GIA, *Zürich:* ***Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA (Annex III, Hot Dry Rock, Subtask C, Fortsetzung 2005)*** (SB 240078)

[21] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), DEEP HEAT MINING ASSOCIATION, *Steinmaur*: ***FP6 Strep EGS Pilot Plant. European Geothermal Project for the Construction of a Scientific Pilot Plant based on enhanced Geothermal System, Soultz- sous- Forêts, Alsace, France*** (JB)

Liste der P+D-Projekte

[22] B. Sigg, (info@doldergrand.ch), DOLDER GRAND HOTEL, *Zürich:* ***Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich*** (JB)

[23] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, *Aarau:* ***EWS- Sondenanlage Überbauung „Bahnhof Süd" in Aarau*** (SB 84'168)

[24] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, *Zürich:* ***Demonstrationsprojekt zur Energieeffizienz einer grossen Wohnüberbauung („Unteres Hompeli", SG) im Minergie- Standard*** (SB 82'847)

[25] M. Hubbuch, (m.hubbuch@hswzfh.ch), FH Wädenswil, *Wädenswil:* ***Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen*** (JB)

[26] M. Morath, (morath.marcel@lippuner-emt.com), ING. BÜRO LIPPUNER AG, *Grabs:* ***Messungen Energiepfahlanlage Dividella AG*** (SB 87'014)

[27] Ch. Kapp, (ch.kapp@nek.ch), NEK UMWELTTECHNIK AG, *Zürich:* ***Regionalgefängnis Rheintal, Altstätten (SG):Beheizung und Klimatisierung mittels Energiepfählen, gekoppelt mit Erdwärmesonden*** (SB 79'508)

[28] M. Eberhard, (service@eberhard-partner.ch), EBERHARD UND PARTNER AG, *Aarau:* ***Grundwasser- Wärmepumpe mit Rückgabe- Turbinierung*** (JB)

Referenzen

[29] ***Nutzung der Erdwärme mit Gründungspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen. Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb – Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance***, Autorenkollektiv, SIA Dokumentation D 0190, 2005

[30] ***2005 Country Update for Switzerland***, Rybach L. and Gorhan H.L., Proc. World Geothermal Congress 2005, *Antalya*, Turkey

[31] ***A New, Small, Wireless Instrument to Determine Ground Thermal Conductivity In-Situ for Borehole Heat Exchanger Design***, Rohner E., Rybach L. and Schaerli U, Proc. World Geothermal Congress 2005, *Antalya*, Turkey

[32] ***Downhole Pressure Derived from Wellhead Measurements during Hydraulic Experiments***, Mégel T., Kohl T., Gérard A., Rybach L. and Hopkirk R, Proc. World Geothermal Congress 2005, *Antalya*, Turkey

[33] ***Determining the Impact of Massive Hydraulic Stimulation on Local Microseismicity***, Kohl T., Mégel T., Baria R., Hopkirk R. and Rybach L, Proc. World Geothermal Congress 2005, *Antalya*, Turkey

[34] ***Sustainability of Production from Borehole Heat Exchanger Fields***, Signorelli S., Kohl T. and Rybach L., Proc. World Geothermal Congress 2005, *Antalya*, Turkey

[35] ***Environmental Aspects of Geothermal Development and Utilization, and Related Legal, Institutional and Social Implications***, Rybach L., Proc. World Geothermal Congress 2005, Pre and Post Congress Short Courses *Antalya*, Turkey

[36] ***Utilization on Renewable Energy on a Global Scale – Achievements and Prospects***, Rybach L., Proc. Shenzhen International Workshop on Renewable Energy Technology and Investment, *Shenzhen*, China, 2005

[37] ***GEOTHERMIE in der Schweiz***, Gorhan H.L. and Kohl T., Geothermische Energie- Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung/GtV, 12. Jahrgang/Heft 1/4, 2005

[38] ***Das Wärmetauscher-Pfahl-System (Energiepfahlsystem) für das Dock Midfild am Flughafen Zürich***, Pahud D, Geothermische Energie- Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung/GtV, 12. Jahrgang/Heft 1/4, 2005

[39] ***Energiepfahlanlage mit Wärme- und Kältenutzung***, Morath M, Geothermische Energie- Mitteilungsblatt der Geothermischen Vereinigung/GtV, 12. Jahrgang/Heft 1/4, 2005

[40] ***Worldwide Direct-Uses of Geothermal Energy 2005***, Lund J.W., et al., Geothermics 34, p. 691-727 (2005)

PROGRAMM WIND

Robert Horbaty
Robert.horbaty@enco-ag.ch

900 kW Windkraftanlage im Entlebuch

Nach sieben Jahren Planungszeit hat der Entlebucher „Energiewirt“ Roland Aregger im Herbst 2005 eine grössere Windkraftanlage installiert. Die Betriebserfahrungen mit dieser Anlage, gerade auch im kalten Klima, dürften wichtige Beiträge zu Forschungsprojekten der Internationalen Energieagentur IEA zeitigen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Schwerpunkte des ***Energieforschungsprogramms Windenergie 2004 - 2007*** [13] sind:

- Erhöhung der Akzeptanz der Windenergienutzung
- Entwicklung von innovativen Komponenten

Um die Umsetzung zu verbessern sind zudem folgende Aktivitäten geplant:

- Aufbau Kompetenzzentrum Windenergienutzung im Gebirge
- Entwicklung von spezifischen Konzepten, z.B. für dezentrale Stromproduktion in Randregionen

Erklärtermassen besitzen die P+D-Projekte bei den Massnahmen zur Zielerreichung des Forschungsprogramms Wind einen hohen Stellenwert. Im Berichtsjahr standen jedoch für diesen Bereich nur noch geringe Mittel zur Verfügung. Die Aktivitäten des Programms konzentrieren sich daher vermehrt auf eigentliche F+E-Projekte.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

ERHÖHUNG DER AKZEPTANZ DER WINDENERGIENUTZUNG

Mit dem Projekt ***Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz*** [1] soll die Planung, Projektierung, Bewilligung und Realisierung von Windkraftanlagen in der Schweiz unter Nutzung der bisherigen Erfahrungen vereinfacht und beschleunigt werden. Das Ergebnis wird Ende 2006 vorliegen.

Basis des Projekts ist das von den Bundesämtern BFE, BAFU und ARE erarbeitete *Konzept Windenergie Schweiz* [14]. Es enthält Grundlagen und nennt Grundsätze und Kriterien für die Wahl von Standorten für Windparks und hat im Konsens zwischen den Interessenvertretern (Bund, Kantone, Energiewirtschaft, Umweltverbände) potenzielle Windkraft-Standorte identifiziert.

Eine hohe Integration von unregelmässig anfallender Energie aus erneuerbaren Quellen im Stromnetz, wie z.B. Wind, benötigt zusätzliche Regelenergie. Im Rahmen des Projekts *Windenergie und schweizerischer Wasserkraftpark* [15] wurden die Chancen unserer Wasserkraft, für Stromnetze mit einem hohen Anteil an Windenergie Regelenergie zu liefern, fundiert analysiert. Die Resultate dieser Untersuchung erlauben der Schweiz am ***Wind/Hydro*** [2] teilzunehmen. Folgende Aspekte sollen in das IEA-Vorhaben einfliessen:

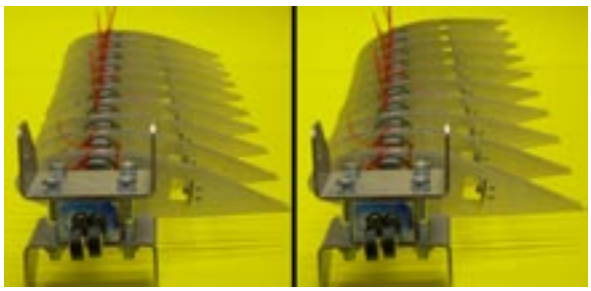
- Integration eines hohen Anteils von Windenergie in das Versorgungsgebiet eines kleineren Elektrizitätswerkes mit werkseigenen Wasserkraftwerken.
- Einbezug von Marktdaten bzw. des European Energy Exchange und den Windprognosen für einen optimierten Betrieb von Windkraftanlagen und Hydro-Speicherkraftwerken.
- Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsstudie für den Ausbau bestehender Hydro-Speicherkraftwerke zu einem Pumpspeicherkraftwerk

Um die Beteiligung an diesem Projekt, welches zu einer höheren Akzeptanz der Windenergie in unserem Land beitragen kann, auch den Betreibern von grossen Wasserkraftwerken näher zu bringen, organisierte das Programm *Wind* das ***IEA-Wind/Hydro-Meeting in Luzern*** [3] mit einem breitem Erfahrungsaustausch.

Hauptwiderstand zur vermehrten Nutzung der Windenergie in der Schweiz ist nach wie vor der Landschaftsschutz. Anlässlich eines internationalen ***Research Workshops on Public Acceptance of Wind Energy in Switzerland*** [4] welcher im Februar 2006 stattfindet, sollen konkrete Ansätze, wie die Akzeptanz gesteigert werden kann, umfassend erörtert werden.

ENTWICKLUNG VON INNOVATIVEN KOMPONENTEN

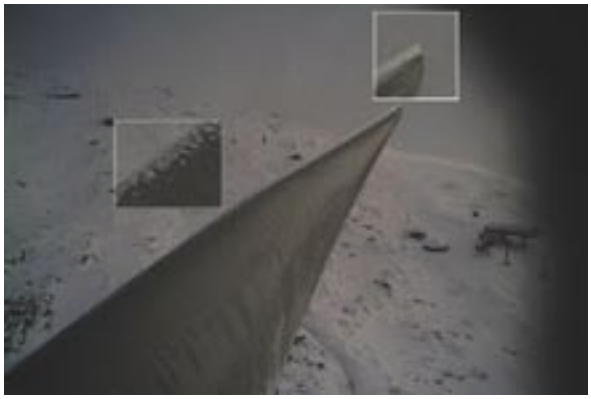
Im Projekt ***Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-Verstellung*** [5] soll ein Funktionsprototyp eines *intelligenten Rotorblattes* an einer Modellturbine demonstriert werden. Das Konzept will durch einen neuartigen Aufbau des Rotorblattes sowohl Blatt-Pitch (Anstellwinkel) als auch Blatt-Twist (Blattverwindung) zyklisch veränderbar machen. Damit kann das Blatt auf Windprofile auf die zum Teil erheblichen Unterschiede der Windgeschwindigkeit am oberen und unteren Punkt der vom Rotor überstrichenen Fläche adaptiert werden. Zum einen verspricht das Verbesserung der Energieerträge, zum anderen Verminderung der auf die ganze Windkraftanlage einwirkenden Wechsellasten. Statt alle weiteren Komponenten (Getriebe, Maschinenträger, Turm) hinter dem Rotor durch entsprechenden hohen Materialeinsatz widerstandsfähig gegen hohe Wechsellasten zu machen, sollen diese Wechsellasten bereits *am Entstehungsort* reduziert werden. Figur (1) zeigt den strukturellen Aufbau des Blattes, das noch mit einer speziell entwickelten, etwas elastischen Hülle verkleidet wird. Gut erkennbar sind die unterschiedlichen Verwindungen auf den beiden Bildern der Abbildung. Die Verstellung von Pitch und Twist erfolgt über Schubstangen, deren Ankoppelelemente erkennbar sind.



Figur 1: *Funktionsmodell eines „intelligenten Rotorblattes“, welches den unterschiedlichen Windverhältnissen während einer Rotorumdrehung Rechnung trägt.*

AUFBAU KOMPETENZZENTRUM WINDENERGIENUTZUNG IM GEBIRGE

Innerhalb des Projektes ***Alpine Test Site Gütsch***, [6] welches im Rahmen der *COST Aktion 727* von *Meteo-Schweiz* und *Meteotest* durchgeführt wird, werden in den Wintern 2005/6, 2006/7 und 2007/8 auf dem Gütsch Vereisungsphänomene untersucht. Folgende Arbeiten wurden 2005 durchgeführt:



Figur 2: *Webcam-Aufnahme der leichten Vereisung am drehenden Rotorblatt*

- Die für das Monitoring des Eiswurfs der Windkraftanlagen benötigten Geräte wurden evaluiert und angeschafft. Erste Eiswurferfassungen wurden aufgenommen.
- Die Betriebsdaten (inkl. Temperaturdaten) der Windkraftanlage werden als 10-Minuten-Mittelwerte aufgezeichnet.
- Auf der Gondel der Windkraftanlage wurde eine Webcam installiert. Der Durchgang des Flügels löst via Bewegungsmelder eine Aufnahme aus.
- Am 6. Dezember 2005 konnte ein erstes Vereisungsereignis aufgezeichnet werden. (siehe Fig. 2) Die Windkraftanlage, obwohl ausgerüstet als *Kaltes Klima-Modell*, - konnte diesen Eisansatz nicht detektieren und produzierte weniger Energie als gemäss der Windgeschwindigkeit möglich gewesen wäre. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer Optimierung der Betriebsstrategie bei vereisenden Bedingungen.

Am 1. Dezember 2005 erschien in der Sendung *Menschen Technik Wissenschaft*› des Schweizer Fernsehens ein Betrag über das Forschungsprojekt ***Alpine Test Site Gütsch*** [17]. Des Weiteren wurde eine Projekt-Homepage aufgeschaltet: www.meteotest.ch/cost727/index.html.

Um bereits vorhandene Erfahrungen optimal nutzen zu können, werden weitere Projekte zur Nutzung der Windenergie im Gebirge in internationaler Zusammenarbeit durchgeführt. Im Rahmen der IEA ist das Projekt ***Wind Energy in Cold Climates*** [10] und im Rahmen der EU das Interreg-Projekt ***Alpine Wind Harvest*** [7] zu nennen (siehe auch Kapitel internationale Zusammenarbeit).

ENTWICKLUNG VON SPEZIFISCHEN KONZEPTEN

Die Standorte für Windkraftanlagen werden im Norden Deutschlands und anderen europäischen Ländern immer knapper. Das führt dazu, dass in zunehmendem Masse ältere Windkraftanlagen abgebaut und durch neuere grössere ersetzt werden. Die abgebauten Anlagen sind dabei normalerweise weniger als 10 Jahre alt, ihre Restlaufzeit beträgt somit nochmals rund 10 Jahre. Die abgebauten Windkraftanlagen werden als Occasionsanlagen angeboten. Im Rahmen des Kleinprojektes ***Retrofit-Konzept für ältere Windkraftanlagen*** [9] wurde abgeklärt ob das bei Aventa-Anlagen eingesetzte *Leichtwindkonzept* den Wirkungsgrad dieser Anlagen für windschwache Standorte ggf. erhöhen könnte (u.a. mit Blattverstellmechanismus und Regelelektronik, Wechselrichter für drehzahlvariablen Betrieb der kleinen Generatorstufe, ev. Vollumrichtung). Es zeigt sich, dass der Umsetzung einige gewichtige Hürden im Weg stehen:

- Die Hersteller sind nicht bereit, die notwendigen Unterlagen zur Verfügung zu stellen.
- In der Leistungsklasse bis 250 kW wurden noch kaum grössere Windparks gebaut. Der Occasionsmarkt besteht aus vielen Einzelanlagen von vielen verschiedenen Herstellern. Der Aufwand für eine Zertifizierung wird dadurch sehr hoch. Zertifizierungen werden jedoch in den interessanten Märkten (u.a. Indien und China) gefordert.
- Die Garantien der Versicherung sind bei Änderungen an der Anlage nicht mehr gewährleistet.
- Aufgrund dieser sehr unsicheren Ausgangslage wird Idee fallen gelassen.

Nationale Zusammenarbeit

Folgende Forschungsinstitutionen haben Aktivitäten im Bereich der Windenergie:

- Die EPFL (Institut LASEN) [18] betreut Windenergie-Projekte, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Entwicklungszusammenarbeit.
- An der Fachhochschule Wallis [19] bearbeitet ein Team Projekte zur Nutzung der Windenergie und betriebt auch die Windkraftanlage auf dem Simplon.

Trotz intensiver Recherche konnte an der ETH Zürich keine Stelle gefunden werden, welche sich mit Windenergieforschung befasst. Im Zusammenhang mit weiteren gemeinsamen Aktivitäten von *Suisse Eole* und dem *Energiecluster* soll noch einmal gezielt Kontakt mit möglichen Professuren aufgenommen werden.

Im Rahmen des Projektes ***Aufbau eines Kompetentzentrums Windenergie*** [8] wurde eine Strategie der Entwicklung der Windenergie in der Schweiz für die nächsten 5 Jahre entwickelt. ***Suisse Eole, die Schweizerische Vereinigung zur Nutzung der Windenergie*** [21], wird als die Organisation positioniert, welche die höchste Kompetenz zu Fragen der Windenergienutzung in der Schweiz besitzt. Windenergie ist heute als wichtiger Mosaikstein einer nachhaltigen Energieversorgung positioniert. Noch relativ zurückhaltend ist die Partizipation der grossen Elektrizitätsunternehmen an den Forschungsaktivitäten des Programms. Ihre zahlreiche Beteiligung am Erfahrungsaustausch zum Thema *Windenergie und Wasserkraft* am 30.9.05 in Luzern macht aber deutlich, dass die grossen Chancen der Windenergie auch von wichtigen Playern der Branche erkannt werden.

Zur Verbreitung der Resultate des Projektes ***Sicherheit von Windkraftanlagen in der Schweiz - Richtlinien und Standards*** [22], fand in Luzern eine Veranstaltungen statt (ca. 50 TeilnehmerInnen).

Internationale Zusammenarbeit

Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz am *IEA-Projekt* ***Wind Energy in Cold Climates (WECO)*** [10]. Ein Treffen der Experten fand im August 2005 in Bubendorf statt. Als Projektergebnis wurde 2005 ein weiterer Bericht mit Empfehlungen veröffentlicht [23].

Die Schweiz beteiligt sich auch am neuen IEA-Projekt ***Integration of Wind and Hydropower Systems*** [2]. Ein erstes Treffen fand anlässlich des Executive Committee-Meetings des Agreements in Luzern statt [3]).

Alpine Wind Harvest [7] ist ein Projekt im Rahmen des *EU INTERREG III B Alpine Space Program* mit dem Ziel: *Development of an Information Base Regarding Potentials and the Necessary Technical, Legal and Socio-Economic Conditions for Expanding Wind Energy in the Alpine Space*. Die Projektpartner stammen aus Österreich, Slowenien, Italien Frankreich und der Schweiz. Projektträger in der Schweiz ist *Suisse Eole*. Der Schlussbericht wurde im Jahre 2005 veröffentlicht.

Figur 3: *Alpine Test Site Gütsch, mit einer 600 kW-Windkraftanlage sowie einer Anlage zum Testen von diversen Messinstrumenten unter kalten und vereisenden Bedingungen.*

Die Arbeiten beim ***Alpine Test Site Gütsch***, [6] (Figur 3) basiert auf den Arbeiten des IEA Wind Annex XIX *Wind Energy in Cold Climates*. Dessen Resultate und Empfehlungen werden nun im Rahmen des Forschungsvorhabens COST 727 *Alpine Test Site Gütsch, Meteorological measurements and wind turbine performance analysis* verifiziert und einem weiteren Umfeld nutzbar gemacht.

Anlässlich der *BOREAS Windenergiekonferenz in Sarisälkä*, Finnland, vom März 2005 wurden aus der Schweiz folgende Papers präsentiert:

- ***Wind Energy in Cold Climates – the Swiss Experience***
  Robert Horbaty, Programmleiter Windenergie
- ***The Onset of heterogeneous Ice Nucleation and Growth: Fundamental Investigations guiding the Search for Solutions***
  Christophe Delval and Michel J. Rossi, Laboratoire de Pollution Atmosphérique et Sol (LPAS), EPFL
- ***Measurements under harsh conditions: Synergies between international organizations and future activities***
  Alain Heimo, Federal Office for Meteorology and Climatology, MeteoSwiss

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Grundlage für jede Windkraftnutzung ist eine fundierte Standortabklärung. Dabei müssen teils sehr aufwändige raumplanerische und windtechnische Abklärungen durchgeführt werden. Das Forschungsprogramm Wind konnte mit den Mitteln für P+D-Anlagen wichtige Vorarbeiten mitfinanzieren, welche zu den heutigen Vorzeigeprojekten der Windenergienutzung in der Schweiz geführt haben (u.a. Gütsch, Entlebuch, etc.).

Am Standort *Peu Girard* (Koordinaten 565.900/229.300) wurden gute Bedingungen für den Bau einer Windkraftanlage angetroffen. Daher wurde dieser Standort nun mit dem Projekt ***Standortabklärungen Windkraftanlagen Peu Girard, Les Breuleux (JU)*** [11] genauer untersucht. Ziel ist es, ein Bauprojekt für mindestens eine Windturbine der Grössenklasse 1000 kW mit einer Turmhöhe von min. 70 m (s. Fig. 4) auszuarbeiten, welches alle raumplanerischen, ökologischen und anderen Auflagen erfüllt damit schlussendlich eine Baubewilligung erteilt werden kann. Zu den seit 2003 andauernden Abklärungen gehörten Windmessungen auf 30 m Höhe und ein detailliertes Standortgutachten aufgrund der bewilligungsrechtlichen Vorabklärung. Diese Arbeiten wurden 2005 abgeschlossen, ein detaillierter Schlussbericht wird im Mai 2006 vorliegen.

In den Jahren 1998/99 und 2000/01 unterstützte das Forschungsprogramm Wind, als P+D- Projekt, die Standortabklärungen zur Anlage Feldmoos / Entlebuch. Nach nun mehr als sieben jähriger Planungszeit konnte der Landwort Roland Aregger im Herbst 2005 eine 900 kW-Anlage installieren (siehe Titelblatt), mit entsprechender Medienpräsenz [16].

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Auch im Jahre 2005 hat sich die installierte Leistung der Windkraftanlagen in der Schweiz erhöht. Aufgrund des Zubaus einer 900 kW-Anlage im Entlebuch und einer 2 MW-Anlage in Collonges im Kanton Wallis sind zum heutigen Zeitpunkt 31 Windkraftanlagen mit einer Leistung von **11.57 MW** installiert. Es wird geschätzt, dass dies im Jahre **2005 rund 10'000 MWh** Elektrizität erzeugten.

Leider verzögert sich der Bau von Windparks im Jura aufgrund der Fundamental-Opposition der Stiftung für Landschaftsschutz weiterhin, das Projekt auf dem *Crêt Meuron* liegt mittlerweile beim Bundesgericht zur Beurteilung.

Die Auswirkungen von Windkraftanlagen auf Flora und Fauna, sowie deren Wahrnehmung bei der Bevölkerung und bei Touristen sind immer wieder Bestandteil intensiver Debatten. Zu Erhöhung der Akzeptanz wird gegenwärtig untersucht, wie sich Windkraftanlagen in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit auswirken:

- Gesellschaft (Landschaftsschutz, Akzeptanz)
- Ökologie, (Flora, Fauna)
- Wirtschaft (Tourismus, Energieproduktion, zusätzliche Wertschöpfungen/Wertverminderungen) Nebst einer Verbilligung der Planungs- und Projektierungsarbeiten erhofft man sich daraus auch eine Versachlichung der Diskussion zum Bau von Windkraftanlagen.

Mit den verschiedenen Anlässen zur Windenergieforschung rund um das IEA-Meeting in Luzern gelang es, den Stellenwert der Windenergienutzung in der Schweiz deutlich zu erhöhen, und auch bei den Betreibern von Grosswasserkraftwerken wahrgenommen zu werden.

Auf internationaler Ebene sind die Aktivitäten im Zusammenhang mit der Teststation auf dem Gütsch zur fundierten Ermittlung der Auswirkungen der Vereisung im Rahmen der *COST Action 27* besonders zu erwähnen. Die Schweiz kann hier wichtige Erkenntnisse zu den Forschungsaktivitäten rund um die Vereisung von Strukturen erbringen, insbesondere an Windkraftanlagen.

Ein Schwerpunkt der zukünftigen Aktivitäten wird – nebst dem Entwickeln von Nischenprodukten für den internationalen Markt – weiterhin auf den Fragen zur Akzeptanz der Windenergie liegen. Hier kann die Schweiz als relativ dicht besiedelte Land eine wichtige Rolle übernehmen. Dazu wird in Tramlan im Februar 2006 ein internationaler Workshop stattfinden, um entsprechende Fragestellungen fundiert zu diskutieren. Entsprechende Resultate sollen in das zu erarbeitende Windenergieforschungskonzept 2008 –2011 einfliessen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch)
Unter den angegebenen Internet-Adressen sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] Walter Ott, Yvonne Kaufmann, (walter.ott@econcept.ch), http://www.econcept.ch/ ECONCEPT AG, *Zürich:* ***Auswirkung von Windkraftanlagen in der Schweiz*** (JB)

[2] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), http://www.ieawind.org/ NREL: ***Teilnahme IEA Wind Annex XXIV Wind/Hydro*** (JB).

[3] Robert Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch) ENCO AG, www.enco-ag.ch *Bubendorf:* ***IEA-Wind/Hydro Annex XXIV-Meeting in Luzern***

[4] Dr. Rolf Wüstenhagen (rolf.wuestenhagen@unisg.ch), http://www.iwoe.unisg.ch/org/iwo/web.nsf/ Institute for Economy and the Environment (IWÖ-HSG) University of *St. Gallen:* **Research Workshops on Public Acceptance of Wind Energy in Switzerland** (JB)

[5] Ferdinand Lutz (ferdinand.lutz@blatec.ch, http://www.blatec.ch) Blatec *Sarnen:* ***Prototyp Windturbinenrotor mit zyklischer Pitch- und Twist-Verstellung*** (JB).

[6] Stefan Kunz, René Cattin (KUNZ@METEOTEST.CH, HTTP://WWW.METEOTEST.CH), METEOTEST, *Bern:* **Alpine Test Site Gütsch** (JB) http://www.meteotest.ch/cost727/index.html

[7] Robert Horbaty (horbaty@suisse-eole.ch, http://www.suisse-eole.ch), SUISSE EOLE, *Bubendorf:* ***Alpine Wind Harvest*** (http://www.sbg.ac.at/pol/windharvest/), (SB)

[8] Robert Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), www.enco-ag.ch, ENCO AG *Bubendorf:* **Aufbau eines Kompetentzentrums Windenergie** (SB)

[9] Ueli Spalinger (aventa@energienetz.ch, http://www.aventa.ch), AVENTA, *Winterthur:* **Retrofit-Konzept für ältere Windkraftanlagen** (SB)

[10] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), http://www.ieawind.org/ NREL IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Annex XIX ***Wind Energy in Cold Climates:*** http://arcticwind.vtt.fi/. (JB)

Liste der P+D-Projekte

[11] Eric Nussbaumer (info@adev.ch, http://www.adev.ch), ADEV, *Liestal*: ***Les Bréleux*** (JB)

Referenzen

[12] ***Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 – 2007***, ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: http://www.bfe.admin.ch/themen/00519/00521/index.html?lang=de.

[13] ***Energieforschungsprogramm Windenergie 2004 –2007***, ausgearbeitet durch R. Horbaty, von der CORE am 1.4.2004 zur Umsetzung freigegeben.

[14] ***Konzept Windenergie Schweiz,*** Grundlagen für die Standortwahl von Windparks, Bundesamt für Energie (BFE), Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Autoren Meteotest, Nateco, Metron Raumentwicklung AG, Atelier North & Robyr Soguel, Bern 2004 www.wind-energie.ch/images/1140/CH/KonzeptWindenergieCH-d.pdf

[15] **Windenergie und Schweizerischer Wasserkraftpark**, Energieforschungsprogramm *Energiewirtschaftliche Grundlagen*, Autoren: Arbeitsgemeinschaft econcept AG, Zürich und ,Institut für Elektrische Anlagen und,Energiewirtschaft (IAEW) RWTH, Aachen (www.energieforschung.ch/energieforschung/suche/index.html?lang=en&publication=8058)

[16] **Lukrativer Nebenerwerb für Bauern,** Reportage Schweizer Fernsehen, Sendung 10vor10 vom 31. Oktober 2005 (http://www2.sfdrs.ch/var/videoplayer.php?videourl=http://real.sri.ch/ramgen/sfdrs/10vor10/2005/10vor10_31102005.rm?start=0:18:53.865&end=0:23:02.643)

[17] ***Die Alpen als Windpark?*** Reportage Schweizer Fernsehen, Sendung Menschen, Technik, Wissenschaft, 1. 12 2005: http://www2.sfdrs.ch/var/videoplayer.php?videourl=http://real.sri.ch/ramgen/sfdrs/mtw/2005/mtw_12012005.rm?start=0:22:39.321&end=0:31:03.779

[18] EPFL, ***Ecole Politechnique Fédéral de Lausanne***, Laboratoire de systèmes énergétiques LASEN: http://lasen.epfl.ch/page39406.html.

[19] S. Lillo, ***Hochschule Wallis, Institut des systèmes industriels***: http://energy.hevs.ch/f/rad/conversion.asp.

[20] **Alpine Test Site Gütsch, Website zu diesem COST 727-Projekt** http://www.meteotest.ch/cost727/index.html

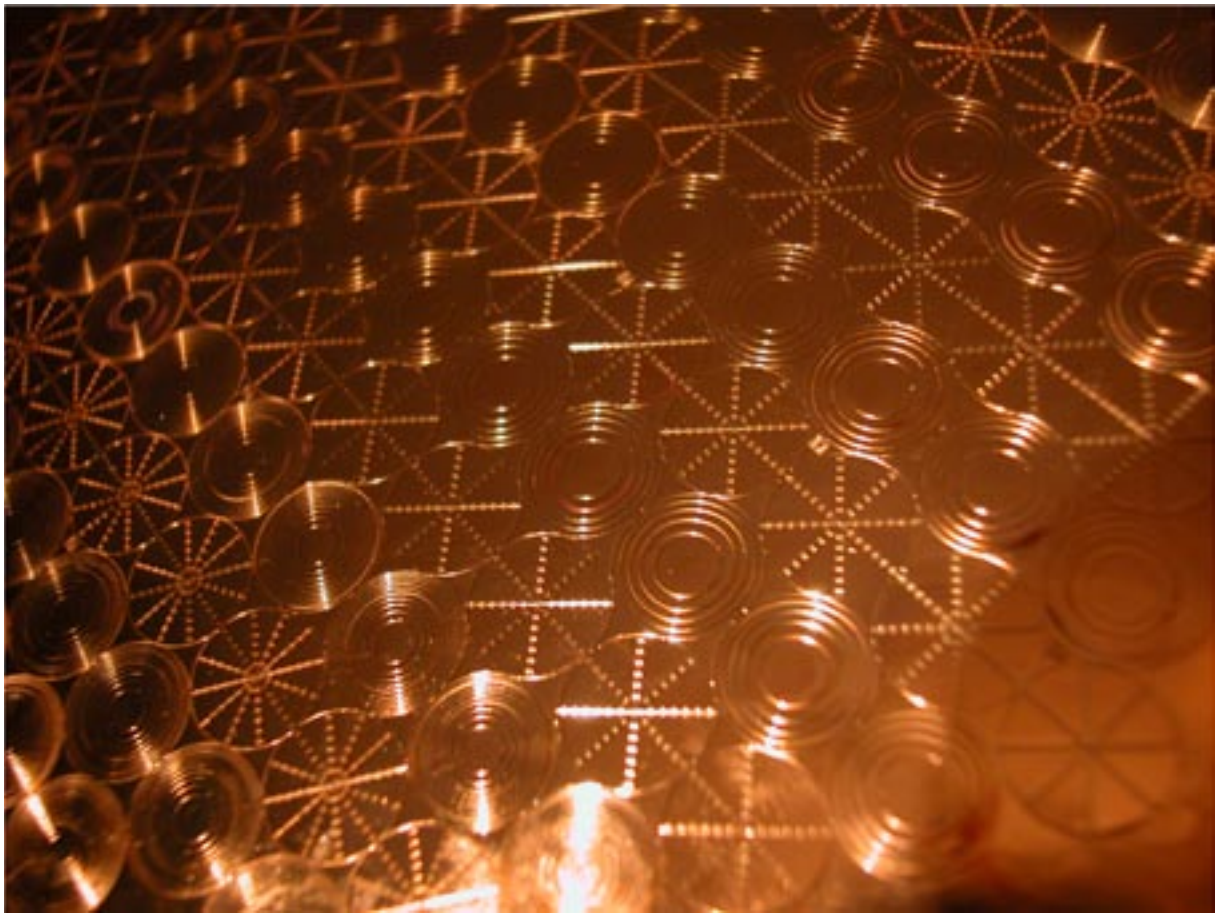
[21] ***Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole***: http://www.suisse-eole.ch.

[22] ***Sicherheitsrichtlinien für Windenergieanlagen in der Schweiz,*** ausgearbeitet durch Suisse Eole, **2005**

[23] ***Wind Energy Projects in Cold Climates***, Zwischenbericht zu Recommendations des Projektes [10] ***Wind Energy in Cold Climates:*** http://arcticwind.vtt.fi/., http://virtual.vtt.fi/virtual/arcticwind/reports/recommendations.pdf

PROGRAMM NUKLEARE SICHERHEIT UND ENTSORGUNG

Konstantin Foskolos
konstantin.foskolos@psi.ch



Aktivierungsfolien für das Projekt LWR-PROTEUS

Aufbau einer Kupferschicht auf einer Maske zur Erzeugung von Folien mit 8 und 12 Sektoren sowie von Folien mit 5, 10 und 20 Ringen (jeweils mit einem äusseren Durchmesser von 8.19 mm); einzelne Folienteile weisen eine geometrische Genauigkeit von 1 µm auf.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Nukleare Energieforschung in der Schweiz findet hauptsächlich im Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) des Paul Scherrer Institutes (PSI) statt, während Ausbildung in der Kerntechnik primär Aufgabe der Eidgenössischen Technischen Hochschulen von Zürich (ETHZ) und Lausanne (EPFL) ist.

Die **strategischen Arbeitsgebiete des NES** umfassen folgende Hauptpunkte:

Beiträge zum sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der existierenden Kernkraftwerke in der Schweiz und zu Sicherheitsnachweisen für die geologische Endlagerung von Abfällen durch Stärkung der wissenschaftlichen Grundlagen in den entsprechenden Gebieten,

Unterstützung der KKW-Betreiber und der Sicherheitsbehörde und Sicherstellung einer Stand-by-Funktion in Schlüsselgebieten, insb. jene, welche ein Hotlabor benötigen,

Bereitstellung von Input für Entscheidungen der *Stakeholders*,

Förderung der Option Kernenergie mittels F&E in Richtung erhöhter Nachhaltigkeit, einschl. Sicherheit und Wirtschaftlichkeit,

Angebot eines breiten Spektrums von Möglichkeiten für die Ausbildung junger Kernfachleute mit Erfahrung auch über andere Energiequellen,

Unterstützung und Nutzen von den weltweiten positiven Signalen zur *Renaissance* der Kernenergie.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

Die Arbeiten sind im Rahmen der NES-Projekte breit gefächert und facettenreich, um die unterschiedlichen Bedürfnisse und Interessen der schweizerischen nuklearen Community entsprechen zu können. Eine detaillierte Berichterstattung darüber würde den Rahmen dieses Bereichtes sprengen. Die untenstehenden Ergebnisse entsprechen daher nur Teilen der jeweiligen Projekte und sind als Beispiele zu verstehen.

SICHERHEIT UND SICHERHEITSBEZOGENE BETRIEBSPROBLEME SCHWEIZERISCHER KERNKRAFTWERKE

STARS (Sicherheitsexpertise und –forschung bezüglich Transientenanalyse der Reaktoren in der Schweiz) [1]: Das Projekt findet in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK statt. Die Analyse des transienten Verhaltens von hoch abgebranntem Brennstoff während Reaktivitäts- und Kühlmittelverlust-Transienten (RIA bzw. LOCA) stellte ein wichtiges Forschungsgebiet für STARS im Berichtsjahr dar. Die zwei Codes FALCON (EPRI) und SCANAIR (IRSN) wurden gegen eine Auswahl von Experimenten aus der CABRI REP Na-Reihe getestet, welche Energiezufuhren zwischen ~100 und 200 cal/g und Impuls-Halbbreiten von ~10 bis 75 ms abdeckten und so dem Bereich der für KKW-Anwendungen erwarteten RIA-Transienten entsprachen. Beide Codes entsprechen dem Stand der Technik und können das transiente Brennstoffverhalten während RIA-Transienten simulieren. SCANAIR umfasst zusätzliche Modelle um den Einfluss der spaltgasinduzierten transienten Schwellung darzustellen, welcher im FALCON nicht modelliert wird. Die Analyse dieser Experimente zeigte klar, dass beide Codes sehr ähnliche Resultate liefern, solange die injizierte Energie um 100 cal/g bleibt. Die berechneten Resultate gaben zudem die gemessenen Daten gut wieder, einschliesslich der gemessenen Hüllrohr-Dehnung nach den Experimenten.

Um die in der Brennstoff-Szene für lange Zeit diskutierte Frage zu beantworten, ob die gasinduzierte transiente Schwellung für die Evaluation von RIA-Szenarien wichtig ist, wurde eine systematische Analyse durchgeführt. Diese zeigte (s. Fig. 1), dass die gasinduzierte transiente Schwellung nur bei sehr hohen Energiezufuhr-Raten (150 cal/g) wichtig ist, welche für KKW-Anwendungen nicht erwartet werden.

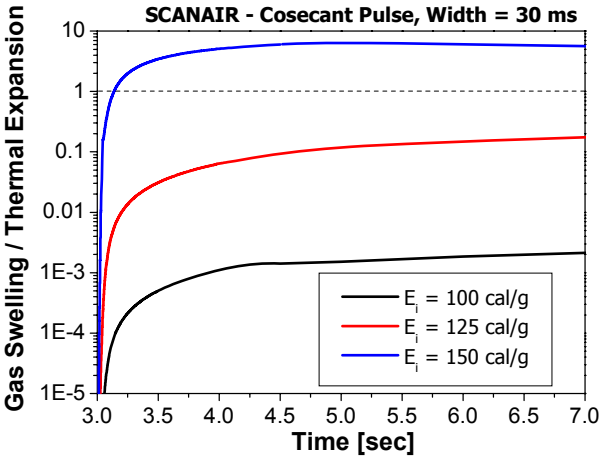


Fig.1: *Die gasinduzierte transiente Schwellung ist nur bei sehr hohen Energiezufuhr-Raten (150 cal/g – blaue Kurve) wichtig*

Human Reliability Analysis (HRA) [2]: Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit Unterstützung der HSK durchgeführt. Eine dem Stand der Technik entsprechende PSA beinhaltet die Modellierung von Systemfunktionen und Operateurhandlungen, die nach Störungen angefordert

werden. Demzufolge dienen die meisten HRA-Methoden der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für die nicht rechtzeitige Durchführung einer angeforderten Handlung. In letzter Zeit besteht auch ein zunehmendes Interesse an der Modellierung von Durchführungen ungeeigneter Handlungen, die ebenfalls zur Entstehung von Unfällen beitragen können wie aufgetretene Vorfälle und Unfälle belegen. Ein Fehler dieser Art wird im internationalen Sprachgebrauch als Error of Commission (EOC) bezeichnet. Es fehlen jedoch geeignete Methoden für die nachvollziehbare Quantifizierung. Somit ist man bei der Ermittlung von EOC-Wahrscheinlichkeiten besonders stark auf Expertenschätzungen angewiesen. Ein wichtiger Grund für dieses methodische Defizit liegt darin, dass häufig nichttriviale Entscheidungsprozesse an der Fehlerentstehung beteiligt sind. Solche Prozesse

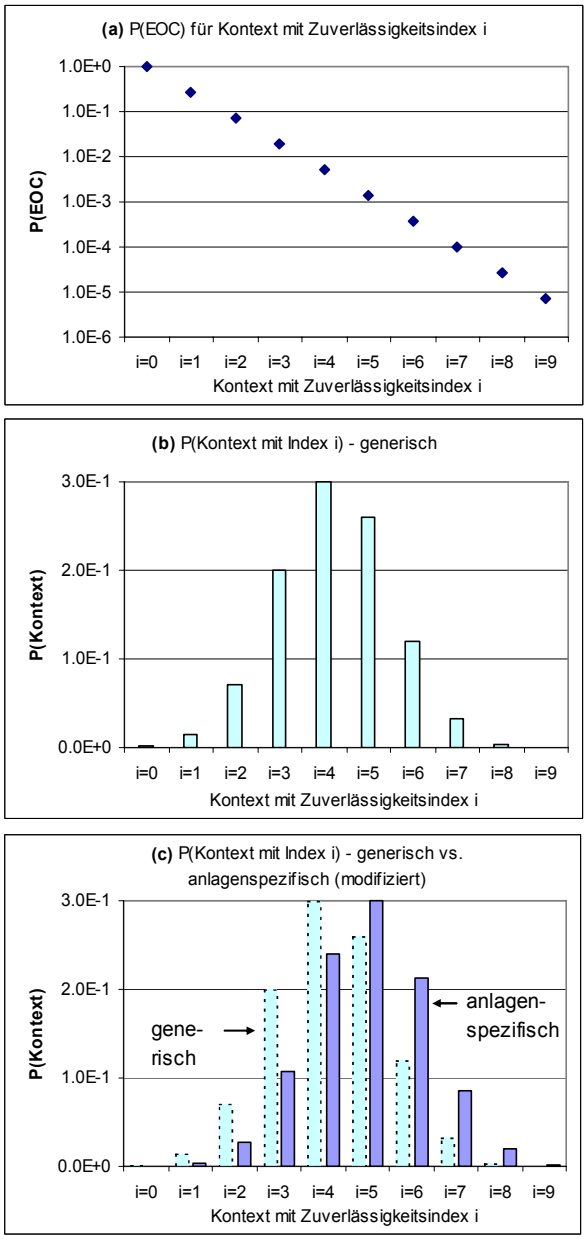


Fig. 2: *In der EOC-Quantifizierungsmethode verwendete Wahrscheinlichkeitsverteilungen*

werden wiederum von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, und die Einflüsse selber hängen stark vom jeweiligen Kontext ab. Übliche Modelle über die Wirkung von Faktoren (z.B.: je grösser die verfügbare Zeit, desto kleiner die Fehlerwahrscheinlichkeit) können nicht übernommen werden.

Als Beitrag zur Schaffung von Grundlagen für die nachvollziehbare EOC-Berücksichtigung in PSA-Studien wurde im Projekt HRA eine entsprechende Quantifizierungsmethode entwickelt. Die Methode definiert einen Zuverlässigkeitsindex i auf einer Skala von 0 für einen extrem ungünstigen Kontext, in dem Fehler fast immer auftreten, bis 9 für einen extrem günstigen Kontext. Die Werte für die Fehlerwahrscheinlichkeit P(EOC|i) unter der Bedingung eines Kontexts mit dem Index i und die generischen Werte für die Wahrscheinlichkeit P(i) eines dem Index i entsprechenden Kontexts sind die Ergebnisse einer Auswertung von EOC-Ereignissen aus der Betriebserfahrung. Figuren 2 (a) und (b) zeigen diese Werte. Die Analyse einer anlagenspezifischen Situation, in der ein EOC möglich identifiziert wurde, erfolgt durch eine systematische Prüfung situationsbezogener Merkmale, die zur Motivierung des Fehlers beitragen. Daraufhin werden die generischen Werte für P(i) modifiziert. Die modifizierten Werte für P(i) berücksichtigen somit anlagenspezifische Handlungsbedingungen. Fig. 2 (c) zeigt, am Beispiel einer Testanwendung der Methode für ein Schweizerisches Kraftwerk (EOC: frühzeitiges Abschalten der Sicherheitseinspeisung), wie sich die generische Verteilung nach Einbeziehung anlagenspezifischer Erkenntnisse verändert. Auf diese Weise erlaubt die Methode eine Verknüpfung verfügbarer Daten sowie die Berücksichtigung eines grossen Spektrums potentieller Einflussfaktoren. Weitergehende Arbeiten betreffen die Ausgestaltung methodischer Details sowie die Ausarbeitung von Anleitungen für den Methodenbenutzer.

LWR-PROTEUS [3]: Das Projekt findet mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Im Rahmen dieses experimentellen reaktorphysikalischen Programmes wurden 2005 fortgeschrittene Siedewasserreaktor-Brennelemente des Typs SVEA-96 Optima2 aus dem KKW Leibstadt im Zentrum des Nullleistungs-Forschungsreaktors PROTEUS bestrahlt. Ziel des Projektes ist, eine sehr genaue experimentelle Datenbank zu generieren, um die Berechnungsqualität bei Voraussagen wichtiger Reaktorphysik-Parameter (Neutronenmultiplikation, Neutronen-Reaktionsraten) in diesen heterogenen Brennelementen mit teillangen Brennstäben zu validieren.

Es ist dabei wichtig die Genauigkeit der Berechnungsmethoden bei der Voraussage von Reaktionsraten im Inneren einzelner Brennstäbe nach-

zuweisen. Je nach Zusammensetzung (z. B. UO_2 oder Gd_2O_3-vergiftetes UO_2) und Position des Brennstabes (z. B. gegenüber grösserer Wasserbereiche oder weit entfernt davon) zeigen die Reaktionsraten für Spaltung oder Neutroneneinfang im ^{238}U sehr grosse radiale und azimutale Differenzen. Die Fähigkeit klassischer experimentellen Techniken, solche Reaktionsraten räumlich innerhalb von Brennstäben mit einem Durchmesser < 1 cm aufzulösen, ist sehr beschränkt. Das PSI spielte in der Vergangenheit eine Pionierrolle bei der Entwicklung tomographischer Techniken zur Untersuchung frischen Brennstoffes; heute führt es ähnliche Experimente zur Charakterisierung abgebrannter Brennstabsegmente mit sehr hohem Abbrand durch.

Zur Auslotung alternativer experimenteller Techniken im Brennstab-Inneren wurden im Berichtsjahr im Rahmen einer Diplomarbeit an der EPFL verschiedene Typen von Folien entwickelt und benutzt um die räumliche Auflösung zu erhöhen. Neben gestanzten Folien in Form von Kreissektoren und Kreisringen und der Nutzung von Metalldrähten in Spiralform, wurde erstmals in der Reaktorphysik die LIGA-Technik (Lithographische Galvanoformung) eingesetzt, um Folien mit Mikrometer-Präzision zu erzeugen, welche einen bisher unerreichten Grad an radialer und azimutaler Auflösung zu erreichen. Diese Auflösung war entscheidend bei der Quantifizierung von Code-Abweichungen. Ein Teil dieser hochpräzisen Reaktionsraten-Untersuchungen im Brennstabinneren erhielt im November 2005 den Preis der Reaktorphysik-Abteilung der American Nuclear Society für das beste Paper während der letzten Winterkonferenz in Washington DC.

CMB (Core Materials Behaviour) [4]: Das Projekt findet in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW statt. Bei der Spaltung von Uran in Kernbrennstoffen entstehen rund 20% gasförmige Spaltprodukte. Dies sind Kr- und vor allem Xe-Isotope. Die Spaltgase sind gelöst in der Matrix, oder liegen in nm-grossen Bläschen (*intragranulare* Blasen), in µm-grossen Blasen (*intergranulare* Blasen oder *Poren*) vor oder werden durch Risse in der Brennstoffmatrix ins Plenum des Brennstabes freigesetzt. Bei höherem Abbrand, d.h. wenn über 7% der Schwermetalle im UO_2 gespalten sind, entsteht im äusseren Bereich des Brennstoffquerschnitts die sogenannte Hochabbrandstruktur (HBS). In dieser Zone tritt eine Abreicherung der Spaltgase in der Matrix und eine Anreicherung in den Poren auf, mit Drücken bis einigen 100 MPa. Eine Quantifizierung mittels herkömmlichen Methoden ist schwierig, weil die Poren bei der Präparation geöffnet werden.

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde nun eine Quantifizierung möglich gemacht durch die Anwendung einer Laser Ablation gekoppelt mit einem Multi Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (LA-MC-ICP-MS). Dazu wurde eine Kalibriermethode über Mikroeinspritzung eines definierten Gasgemisches entwickelt. Die Untersuchungen wurden mit einem 266-nm-Nd: YAG-Laser gekoppelt mit einem NEPTUNE MC-ICP-MS durchgeführt.

Die experimentell ermittelten Xe-Mengen (s. Fig. 4a) wurden mit elektronenmikroskopischen Bildern verglichen (s. Fig. 4b) und mit der Verteilung der Poren und deren Grösse korreliert. Dies wurde in normaler Brennstoffstruktur und in der HBS durchgeführt, sowohl bei verschiedenen Laserparametern als auch mit Brennstoffproben unterschiedlichen Abbrandes. Damit können erstmals die Gasdrücke in Brennstoffproben bestimmt werden.

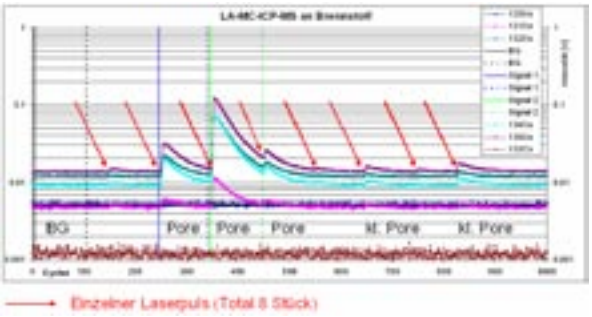


Fig. 4a: *LA-MC-ICP-MS Daten einer Messung an einer Hochabbrandprobe. Jeder Pfeil stellt einen einzelnen Laserpuls dar. Einige Pulse öffneten eine Pore, sichtbar durch die anwachsende Intensität der Xe-Isotope.*

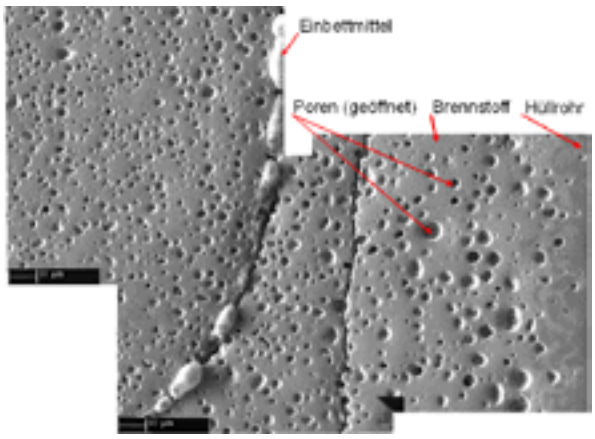


Fig. 4b: *Elektronenmikroskopisches Schliffbild der gleichen Hochabbrandprobe. Am rechten Rand beginnt das Hüllrohr aus Zircaloy.*

INTEGER (Bauteilsicherheit) [5]: Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit und mit finanzieller Unterstützung der HSK durchgeführt und ist gut im 5. EU-Rahmenprogramm eingebettet. Spannungsrisskorrosion (SpRK) ist der wichtigste Alterungsmechanismus in Siedewasserreaktoren (SWR) und kann die Strukturintegrität druckfüh-

render Komponenten und die Verfügbarkeit und Lebensdauer der Anlage wesentlich beeinflussen. Neuere SpRK-Ereignisse in SWR-Reaktordruckbehälter (RDB)-Stutzen und -Durchführungen sowie in Verbindungsschweissungen zwischen RDB und Kernmantel haben die Aufmerksamkeit auf das Verhalten von Inconel-182-Mischnähten zwischen Komponenten aus niedriglegierten Stählen (NLS) und Nickel-Basislegierungen (Inconel 600) oder austenitischen rostfreien Stählen (304 L, 316 L, 316 NG) gelenkt. Obwohl sich die Rissbildungen jeweils auf das Inconel-182-Schweissgut beschränkten und keiner der SpRK-Risse signifikant in den RDB-Grundwerkstoff hineinwuchs, stellt die Möglichkeit von SpRK-Risswachstum in den RDB hinein ein potenzielles Sicherheitsproblem dar. Aus diesem Grund wurde erstmals weltweit das SpRK-Risswachstumsverhalten im komplexen Übergangsbereich einer Inconel-182/NLS-Mischnaht unter SWR/Normalwasserchemie-Bedingungen untersucht, dies in Zusammenarbeit mit dem Fracture Research Institute der Tohoku-Universität (Japan).

Das beobachtete Verhalten korreliert ausgezeichnet sowohl mit der Betriebserfahrung von Mischnähten und druckführenden NLS-Komponenten, als auch mit dem experimentellen Hintergrundwissen zur SpRK von Nickel-Basislegierungen und NLS: Im Inconel-182 Schweissgut wurde schnelles interdendritisches (ID) SpRK-Risswachstum unter simulierten SWR/ NWC- und realistischen Lastbedingungen beobachtet. Die SpRK-Risswachstumsraten (RWR) in der angrenzenden Aufmischungszone des Inconel-182 Schweissguts sind vergleichbar mit denen im homogenen Schweissmetall und klingen mit abnehmendem Abstand zur Schmelzlinie leicht ab. Sobald grössere Teile der Rissfront die Schmelzlinie bzw. die Wärmeeinflusszone (WEZ) des NLS erreichten, konnte sogar unter aggressiven Umgebungsbedingungen ein drastischer Abfall der ID SpRK-RWR um einen Faktor 20 bis 100 beobachten werden. In allen getesteten Proben erfolgte unter statischer Belastung ein Rissstop im Bereich der Schmelzlinie (Fig. 5). In einigen Fällen wurde zwar lokal ein geringes Wachstum (< 100 µm) in die WEZ des NLS hinein beobachtet, das sich aber nicht weiter in den Grundwerkstoff des NLS ausbreitete. Es besteht deshalb nur ein sehr kleines Risiko, dass ein schnell wachsender ID SpRK-Riss die Schmelzlinie durchquert und sich als transkristalliner Korrosionsriss im benachbarten RDB-Material signifikant ausbreitet, solange die Anzahl der Anlagentransienten begrenzt ist und eine Chloridkontamination der SWR-Umgebung vermieden wird.

Forschung zu Schweren Unfällen [6]: Die Aktivitäten zu diesem Thema laufen mit finanzieller Unterstützung der Schweizer KKW und sind stark im 5. EU-Rahmenprogramm eingebettet. Spalt-

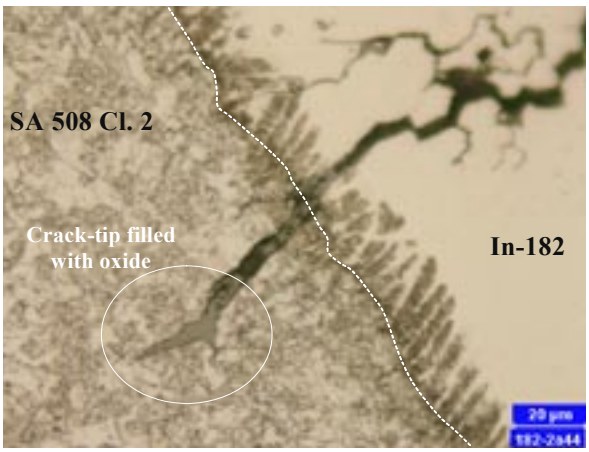


Fig.5: *Bestätigung des mittels Gleichstrompotentialsonde während des Experiments beobachteten SpRK-Rissstops in der WEZ des NLS SA 508 Cl.2 in der Nähe der Schmelzlinie durch einen polierten und geätzten Querschliff. Nur der niedriglegierte RDB-Stahl SA 508 Cl.2 wird von der angewandten Nital-Ätzung angegriffen, jedoch nicht die korrosionsbeständige Nickel-basislegierung Inconel-182.*

produkte (SP), einschliesslich Iod, werden während des Betriebs eines Kernkraftwerks im Reaktor gebildet. In Folge eines höchst unwahrscheinlichen schweren Reaktorstörfalls, kann flüchtiges Iod durch unfiltrierte Druckentlastung oder ein Leck im Containment in die Umgebung gelangen. Radioaktives Iod stellt wegen der möglichen Verursachung von Schilddrüsenkrebs eine potentielle Gefahr dar. Deshalb werden weltweit umfassende experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Iod-Verhalten durchgeführt.

Obwohl die Strahlenchemie des Iods sehr komplex ist, kann sein grundsätzliches Verhalten ausreichend gut interpretiert werden. Mögliche Einflüsse einer Anzahl von postulierten Nebenkomponenten sind bisher weitgehend unerforscht geblieben. So z. B. gelangen die in der Containment-Atmosphäre nach dem Störfall durch die SP-Strahlung gebildete Salpeter- und salpetrige Säure in den Pool des Kühlwassers (Sumpf). Die Auswirkungen dieser Säuren auf die Freisetzung von Iod in die Containment-Atmosphäre waren Gegenstand von Untersuchungen am PSI. Die Ergebnisse zeigen bei gleichbleibender Strahlendosis eine markante Abnahme der Anteile an flüchtigem Iod- (von 90% auf 2%) mit steigender Nitrat- oder Nitrit-Konzentration. (bis zur fünffachen Iodid-Konzentration, siehe Fig. 6b). Die Stickstoff-Iod-Reaktionen konnten modelliert und die Experimente simuliert werden. Diese Untersuchungen haben den günstigen, bisher unbekannten, Einfluss der Stickstoff-Verbindungen im während eines Störfalls entstehenden Sumpf des Reaktor-Containments nachgewiesen. Sie können zu einer signifikanten Herabsetzung der Bildung von flüchtigem Iod führen und damit zu

einer geringeren potenziellen Freisetzung in die Umgebung. Diese Ergebnisse werden in die neue Version des PSI-Iod-Computerprogramms (IMPAIR 4) integriert und tragen damit zu einer realistischeren Beschreibung des Iod-Verhaltens im Reaktor-Containment unter den Bedingungen eines schweren Störfalls bei.

Fig. 6a: *Reaktionsgefäss in der Kammer der Gamma-Zelle.*

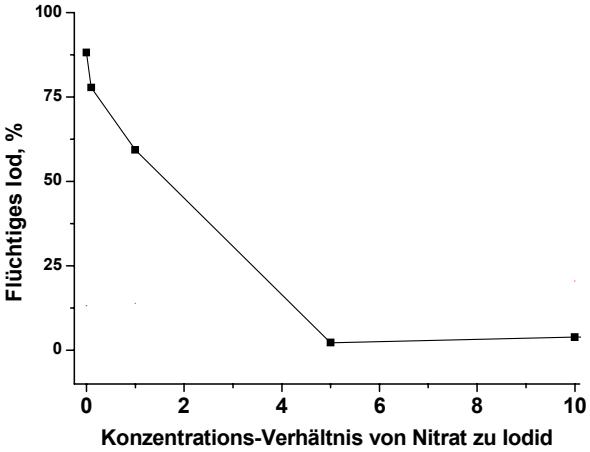


Fig. 6b: *Einfluss der Nitrat-Konzentration unter Gamma-Strahlung auf die Bildung des flüchtigen Iods.*

Entsorgung Radioaktiver Abfälle [7]: Die F&E zur Entsorgung radioaktiver Abfälle am PSI spielt eine wichtige Rolle auf nationaler Ebene, indem sie die Bundesregierung und die Nagra bei ihrer Aufgabe zur sicheren Entsorgung der Abfälle der KKW, aber auch aus Anwendungen in der Medizin, der Industrie und der Forschung unterstützt. Die Untersuchungen sind orientiert in Richtung des Sicherheitsnachweises von Endlagern in der Schweiz. Die Arbeit ist stark in internationalen Kooperationen auf bilateraler und multilateraler Basis eingebettet.

Tonmineralien sind wichtige Systemkomponenten eines geologischen Tiefenlagers und sind Hauptbestandteil des Kavernenverfüllmaterials Bentonit (Montmorillonit) und des Wirtgesteins Opalinuston. Sorptionsuntersuchungen an den beiden Tonmineralien bilden eine wichtige Grundlage für den Sicherheitsnachweis, da die Retardierung von Radionukliden durch diese immobilen Festphasen einer der wichtigsten Pfeiler darstellt auf den sich die Sicherheitsanalyse für geologische Endlager in der Schweiz abstützt. Ein Ziel der Forschung am PSI ist es, die Sorptionsprozesse von Metallen an Tonmineralien zu verstehen und Modelle zu entwickeln mit denen die Retardierung von Radionukliden in einem geologischen Tiefenlager quantitativ vorausgesagt werden kann.

Eine gut abgestützte Bestimmung von Sorptionsparametern für die Modellierung erfordert für jedes Radionuklid eine grosse Anzahl von sehr aufwändigen Messungen im Labor. Die Sorption von 11 Metallen an Montmorillonite, die experimentell bei Spurenkonzentrationen des Metalls bestimmt worden waren, wurden mithilfe des am NES entwickelten so genannten *2SPNE* (*2 site protolysis non electrostatic*, d.h. 2 Protolysereaktionen, ohne Berücksichtigung von elektrostatischen Termen) Oberflächenkomplexierungsmodells, das auch den Ionenaustausch an Tonmineralien mitberücksichtigt, modelliert. Ausgehend von diesem umfassenden, einzigartigen Datensatz kann eine Beziehung zwischen der Oberflächenkomplexierungs-konstante des Metalls (SKX-1) und der entsprechenden Hydrolysekonstante (OHKX) der Lösungsspezies postuliert werden (s. Fig. 7). Diese Art der Korrelation wird als lineare freie Energiebeziehung (LFER) bezeichnet. Im gegebenen Fall erstreckt sich die LFER über beachtliche, beinahe 40 Grössenordnungen. Es handelt sich hier um die erste LFER dieser Art, welche für komplexe Festphasen wie Tonmineralien angewandt wurde und in der Metalle mit Valenzzuständen zwischen II und VI berücksichtigt sind.

Die gefundene LFER ist aus verschiedenen Gründen von grosser Bedeutung. Zum einen können Oberflächenkomplexierungskonstanten von Metallkationen bis heute theoretisch nicht vorausgesagt werden. Zum anderen sind die Sorptionsdaten für eine Reihe von für die Sicherheitsanalyse wichtigen Radionukliden, wie zum Beispiel den tetravalenten Aktiniden, nur sehr schlecht oder gar nicht bekannt. Die in Fig. 7 dargestellte LFER erlaubt es nun Oberflächenkomplexbildungskonstanten abzuschätzen und Sorptionswerte zu berechnen. Damit können weniger zeitintensive und aufwändige Messungen durchgeführt werden und Lücken in den Daten von Metallen, für welche die notwendigen Untersuchungen nur sehr schwierig durchzuführen wären, können geschlossen werden.

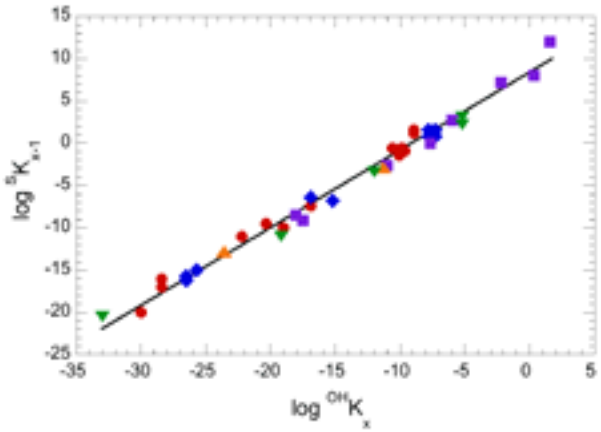


Fig.7: Beziehung zwischen der Oberflächenkomplexierungskonstanten von Spezies, die auf den stark bindenden Oberflächenplätzen von Montmorillonit sorbieren, und der entsprechenden Hydrolysekonstante dieser Spezies in Lösung. (●) Mn(II), Co(II), Cd(II), Ni(II), Zn(II), (◆) Eu(III), Am(III), (■) (Sn(IV), Th(IV), (▲) Np(V), (▼) U(VI)

Das Endziel der hier präsentierten Arbeit ist das Erstellen einer thermodynamischen Sorptionsdatenbasis, die für die Berechnung von Sorptionswerten für alle sicherheitsrelevanten Radionuklide unter ganz verschiedenen in der Sicherheitsanalyse berücksichtigten geochemischen Szenarien verwendet werden kann.

SICHERHEITSBEZOGENE MERKMALE ZUKÜNFTIGER REAKTORKONZEPTE

Hochtemperaturmaterialien [8]: Das Projekt findet statt im Rahmen der Schweizer Beteiligung am Generation IV International Forum und ist zudem stark mit Forschungsprojekten des 6. EU-Rahmenprogrammes gekoppelt. Es befasst sich primär mit der Charakterisierung von Materialien für den Einsatz in Reaktoren der 4. Generation unter extremen Temperatur- und Fluenzbedingungen. Kriechen von Metallen und Legierungen tritt bei Temperaturen, die höher sind als 0.4 Tm (Tm Schmelzpunkt) bereits unterhalb der Dehngrenze auf. Dadurch wird der Einsatz von Metallen bei hohen Temperaturen begrenzt. Unter Bestrahlung tritt Kriechen durch Strahlenschädigung schon bei niedrigeren Temperaturen auf. Beide Effekte sind für zukünftige Hochtemperaturreaktoren (very high temperature reactor VHTR) der 4. Generation von Bedeutung und sie werden daher am PSI untersucht. Interessierende Werkstoffe sind oxid-dispersionsgehärtete Stähle (ODS) und intermetallische Titanaluminide. Figur 8 zeigt Kriechraten, wie sie unter Bestrahlung und unter thermischen Bedingungen gefunden wurden. Es konnte ein deutlicher Unterschied zwischen strahlungsinduziertem Kriechen und thermischem Kriechen gefunden werden. Strahlungsinduziertes Kriechen tritt bis ungefähr 680 °C auf, während bei höheren Temperaturen praktisch ausschliesslich thermisches Kriechen auftritt. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für den ODS Werkstoff gefunden. Für den VHTR bedeutet das, dass unter stationären Betriebsbedingungen die Strahlenschädigung praktisch bedeutungslos ist. Während einer transienten Phase (wie etwa beim Anfahren) kann jedoch durchaus auch strahungsinduziertes Kriechen auftreten. Für die angestrebte lange Betriebszeit eines VHTR (60 Jahre) müssen daher Wechselwirkungen zwischen strahlungsinduziertem Kriechen und thermischem Kriechen erforscht werden. Dazu werden die experimentellen Ergebnisse als Input für Werkstoffmodellierungen (Multiscale Approach) verwendet, die es zukünftig erlauben sollen, die Werkstoffschädigung vorherzusagen

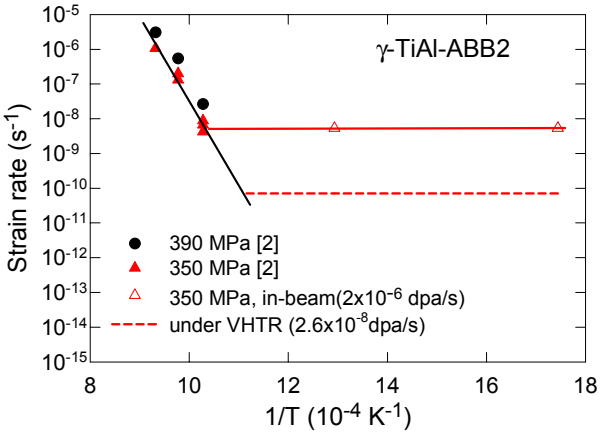


Fig.8: Thermisches und strahlungsinduziertes Kriechen gemessen für eine Titanaluminide-Legierung, die als möglicher Werkstoff für zukünftige gasgekühlte Reaktoren am PSI untersucht wird

ALPHA [9]: Das Projekt ist derzeit stark auf das internationale Programm SETH der OECD/ NEA ausgerichtet, woher auch ein grosser Teil seiner Finanzierung kommt. Die gewonnenen experimentellen Daten werden zur Validierung von neuen dreidimensionalen thermohydraulischen Simulationsprogrammen benutzt. Eine wichtige aktuelle Weiterent von thermohydraulischen Simulationsprogrammen besteht im Bereich der dreidimensionalen Zweiphasenströmungen, welche für die Thermohydraulik im Bereich der Reaktorsicherheit in verschiedenen Problemstellungen eine entscheidende Rolle spielen. Dazu werden innerhalb des ALPHA-Projekts auch grundlegende Untersuchungen im Rahmen von Dissertationen durchgeführt, wovon zwei auf dem Gebiet der Blasenströmung erfolgreich im Berichtsjahr abgeschlossen werden konnten.

FAST [10]: Das Projekt findet statt im Rahmen der Schweizer Beteiligung am Generation IV International Forum. Im Berichtsjahr wurde unter anderem ein konsistenter analytischer Vergleich

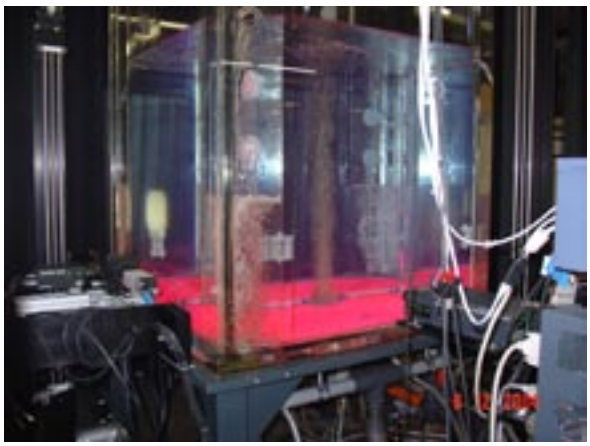


Fig. 9a: Versuchsanlage mit Plexiglastank, Blasenjet im Zentrum und PIV System

Fig. 9d: Bild eines perfekt angeordneten Blasenrings

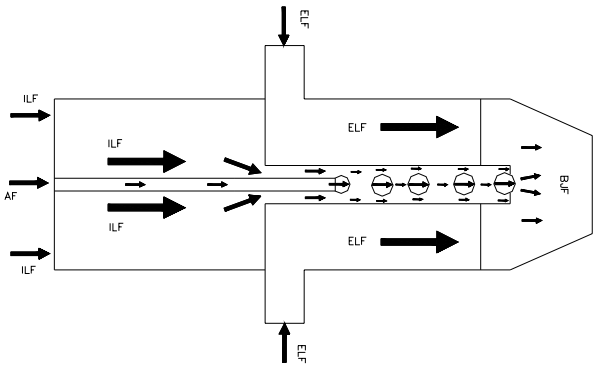


Fig. 9b: Schematik des Gas-Flüssigkeitsinjektors: Luft (AF), interne Flüssigkeit (ILF), externe Flüssigkeit (ELF) und erzeugter Blasenjet (BJF)

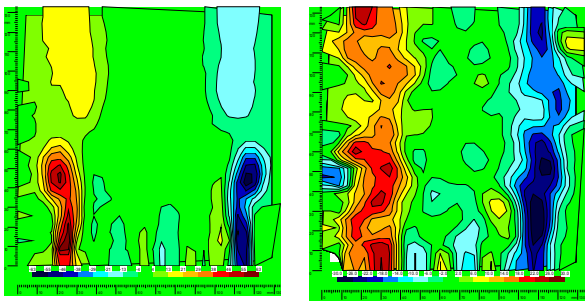


Fig. 9c: Vortizität der Wasserströmung am Austritt eines blasenhaltigen Jets. Links für natürliche Strömung (Momentanaufnahme) und rechts für periodisch getriggerte Strömung (Phasenmittel).

des Sicherheitsverhaltens kritischer und unterkritischer Reaktorsysteme mit schnellem Neutronenspektrum durchgeführt. Jedem Fall wurde die Kernauslegung des *eXperimental Accelerator Driven System (XADS)* zugrunde gelegt (80 MW_{th}, MOX-Brennstoff, Pb-Bi-gekühlt). Für die Transienten-Berechnungen wurde das am PSI entwickelte Codesystem FAST genutzt. Die Berechnungsstudie zeigt ein hohes Niveau des Selbstschutzes für beide Systeme – kritisch und unterkritisch – für einen breiten Bereich postulierter Unfallereignisse, einschliesslich einer transienten Überlast infolge Reaktivitätszufuhr, Strömungsverlust, Kühlmittelverlust und Kernüberkühlung. Die relativen Vor- und Nachteile der zwei Systeme aus der Perspektive des transienten Verhaltens werden auf der Basis der entsprechenden Simulationsergebnisse diskutiert.

Einerseits sind wie erwartet die Reaktivitätszufuhr-Transienten viel milder für das unterkritische System als für den kritischen Reaktor. Bei der Transiente beispielsweise, in welcher 300 pcm Reaktivität zugeführt werden, sind die Spitzentemperaturen im Brennstoff und im Hüllrohr ca. 360 ºC bzw. 130 ºC im kritischen System als im unterkritischen. Andererseits scheint das kritische System bei ungeschützten Transienten mit verminderter Wärmeabfuhr wesentlich robuster zu sein. Beim ungeschützten Strömungsverlustunfall beispielsweise reduziert sich die maximale Brennstofftemperatur im kritischen Reaktor um ca. 150 ºC, während sie um ca. 90 ºC im unterkritischen System zunimmt. Solche Resultate rühren daher, dass die Kernleistung in unterkritischen Systeme wegen der starken Unterkritikalität nur schwach auf Reaktivitäts-Rückkoppelungseffekte von Änderungen der Brennstofftemperatur, der Kühlmitteldichte etc. reagiert (s. Fig. 10). Es muss allerdings bemerkt werden, dass obige Schlussfolgerungen auf der Basis einer konsistenten detaillierten Analyse äquivalenter kritischer und unterkritischer Systeme mit einer relativ niedrigen Leistungsdichte (weniger als 200 W/cm) und mit traditionellem PuO_2/UO_2-Brennstoff gezogen wurden.

GANZHEITLICHE BETRACHTUNG VON ENERGIESYSTEMEN (GaBE)

GaBE [11]: Die Arbeiten im Rahmen des Projektes GaBE werden in enger Zusammenarbeit zwischen dem NES und dem Forschungsbereich *Allgemeine Energieforschung* des PSI durchgeführt. Im Jahr 2005 schloss GaBE den Beitrag zum EU-Projekt ExternE-Pol (Externalities of Energy:

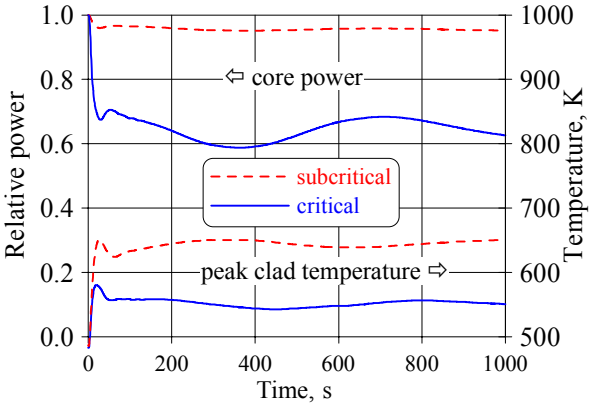


***Fig.10: Relative** Reaktorleistung und maximale Hüllrohrtemperatur beim Strömungsverlustunfall in ähnlichen kritischen and unterkritischen Systemen*

Extension of Accounting Framework and Policy Applications) ab. Bei diesem Projekt war das PSI verantwortlich für die Bestimmung der externen Kosten einer Vielzahl von Kraftwerks- und Heizungstechnologien. Dazu wurden Umweltinventare, basierend auf vollständigen Lebenszyklen, mit den kürzlich entwickelten durchschnittlichen Schadensfaktoren der EU-15 kombiniert. Die Inventare heutiger Technologien stützen sich auf die ecoinvent Datenbank. Ausgewählte fortschrittliche Systeme wurden neu analysiert. Die Inventare umfassen komplette Prozessketten von der Gewinnung der Ressourcen über Verarbeitung und Transport, Strom- und/oder Wärmeerzeugung bis hin zur Abfallentsorgung. Zusätzlich wurden von Partnern (IER, Deutschland und VITO, Belgien) der heutige durchschnittliche Fahrzeugpark und ausgewählte neue Personenwagen analysiert.

Unter den Systemen zur Stromproduktion weisen Erneuerbare und die Kernenergie geringe externe Kosten auf. Jene von fossilen Kraftwerken sind im Vergleich zu den Stromerzeugungskosten substanziell. Die externen Kosten fortschrittlicher fossiler Systeme (Kohle-PFBC, Öl- und Gas-GuD) sind stark reduziert und werden von den Folgen des Treibhauseffekts dominiert. Elektrizität aus Diesel- und Erdgas-WKK Anlagen schneidet bei der Verwendung der Allokation nach Exergie schlechter ab als Strom aus Öl- und Gas-GuD Kraftwerken. Bei einem Vergleich von Heizungen weist Öl die höchsten externen Kosten auf, 60% über jenen von Gasheizungen. Konventionelle Holzheizungen liegen wegen relativ hoher NOx- und Partikelemissionen dazwischen. Externe Kosten von Wärmepumpen hängen sehr stark vom verwendeten Strom ab. Die Analyse der Transportsysteme streicht die Bedeutung der Infrastruktur heraus, besonders bei Implementierung von strengen Emissionsgrenzwerten. Mit Sensitivitätsanalysen wurde die Bedeutung von Unsicherheiten bei Schadensfaktoren und Änderungen der monetären Bewertung ermittelt. Das Ranking der einzelnen Technologien erweist sich trotz grosser Unsicherheitsfaktoren als robust.

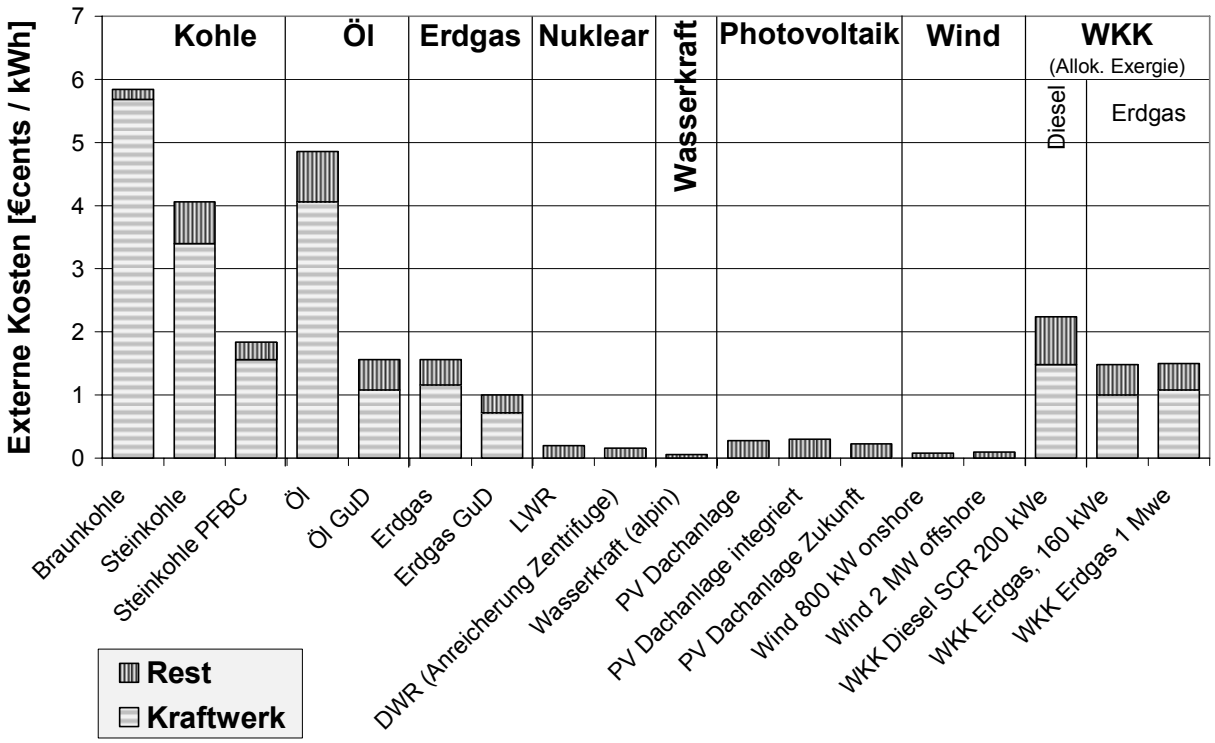


***Fig. 11:** Neue durchschnittliche umweltbezogene externe Kosten der Stromproduktion in der EU-15; direkte Beiträge aus dem Kraftwerksbetrieb („Kraftwerk") sowie direkte Beiträge vom Rest der Energiekette und alle indirekten Beiträge („Rest") sind getrennt dargestellt*

Nationale und Internationale Zusammenarbeit

Je nach Thematik werden die Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit den Betreibern der Schweizer Kernkraftwerke und/oder der HSK durchgeführt. Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle finden in Zusammenarbit und mit Unterstützung der Nagra statt. Es bestehen enge Verbindungen mit den Schweizer Universitäten und den Technischen Hochschulen und Fachhochschulen, allem voram im Rahmen von Dissertationen und Diplomarbeiten.

Alle aufgeführten Projekte finden im Rahmen intensiver internationaler Zusammenarbeiten statt. Etwa 30 Partner aus 10 Ländern mit Kernenergieprogrammen sowie internationale Organisationen wie die Euratom, die OECD/NEA und die IAEA umfassen alle wichtigen Forschungsinstitutionen sowie die grössten Hersteller von Nuklearsystemen. Eine detaillierte Auflistung befindet sich auf http://nes.web.psi.ch/link_partners.html.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2005 erfüllt. Besonders hervorzuheben ist der Beitritt der Schweiz zum *Generation IV International Forum (GIF)* mit der Unterzeichnung des Adhäsionsbriefes zum GIF-Rahmenvertrag durch den Bundespräsidenten. Die Vision des NES für die kommenden 10-15 Jahre wurde im Februar 2005 der Plenaren Forschungskommission des PSI vorgestellt und von letzterer gutgeheissen.

Im Jahr 2006 steht die Unterzeichnung mehrerer Zusammenarbeitsverträge mit der HSK auf dem Gebiet der Material- und Sicherheitsforschung an. Sie stellen eine Fortsetzung der bisherigen Aktivitäten STARS, RIKORR, DIAGNOSTIK und HRA dar. Die übrigen Aktivitäten werden im Rahmen bestehender Zusammanrbeitsverträge mit anderen Partnern fortgesetzt. Für die Projekte HT-MAT und FAST werden Verträge auf System- und Projektebene mit den GIF-Partnern abgeschlossen.

Die Aktivitäten der Projekte GaBE und HRA (bisher im NES) und jene zur Ökonomie von Energiesystemen (bisher im ENE) werden ab 1. Januar 2006 in einem neuen Labor für Energiesystem-Analysen (LEA) integriert. Nach Einreichung des entsprechenden Gesuches an die HSK wird mit der Aufnahme der Arbeiten zur Nachrüstung des Nullleistungsreaktors PROTEUS im Laufe von 2006 gerechnet.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

Die Jahresberichte werden auch im *Scientific Report 2005 Volume IV* des PSI erscheinen (zu bestellen bei: PSI, CH-5332 Villigen, oder http://nes.web.psi.ch).

[1] M. A. Zimmermann, (martin.zimmermann@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***STARS***, http://stars.web.psi.ch, (JB)

[2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***HRA***, http://systemsa.web.psi.ch/hra, (JB)

[3] F. Jatuff, (fabian.jatuff@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***LWR-PROTEUS***; http://proteus.web.psi.ch, (JB)

[4] Ch. Hellwig (christian.hellwig@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***CMB***, http://www.web.psi.ch/eden0.htm, (JB)

[5] D. Kalkhof, (dietmar.kalkhof@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***INTEGER,*** http://www.web.psi.ch/lwv.htm (JB)

[6] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch) PSI, *Villigen:* ***Forschung zu schweren Unfällen***, http://sacre.web.psi.ch, (JB)

[7] J. Hadermann (joerg.hadermann@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***Entsorgung radioaktiver Abfälle***, http://les.web.psi.ch/groups/index.html, (JB)

[8] W. Hoffelner (wolfgang.hoffelner@psi.ch) PSI, *Villigen:* ***Hochtemperaturmaterialien***, (JB)

[9] M. Huggenberger, J. Dreier, F. de Cachard (max.huggenberger@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***ALPHA***, http://lth.web.psi.ch/LTH.htm, (JB)

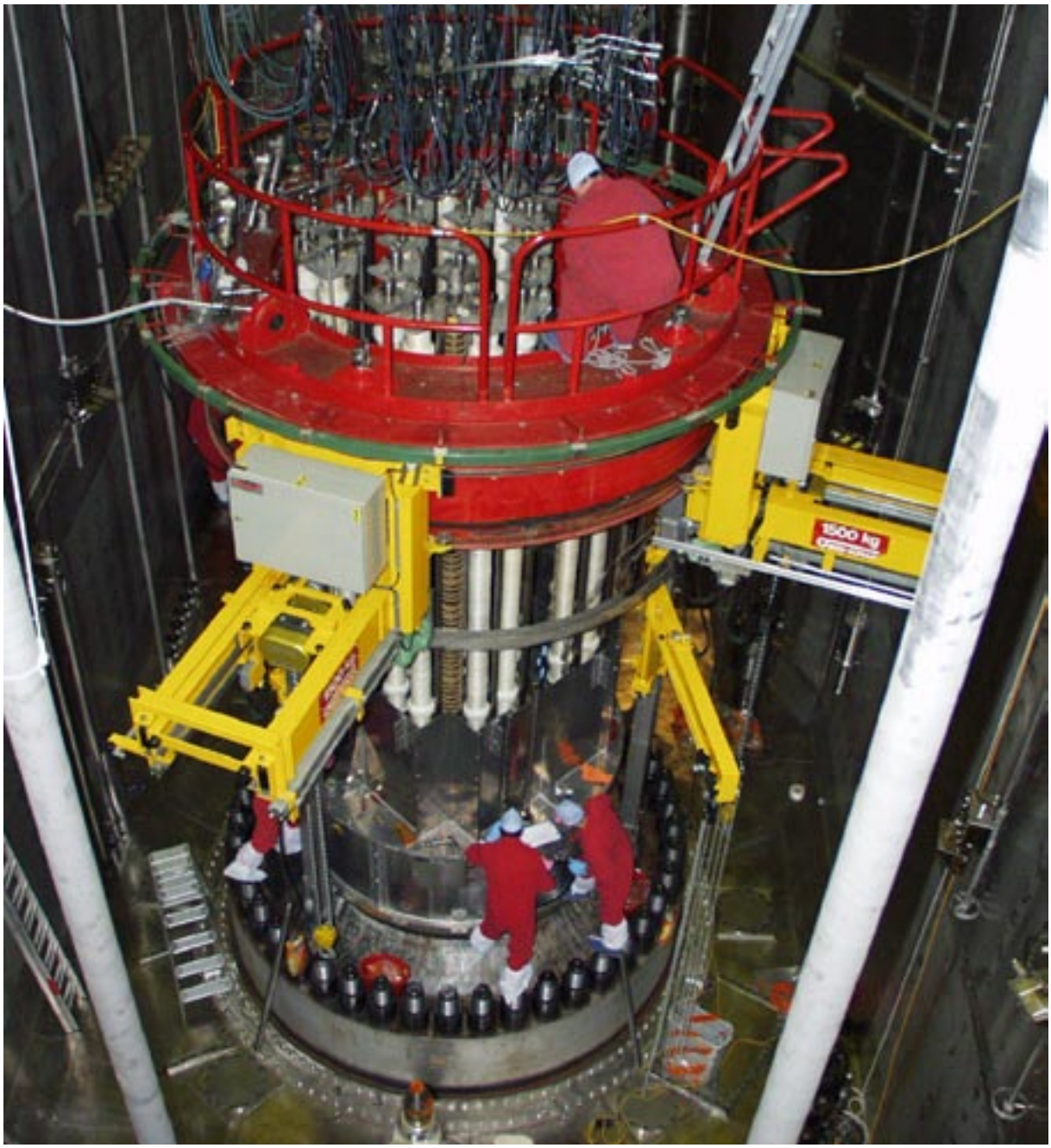
[10] P. Coddington (paul.coddington@psi.ch), PSI, *Villigen:* ***FAST***, (JB)

[11] St. Hirschberg (stefan.hirschberg@psi.ch), PSI, *Villigen;* ***GaBE***, http://gabe.web.psi.ch, (JB)

Rapports de synthèse des chefs de programme OFEN
Überblicksberichte der BFE-Programmleiter 2005

PROGRAMM REGULATORISCHE SICHERHEITS-FORSCHUNG

Brigitte Faust
brigitte.faust@hsk.ch



Inspektion eines Reaktordruckbehälter-Deckels in einem Kernkraftwerk

Programmschwerpunkte und Ziele

Die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen vergibt und koordiniert im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung Forschungsaufträge mit dem Ziel, den aktuellen wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand zu ermitteln, zu erweitern und für die Aufgaben der nuklearen Aufsicht verfügbar zu machen. Das Strategiepapier für die *Regulatorische Sicherheitsforschung der HSK* definiert, wie die Mittel für nationale Projekte und internationale Kooperationen am wirkungsvollsten eingesetzt werden sollten, um eine intensivere Zusammenarbeit der betroffenen Akteure zu erreichen. So erzielt die HSK mit den ihr zur Verfügung stehenden Mitteln nicht nur international abgesicherte Ergebnisse und fundiertes Fachwissen, sondern kann Synergien nutzen. Besonders wichtig ist der Erfahrungsaustausch mit ausländischen Sicherheitsbehörden sowie Kosteneffizienz und mittelfristige Planungssicherheit für die Forschungspartner.

Das im Februar 2005 in Kraft getretene neue Kernenergiegesetz KEG verlangt, dass die zuständigen Behörden die Öffentlichkeit regelmässig über den Zustand der Kernanlagen sowie über Sachverhalte im Zusammenhang mit nuklearen Gütern und radioaktiven Abfällen informiert. Im Weiteren ist im neuen Gesetz festgelegt, dass Kernanlagen solange betrieben werden können, als sie sicher sind. Konkret heisst dies, dass das bestehende hohe Sicherheitsniveau während der gesamten Betriebsdauer laufend überwacht und ausgebaut werden muss, ungeachtet der tatsächlichen Betriebszeiten. Auch wenn im Gesetz keine Restbetriebszeiten festgelegt sind, wird die Stilllegung der heute bestehenden Kernanlagen in absehbarer Zeit erfolgen. Es ist eine Aufgabe der HSK sicherzustellen, dass die Anlagen bis zu ihrem letzten Betriebstag sicher sind.

In diesem Umfeld kommt dem Alterungsverhalten der schweizerischen Kernanlagen eine besondere Bedeutung zu, wofür die HSK ein Alterungsüberwachungsprogramm anwendet. Um den Zeitpunkt der Ausserbetriebnahme und den Umgang mit Sicherheitsfragen und Investitionen während den letzten Betriebsjahren festlegen zu können, hat die HSK ein entsprechendes Projekt ins Leben gerufen. Im Hinblick auf diese Herausforderungen hat die HSK folgende Forschungsschwerpunkte festgelegt (nähere Angaben befinden sich unter www.hsk.ch/deutsch/infos/start2.htm):

- Reaktorsicherheit: Der Reaktordruckbehälter und das Containment eines bestehenden Kernkraftwerks können nicht ausgetauscht werden, weshalb ihr Zustand eine massgebliche Rolle bei der Ermittlung der Lebensdauer eines Kernkraftwerkes spielt. Zur Verbesserung der Aufsicht im Bereich der Integrität des Primärkreislaufes und der Rückhaltefähigkeit des Containments unterstützt die HSK wissenschaftliche Untersuchungen auf den Gebieten Werkstoffverhalten und Früherkennung von Alterungsphänomenen.
- Mensch, Organisation und Technik (MTO): Der Mensch, die Organisation und die Sicherheitskultur haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit einer Kernanlage – eine Erkenntnis, die in den letzten Jahren stetig gewachsen ist. Deshalb ist es der HSK im Rahmen ihrer integrierten Aufsichtsstrategie wichtig, Kernanlagen als MTO-Systeme zu betrachten und neben den technischen Sicherheitsvoraussetzungen auch den menschlichen und organisatorischen Faktoren die erforderliche Aufmerksamkeit zu schenken. Die Aufsicht auf diesem Gebiet ist herausfordernd, da nur wenige eindeutige Anforderungen und klare Bewertungsmassstäbe existieren. Wissenschaftliche Studien können dazu dienen, solche Anforderungen und Bewertungsmassstäbe zu erarbeiten.
- Kriterien für die vorläufige Ausserbetriebnahme und Nachrüstung: Ein Entscheid der Aufsichtsbehörden zur vorläufigen Ausserbetriebnahme und Nachrüstung einer Kernanlage muss sich auf klare, nachvollziehbare Kriterien abstützen. Diese Kriterien sind gesetzlich verankert und müssen durch Forschungsergebnisse abgestützt sein.
- Im Bereich Transport und Entsorgung der radioaktiven Abfälle konzentriert die HSK ihre Forschungsunterstützung zurzeit auf die Untersuchung geologischer Schichten für die Endlagerung hochradioaktiver, langlebiger Abfälle. Ihre Aufgabe in diesem Prozess besteht darin, die vorgeschlagenen Lösungen auf ihre Sicherheit und Nachhaltigkeit hin zu bewerten.

Die zukünftigen Anforderungen der nuklearen Aufsicht lassen sich nur bewältigen, wenn die HSK Effizienz, Wirksamkeit, Ausgewogenheit und Nachvollziehbarkeit in ihrer Arbeitsweise vereinigt. Eine risiko- und ergebnisorientierte Aufsicht sowie Beteiligungen an internationalen Arbeitsgruppen zu diesen Fragestellungen tragen wesentlich dazu bei.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

REAKTORSICHERHEIT

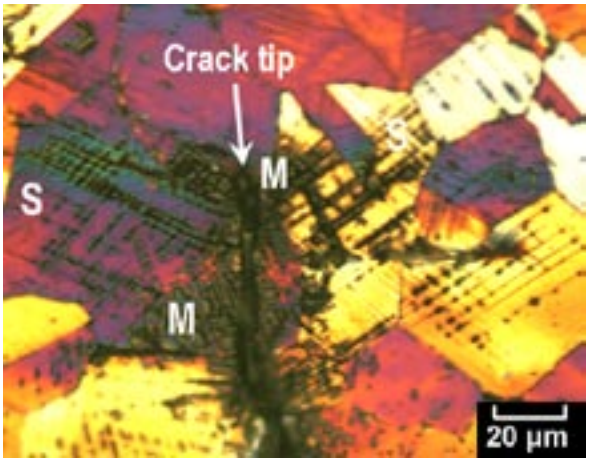
RIKORR II – Wasserstofffahrweise bringt Sicherheitsgewinn [1]: Das Projekt dient der Untersuchung der Ursachen, die zu Korrosionsrissen in druckführenden Primärkreislauf-Komponenten aus ferritischen und austenitischen (*rostfreien*) Stählen führen. Die chemischen Eigenschaften des Reaktorkühlmittels, die thermomechanischen Betriebsbeanspruchungen und die Eigenspannungen in den Stählen (z.B. an Schweissnähten) wirken im Verbund besonders ungünstig. Quantitative Daten zum Risswachstum abhängig von Belastungs-, Material- und Umgebungsparametern sind wesentlich für die Strukturintegrität. So können die Intervalle für wiederkehrenden Prüfungen festgelegt sowie gezielte Gegenmassnahmen geplant werden.

Das Paul Scherrer Institut (PSI) konnte wichtige Erkenntnisse in Bezug auf Werkstoffeigenschaften und Einfluss von Betriebsparametern gewinnen. Die Ergebnisse von RIKORR II trugen dazu bei, eine schonende Betriebsfahrweise hinsichtlich der Gefährdung durch Spannungs- und Schwingungskorrosion für die Kernkraftwerke Mühleberg und Leibstadt einzuführen. Weiter konnte bestätigt werden, dass die Wasserstoff-Fahrweise einen erheblichen Zugewinn an Sicherheitsmarge gegen umgebungsbedingtes Risswachstum aufweist.

Die verschiedenen, für die Auslegung der Komponenten des Primärkreislaufes und ihre Zustandsbeurteilung massgeblichen Risswachstumskurven sind für eine Aufsichtsbehörde wesentlich, da durch sie maximal zulässige Fehler- und Rissgrössen festgelegt werden können. Bei der regelmässigen zerstörungsfreien Prüfung solcher Komponenten vergleicht die HSK allfällige Befunde mit international anerkannten Grenzwerten und passt ihr Regelwerk entsprechend an. Die Forschungsergebnisse des PSI auf diesem Gebiet haben internationale Diskussionen angeregt. Insbesondere bei Chloridtransienten wird nun in einigen Referenzwerken eine Revision der zulässigen Werte diskutiert, da die Wirkung von Chloriden auf das Risswachstum bisher möglicherweise unterschätzt wurde. Die Arbeiten des PSI zeigten nämlich, dass bereits bei geringen Chloridgehalten unter Normalwasserchemie-Fahrweise beschleunigtes Risswachstum auftreten kann.

Diagnostik – Martensitgehalt als Indikator für Materialermüdung [2]: Im Vorläuferprojekt FEVER wurde erkannt, dass die Ermüdung von Stahl mit einer verformungsinduzierten, mit magnetischen Methoden diagnostizierbaren Martensitbildung einhergeht. Die Nutzung des Martensiteffektes versprach die Möglichkeit der messtechnischen Bestimmung der Ermüdungsausnutzung, bevor makroskopische Schäden in Form von Ermüdungsanrissen im Material erkennbar werden. Damit könnten Verbesserungen für die Beurteilung der Lebensdauer von nuklearen mechanischen Komponenten in Kernkraftwerken erreicht werden. Das Forschungsprojekt Diagnostik dient der systematischen Untersuchung der für die Martensitbildung wichtigen Einflussgrössen. Hierzu zählen neben der Schwingspielzahl und der Lastamplitude (Dehnung) auch die chemische Zusammensetzung des Materials, die Werkstoffbehandlung und die Temperatureinflüsse während der Ermüdung (s. Fig. 1).

Das Phänomen der Martensitbildung wurde systematisch für eine Reihe von austenitischen Stahlsorten und für mehrere Produktformen unter verschiedenen Ermüdungsbedingungen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Martensitbildungstendenz nur bei solchen Erzeugnissen ausgeprägt ist, deren effektive chemische Zusammensetzung die Legierung dicht an die Grenze des Zweiphasengebietes Austenit-Martensit oder in das Zweiphasengebiet des Schäffler-Diagramms hinein bringt. Die Bandbreite der Richtanalyse lässt in diesem Bereich eine derart grosse Variabilität zu, dass sich die Martensitbildungstendenz nicht allein aus der Bezeichnung der Stahlgüte ableiten lässt. Zudem wird die Martensitbildung durch die Qualität der Lösungsglühbehandlung und durch eine allfällige vorangegangene Kaltverformung beeinflusst. Nebst dem Einfluss der Ermüdungstemperaturen und Dehnamplituden müssen die Werkstoffdaten bekannt sein, um aus dem Martensitgehalt quantitativ auf den Ermüdungszustand abzuleiten. Bei Temperaturen über 100°C ist die Martensitbildung allerdings zu gering für verlässliche Aussagen.



Figur 1: *Lichtmikroskopische Aufnahme des ermüdeten austenitischen Stahls 347: Spitze des Hauptrisses («Crack tip") mit Gleitbändern (S) in der angrenzenden Grundmasse und Anzeigen von Martensit (M) an den Schnittpunkten der Gleitbänder (Quelle: PSI).*

Die Ergebnisse des Projekts trugen viel zum Verständnis der Vorgänge bei der Materialermüdung von austenitischen Werkstoffen bei, zeigten aber auch, dass unter realen Bedingungen ausserhalb des Forschungslabors der Martensitgehalt eines austenitischen Werkstoffs keinen absoluten Indikator für den Ermüdungszustand darstellt. Dennoch bietet die Methode eine Möglichkeit, Materialveränderungen an kritischen Stellen einer Komponente qualitativ zu überwachen. Daraus ergibt sich, dass die Frühstadien der Werkstoffschädigung durch Ermüdung zusätzlich auf andere Weise untersucht und bewertet werden müssen.

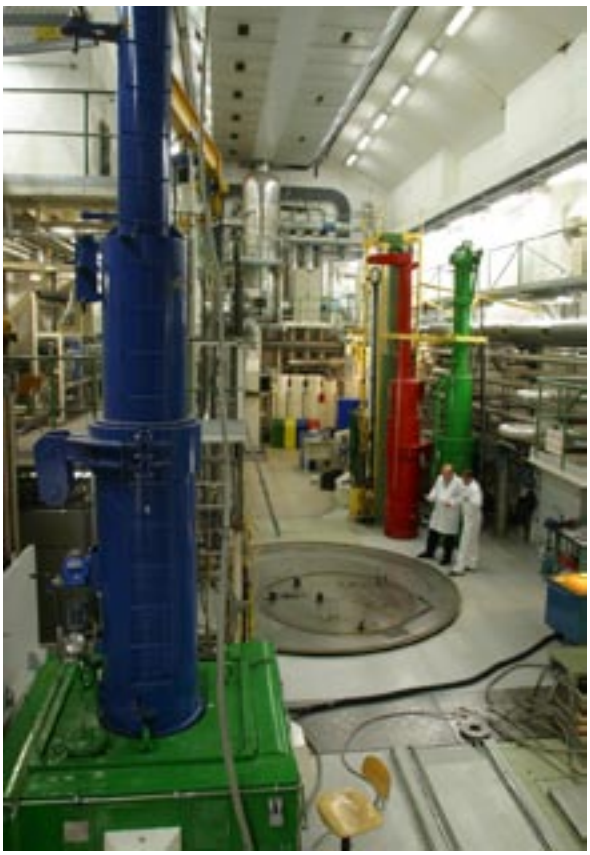
STARS IV – Sicherheitsforschung für Störfallanalysen [3]: Das Projekt dient der Unterstützung deterministischer Sicherheitsanalysen. Gegenüber dem Vorläuferprojekt STARS-III wurden die Schwerpunkte von der Entwicklung von Anlagemodellen von Kernkraftwerken und der Anwendung von Rechencodes auf Aspekte des Systemverhaltens verschoben. Um den neuen Anforderungen für den Sicherheitsnachweis der Kernkraftwerke bei Störfällen mit hochabgebrannten Brennstäben gerecht zu werden, laufen spezifische Entwicklungs- und Forschungsarbeiten, z.B. wird die Methodik zur Bestimmung der Rechenunsicherheit weiterentwickelt. Darüber hinaus sollen die Ressourcen durch internationale Zusammenarbeit und fachlichen Erfahrungsaustausch effizienter eingesetzt werden. Neue Verfahren erlauben es der HSK, Alterungsmechanismen wie z.B. die Neutronenversprödung zu untersuchen, welche die maximale Betriebsdauer der älter werdenden Kernkraftwerke bestimmen sowie Auslegestörfälle mit Hilfe von verifizierten und validierten Programmen beurteilen. 2005 wurden u.a folgende Arbeiten durchgeführt:

- Die Monte Carlo Methode MCNP (Monte Carlo N-Particle code) für die Berechnung von Neutronenfluenzen in Strukturmaterial wurde weiterentwickelt und entspricht so dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik. Erste vorläufige Ergebnisse einer im Reaktordruckbehälter des Kernkraftwerks Gösgen über 10 Jahre mit Neutronen bestrahlten Materialprobe zeigen sehr gute Übereinstimmung mit Messergebnissen.
- Die STARS-Gruppe hat mit der Verifizierung des dreidimensionalen fluiddynamischen Programms (CFD-Methode) begonnen. In einem Experiment wurden die Mischungsvorgänge von Kühlmitteln unterschiedlicher Bor-Konzentration in einem Druckbehälter eines Druckwasserreaktors bei Einspeisvorgängen nachgebildet. Weiter hat sie zur Verifizierung und Validierung des thermohydraulischen Programms TRACE zur Simulation von Transienten und Kühlmittelverluststörfällen von Kernkraftwerken wesentlich beigetragen.
- Basierend auf dem Rechenprogramm SUSA wurde ein Verfahren zur Berechnung der Rechengenauigkeit bzw. -unsicherheit bei der Durchführung von deterministischen *best estimate* Analysen entwickelt, welches bereits in der Reaktorphysik und Thermohydraulik angewandt wurde.

OECD Halden Reactor Project – Fuels and Material [4]: Am *OECD Halden Reactor Projekt* (HRP) beteiligen sich 18 Länder und mehr als 100 Organisationen, die sich mit Forschung im Bereich der Reaktorsicherheit beschäftigen. Der Forschungsreaktor in Halden, Norwegen, bietet die Möglichkeit, Brennelemente und Materialien unter realistischen Bedingungen zu untersuchen und zwar sowohl unter Normalbedingungen als auch bei simulierten Störfällen (s. Fig. 2). Bei dem seit 1958 laufenden Projekt ist die Schweiz im Jahre 1991 beigetreten und wird auch im nächsten Dreijahresprogramm (2006 – 2008) daran teilnehmen. Wie wichtig die Versuche für das Verfolgen von Wissenschaft und Technik sind, wurde unter anderem bei der amerikanischen Behördenkonferenz *Regulatory Information Conference* (RIC) im März 2006 bestätigt. Die amerikanische Sicherheitsbehörde NRC wird sich in Zukunft vermehrt auf die Bewertung der in Halden durchgeführten Versuche abstützen.

Mit ihrer Beteiligung am HRP kann die HSK auf aktuelle Forschungs- und Entwicklungsresultate im Bereich Brennstoff- und Materialverhalten sowie im Bereich Mensch, Technik und Organisation zurückgreifen. Das HRP liefert einerseits die wissenschaftliche Basis für die Erstellung von Kriterien und Richtlinien auf diesen beiden Gebieten. Andererseits schafft das Projekt eine gemeinsame Plattform für den Informationsaustausch zwischen dem PSI, den Schweizer KKW-Betreibern und der HSK. Über das Schweizer Halden Komitee (SHK) stellt die HSK den interessierten Schweizer Partnern das Wissen aus dem HRP zur Verfügung und nimmt gleichzeitig deren Bedürfnisse entgegen. Zudem delegiert die HSK regelmässig junge Fachspezialisten für einen Forschungsaufenthalt nach Halden.

Im Halden-Reaktor wurden wie bereits im Jahr 2004 Experimente durchgeführt, in denen keramische Brennstoffe (UO_2, MOX, innert Matrix) sowie Materialien mit hohen Neutronenfluenzen aus kommerziellen Leichtwasserreaktoren bezüglich ihres Verhaltens bei Hochabbrand untersucht werden. Typische Messgrössen sind Brennstofftemperatur, Spaltgasfreisetzung sowie Dimensionsänderungen von Brennstoff und Hüllrohr. Für dieses Inert-Matrix-Experiment hat das Paul Scherrer Institut den Brennstoff hergestellt, der dann planmässig weiterbestrahlt wurde, um damit im eigenen Hotlabor strahleninduzierte Veränderungen zu untersuchen. Eine wesentliche Rolle



***Figur 2**: Reaktorhalle des Schwerwasser-Versuchsreaktors in Halden*

spielten dabei die Ergebnisse früherer Experimente mit unbestrahltem Brennstoff.

Versuche an Brennelementen unter simulierten *Loss of Coolant Accidents (LOCA)* Bedingungen helfen, wichtige Grenzwerte (wie z.B. maximale Einsatztemperatur, Spaltgasfreisetzung und Dimensionsänderungen) für den Einsatz von herkömmlichen und von neuartigen Brennelementen und Hüllrohren zu untersuchen. In einem solchen Versuch konnte das Aufblähen (*Ballooning*) von Hüllrohren bei einem LOCA simuliert werden. Für 2006 sind LOCA-Versuche mit hoch abgebrannten Brennstäben aus Gösgen und aus Leibstadt sowie ein Hüllrohr-*lift-off*-Experiment mit SWR-Brennstäben aus Leibstadt vorgesehen. Der Halden Forschungsreaktor bietet zusätzlich die Möglichkeit, Materialien zu bestrahlen, welche für Einbauten in Reaktoren verwendet werden. So konnte austenitischer Stahl bestrahlt und der Einfluss der Neutronenstrahlung und der Wasserchemie auf das Risswachstumsverhalten untersucht werden.

MSWI – Wechselwirkung von Kernschmelze und Wasser während eines schweren Reaktorunfalls [5]: Das Projekt *Melt-Structure-Water Interaction* (MSWI) wird von der schwedischen Königlich-Technischen Hochschule (KTH) in Stockholm durchgeführt. Neben der HSK fördern als weitere Partner die schwedische Sicherheitsbehörde (SKI) sowie schwedische Kraftwerksbetreiber die Projektarbeiten. Seit 1996, dem Beginn ihrer Teilnahme an diesem Programm, kann die HSK direkt auf alle erarbeiteten Resultate zugreifen und hat die Möglichkeit, die Forschungsziele mitzubestimmen.

MSWI liefert wichtige Erkenntnisse zu den komplexen und bis heute nicht im Detail verstandenen Abläufen bei schweren Reaktorunfällen. Je umfassender das Verständnis der Unfallphänomene ist, desto präziser können diese modelliert werden. Dadurch werden z.B. besser abgesicherte Risikoquantifizierungen (auf Basis der Stufe-2-PSA; PSA: = probabilistische Sicherheitsanalyse) möglich, die beim Entscheid über technische Nachrüstungen und auch bei der Optimierung von Unfallbeherrschungsstrategien (*Severe Accident Management Guidance*) und der Notfallplanung eine wesentliche Rolle spielen. So liefern die Forschungsresultate Erkenntnisse darüber, mit welchen Methoden und Erfolgsaussichten die Kernschmelze vor oder nach einem Versagen des Reaktordruckbehälters (RDB) gekühlt werden könnten. Weiter erleichtern sie eine Abschätzung des Risikos von Dampfexplosionen bei Kontakt zwischen Schmelze und Kühlmittel, wodurch Abwehrmassnahmen geplant werden können. Bemerkenswert ist die konsequente Ausrichtung der MSWI-Forschungsarbeiten auf unmittelbare Anwendbarkeit der Resultate in den oben genannten Bereichen, insbesondere für Siedewasserreaktoren (SWR, s. Fig. 3). Die Experimente wurden durch Computersimulationen begleitet und die hierfür teilweise neu entwickelten Simulationsmodelle anhand verfügbarer Messdaten validiert.

Im Berichtsjahr 2005 konnte das Verständnis einiger Phänomene bei schweren Unfällen verbessert und entsprechende Unsicherheiten reduziert werden. So wurden Experimente a) zum Verhalten des (noch intakten) RDB in einer späten Phase des schweren Unfalls, b) zur Wechselwirkung der Schmelze mit Wasser nach dem RDB-Versagen (Dampfexplosion) sowie c) zur Kühlbarkeit der Schmelze ausserhalb des RDB mit theoretischen Studien verglichen.

Die erzielten Ergebnisse helfen der HSK, belastbare Informationen zur Beurteilung der Erfolgswahrscheinlichkeit von Severe-Accident-Management Strategien bereitzustellen. Gleichermassen interessant für die HSK ist die im Projekt untersuchte Fragestellung, ob mittels Wassereinspeisung durch die Steuerstabführungsrohre beim SWR ein *Einfrieren* des Kernschmelzvorgangs im RDB (und damit die Verhinderung eines RDB-Versagens) möglich ist. Weiter ist der Zugang zum aktuellen Stand des Wissens auf dem Gebiet der Leichtwasserreaktoren (LWR-) Schwerunfallforschung (auch über die Projektthemen hinaus) für die HSK durch die Mitwirkung am MSWI-Projekt wesentlich.

Figur 3: Druckentlastung in einem Siedewasserreaktor

OECD MCCI – Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Betonboden [6]: Das Projekt Melt Coolability and Concrete Interaction (MCCI) liefert Informationen zur Fragestellung, inwiefern die bei einem schweren Unfall sich bildende Kernschmelze durch Aufsprühen von Wasser kühlen lässt. Die Strategie zur Beherrschung schwerer Unfälle in den Schweizer Kernkraftwerken basiert darauf, genügend Wasser im Containment / Drywell bereit zu halten, so dass die Schmelze beim Versagen des Reaktordruckbehälters darin schockartig gekühlt wird. Falls dies nicht möglich ist, kann es zu einer (beinahe) trockenen Beton-Schmelze-Wechselwirkung kommen. In diesem Fall kann mit den Erkenntnissen aus dem OECD-MCCI-Projekt abgeschätzt werden, ob das Betonfundament durch die Schmelze-Beton-Wechselwirkung durchdrungen wird, was zu einer radioaktiven Kontamination des Bodens und des Grundwassers führen könnte.

Die betrachteten Kühlmechanismen für den Fall, dass die Schmelze auf ein trockenes Betonfundament trifft und nachträglich mit Wasser geflutet wird (Kühlung der Schmelze von oben) sind:

- Wassereindringung in die Schmelze durch Risse und Spalten in der sich bildenden Kruste
- Stossartiger Ausbruch von Schmelze durch die Kruste (Energieabfuhr)
- Mechanisches Versagen der Kruste, so dass durch grosse Risse die Kühlung verbessert wird

Für das Jahr 2005 waren drei Versuche vorgesehen und durchgeführt worden. Der letzte Test aus der Versuchsreihe war ein nicht programmgemäss abgelaufener Melt-Eruption-Test (MET) sowie ein ursprünglich nicht vorgesehener Core-Concrete-Interaction-Test. Diese Tests erlauben es, die noch sehr dünne Datenlage auf diesem Gebiet weiter aufzubessern.

Die durchgeführten Tests haben zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Das Eindringen von Wasser durch Risse und Spalten kann die Kühlbarkeit der Schmelze kurz- und mittelfristig verbessern. Langfristig nimmt jedoch dieser Effekt ab.
- Die sich bildende Kruste ist mechanisch sehr schwach. Es muss damit gerechnet werden, dass die Kruste unter realen Bedingungen auseinander brechen wird. Diese Brüche führen zu einer signifikanten Verbesserung der Kühlbarkeit der Schmelze.
- Die Art des Betons scheint aus noch nicht geklärten Gründen eine Bedeutung für den Ablauf dieser Prozesse zu haben.

OECD ICDE – Erfahrungsaustausch von Ereignissen mit gleichartigen Fehlern: Das International Common-Cause Failure Data Exchange (ICDE) Projekt wird seit 1998 unter der Aufsicht der OECD Nuclear Energy Agency betrieben. Das Ziel ist, den internationalen Erfahrungsaustausch über Ereignisse, bei denen gleichartige Fehler an mindestens zwei (sicherheitsrelevanten) Komponenten gleichzeitig oder innerhalb einer kurzen Zeitspanne aufgrund gemeinsamer Ursache auftraten, so genannte Common-Cause-Failure (CCF), zu fördern.

Zurzeit beteiligen sich neben der Schweiz zehn weitere Länder am ICDE-Projekt, in denen der Grossteil der weltweiten Kernkraftwerke betrieben wird. Im Berichtsjahr 2005 wurden die Datensammlung für die neuen Komponententypen *Füllstandsmessungen* und *Leistungsschalter* abgeschlossen und die Suchfunktion der Datenbank zur Erleichterung der Datenauswertung erweitert.

OECD FIRE – Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken: Ende der 1990er-Jahre untersuchte eine Arbeitsgruppe des CSNI den aktuellen Stand und den Reifegrad der in Brand-PSA-Studien verwendeten Methoden. Basierend auf einer Umfrage in allen kernenergieproduzierenden OECD-Mitgliedstaaten wurde dabei der Mangel an Brandanalysedaten als einer der wesentlichsten Schwachpunkte der Brand-PSA-Studien identifiziert. In der Folge beschloss das CSNI die Durchführung des OECD-FIRE-Projektes. Da Brandereignisse in Kernkraftwerken sehr selten sind, war ein Zusammenschluss auf internationaler Basis zwingend notwendig.

Mit dem Projekt *OECD Fire Incident Records Exchange* (OECD FIRE) wird einem Defizit begegnet indem Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken gesammelt und analysiert werden. Das Projekt trägt dazu bei, die Ursachen, Ausbreitung und Auswirkung von Bränden besser zu verstehen. Es ist unter anderem darauf ausgerichtet, die Brandverhütung weiter zu optimieren und die

phänomenologische und statistische Basis für Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) von Kernkraftwerken zu verbessern. Bisher sind folgende neun OECD-Mitgliedstaaten dem Projekt beigetreten: Deutschland, Finnland, Frankreich, Japan, Schweden, Spanien, Tschechien, USA und die Schweiz. Die in OECD FIRE entwickelte Datenbank steht nur denjenigen Staaten zur Verfügung, die Daten beisteuern.

Per Ende 2005 wurde die erste, dreijährige Projektphase (2003 - 2005) abgeschlossen. Die Struktur der Datenbank ist nun festgelegt. Eine erste Version der Datenbank und der zugehörigen Dokumentation (*Coding Guidelines*, *Quality Assurance Manual*, *Operating Procedures*) liegt vor. Es wurden noch zu wenig Ereignisse gesammelt, um statistisch belastbare Folgerungen zu ziehen. Einzelne vorläufige Trends lassen sich jedoch bereits beobachten. Über die Projektergebnisse wurde beim International Workshop on Fire Probabilistic Safety Assessment in Puerto Vallarta, Mexiko berichtet.

In der Schweiz unterhalten alle vier Kernkraftwerkbetreiber werkspezifische Brand-PSA-Studien, welche regelmässig zu aktualisieren und dem Stand der Technik anzupassen sind. Sowohl für diese Weiterentwicklung der PSA-Studien als auch für deren Überprüfung durch die HSK ist eine belastbare, auf realen Brandereignissen basierende Datenbasis wichtig.

OECD CABRI – Versuche zum Hochabbrandverhalten [8], [9], [10]: Im CABRI-Waterloop-Projekt der OECD/NEA und des *Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)* sollen am Forschungsreaktor CABRI in Cadarache, Frankreich, Versuche zum Hochabbrandverhalten von Brennstäben bei schnellen Reaktivitätsstörfällen in Kernreaktoren durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wird der bisher mit Natrium gekühlte Testloop des CABRI-Reaktors auf Wasserkühlung umgebaut, damit die Versuchsanordnung den in Leichtwasserreaktoren vorhandenen Betriebs- und Störfallbedingungen besser entspricht.

Der CABRI-Reaktor ist weltweit neben dem Forschungsreaktor (Nuclear Safety Research Reactor, NSRR) in Japan die einzige Anlage, an der das Brennstoffverhalten bei schnellen Reaktivitätsstörfällen in Leichtwasserreaktoren realitätsnah simuliert werden kann. Die Versuchsergebnisse des *CABRI International Project (CIP)* werden es erlauben, die festgelegten Sicherheitskriterien für Reaktivitätsstörfälle zu verifizieren und nötigenfalls zu verbessern. Darüber hinaus ermöglichen die Versuchsergebnisse die Störfallphänomene besser zu verstehen und in den verschiedenen Berechnungsprogrammen genauer zu modellieren.

Im Jahre 2005 wurden folgende Projektziele erreicht:

- Erste Komponenten für den Umbau des CABRI-Reaktors wurden angeliefert. Wegen Materialproblemen bei der Verwendung von Zircaloy für die Sicherheitshülle des CABRI-Waterloop verzögert sich jedoch die Inbetriebnahme des umgebauten Reaktors um ein Jahr. Die aktuelle Planung sieht die Durchführung des Qualifikationstests CIP Q für den Waterloop für September 2008 (± 6 Monate) vor. Die weiteren Tests sollen in den Jahren 2009 bis 2011 folgen.
- Die Nachbestrahlungsuntersuchungen zum Test CIP0-1 wurden abgeschlossen.
- Die CIP-Testmatrix wurde überprüft und modifiziert.

Ein Programm zur Untersuchung der dynamischen Spaltgasfreisetzung aus Uranoxid- und MOX-Brennstoff wurde initiiert.

STRAHLENSCHUTZ

Dosimetrie und Aeroradiometrie – Messung von Strahlung und Radioaktivität [11], [12]: Im Bereich der **Dosimetrie** ist die Personendosimetrie der äusseren und inneren Strahlenexposition eine wichtige Aufgabe des Strahlenschutzes. Erhebliche Bedeutung haben auch die Messungen zur Freigabe von Materialien aus kontrollierten Zonen und zur Überwachung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung. Die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit des PSI ist vom Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) als akkreditierte Stelle zugelassen und befasst sich mit Fragen zur Eichung und zur Kalibrierung von Dosimetriesystemen und Strahlenmessgeräten, wie beispielsweise Oberflächenkontaminationsmessgeräte. Die vorliegende Vereinbarung erlaubt der HSK, Expertisen sowie Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik durchführen zu lassen.

An typischen Arbeitsplätzen der Nuklearindustrie sind Neutronenspektren und Referenzwerte für die Überprüfung der Kalibrierung von Personendosimetern bestimmt worden. Die Ergebnisse wurden an einer internationalen Tagung präsentiert und zeigen den Stand von Wissenschaft und Technik auf. Aus Sicht der Aufsichtsbehörde HSK zeigt sich, dass die in der Dosimetrieverordnung festgelegten Anforderungen an einen Neutronen-Personendosimeter sehr anspruchvoll sind, denn die mit einer relativen Genauigkeit von einem Faktor 0.3 bis 3 geforderte Energieabhängigkeit wird nur von einzelnen an der Messkampagne beteiligten Dosimetern erfüllt. Das vom PSI entwickelte und im Einsatz stehende Dosimeter CR-39 ist eines dieser Geräte.

Das Teilprojekt *Kalibrierung und Überprüfung von Fassmessanlagen* ist ebenfalls auf Ende 2005 mit

Kalibrierberichten über die Anlage am PSI und über die Kokillenmessanlage am ZWILAG abgeschlossen worden. Die Methode zur Prüfung von Aerosolverlusten bei den Probenahmen der Abluftüberwachung ist nun soweit fortgeschritten, dass erste Messungen im Kamin des PSI Ost durchgeführt werden konnten. Die Doppelmarkierung der Abluft mit fluoreszierenden Aerosolpartikeln und mit einem inerten Tracer-Gas hat sich bewährt. Im Weitern sind Messungen mit verschiedenen Partikeldurchmessern vorgesehen.

Aeroradiometrische Aufnahmen wurden früher vor allem für die Erzprospektion und geologische Kartierungen eingesetzt. Heute wird das Potenzial von radiometrischen Luftaufnahmen auch für die Lokalisierung und zeitliche Beobachtung von Verstrahlungen und für die Überwachung der Kernanlagen genutzt. Durch Messungen aus der Luft, z.B. mit Hilfe eines Helikopters können radioaktive Strahlenquellen am Boden erfasst werden. Die Aeroradiometrie ist ein Messmittel der Einsatzorganisation Radioaktivität (EOR) des Bundes und untersteht operationell der Nationalen Alarmzentrale (NAZ).

Die seit 1994 eingesetzten flächenhaften, radiometrischen Aufnahmen erlauben eine rasche Erfassung des Strahlungspegels in grösseren, auch unzugänglichen Gebieten. Deshalb gewährleisten die Flugaufnahmen eine kostengünstige und schnelle Erfassung der Strahlungslage bei Unfällen und für die Beweissicherung. Im Berichtsjahr konnte das erneuerte Messsystem durch die zuständige Behörde flugtechnisch abgenommen und das zweite Messsystem erneuert werden. Somit stehen nun zwei identische Messsysteme für den Einsatz bereit. Die Messflüge des Jahres 2005 erfolgten bereits mit dem erneuerten System. Dabei wurden auch die Einsatzkräfte geschult.

Mit den aeroradiometrischen Messungen des Jahres 2005 unter der Leitung der NAZ wurde in keinem Gebiet der Schweiz eine unzulässige, durch den Menschen verursachte Radioaktivität festgestellt. Turnusgemäss wurden die Umgebungen der Kernkraftwerke Gösgen und Mühleberg radiometrisch aus der Luft vermessen. Ein Profil von der Ajoie zum Mattmarkstausee wurde aufgenommen. Die Messdaten für die Stadt Bellinzona und weitere kleine Gebiete im Tessin wurden aufgenommen (s. Fig. 4). Im Zusammenhang mit der Gesamtnotfallübung KRONOS II wurde ein grösseres Gebiet östlich des Kernkraftwerkes Beznau beflogen. Eine Übung zur Quellensuche und ein Vergleich mit in situ Gammaspektrometrie und Dosisleistungsmessungen am Boden vervollständigten das Messprogramm.

Mit dem Kompetenzzentrum ABC der Armee, das ähnliche radiometrische Messsysteme für Land- und Lufteinsätze beschaffen möchte, konnten fachliche Kontakte geknüpft werden. Die Vergleichsmessungen der beiden Systeme im Rahmen einer Eignungsprüfung des neu zu beschaffenden Systems verliefen zufrieden stellend.

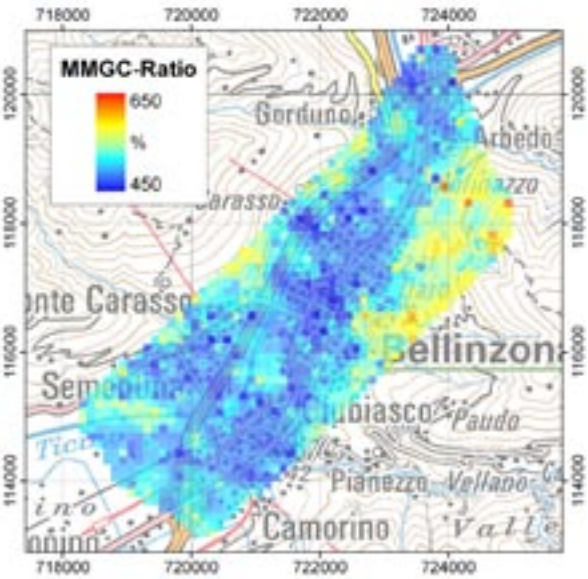
Zusammenarbeit in der Radioanalytik – Radioaktivität im Material, Mensch und Umwelt [13]: Obwohl die Messtechnik im Strahlenschutz einen hohen Stand erreicht hat, ergeben sich immer neue Anforderungen aus der Praxis, denen mit Neuentwicklungen von Messmethoden und mit neuen Lösungsansätzen begegnet werden muss. Beispiele sind Freigabemessungen von grösseren Komponenten von Umweltproben im Rahmen der Immissionsüberwachung oder von Proben zur Überwachung der Inkorporation. Im PSI befasst sich die Sektion Messwesen der Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit mit Fragestellungen dieser Art.

Dank der Zusammenarbeit in der Radioanalytik ist gewährleistet, dass die HSK jederzeit Probenanalysen durchführen lassen kann. Ein wesentlicher Gewinn der Vereinbarung ist die Umsetzung des Stands der Technik der chemischen Trenn- und Analyseverfahren in die Radioanalytik und die nationale Zusammenarbeit in diesem Spezialgebiet. Bedeutend ist auch die Ausbildung von Nachwuchskräften. Im Berichtsjahr konnten alle Projektziele erreicht werden:

- In der Gammaspektrometrie ist der Ge-Detektor für weiche Photonenstrahlung kalibriert und das dafür evaluierte Auswerteprogramm ausgetestet worden. Die zunächst festgestellten Abweichungen konnten durch eine erneute Spezifizierung und Charakterisierung des Detektors durch den Hersteller eliminiert werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass künftig auch Proben mit starker Selbstabschirmung relativ genau (ca. 10 %) gemessen werden können.

- Das Teilprojekt *Anwendung elektrolytischer Methoden zur Trennung reiner Alpha- und Betastrahler* musste nach eingehendem Literaturstudium abgebrochen werden, weil die Redoxpotentiale der interessierenden Elemente so hoch liegen, dass die elektrolytische Zersetzung des Wassers vorher einsetzt und durch die Bildung von Hydroxiden eine selektive Abscheidung verhindern.

- Die Untersuchungen von wasserchemischen Korrosionsprodukten und -prozessen in Kernreaktoren konnten mit einer technischen Mitteilung abgeschlossen werden. Ein externer Auftrag ermöglichte es, die Zusammenhänge zwischen den existierenden Oxidformen und deren Ablagerungen in Abhängigkeit der Fahrweise im Primärkreis zu ermitteln und Wege zur Reduktion der Bildung und Ablagerung von Aktivierungsprodukten im Bereich des Reaktorkerns aufzuzeigen.



Figur 4: *Verhältnis der tief- zur hochenergetischen Zählrate im Messgebiet Bellinzona. Höhere Werte weisen auf durch Menschen verursachte Radioaktivität hin. Hier handelt es sich um Tschernobyl-Fallout, der hauptsächlich noch entlang der Talflanken zu erkennen ist. Kartendaten PK200 © (DV316.2) Swisstopo.*

Die Teilnahme an nationalen und internationalen Vergleichsmessungen in allen Bereichen hat durchwegs qualitativ hoch stehende Ergebnisse erzielt. Im Berichtsjahr erschienen zwei Publikationen, die in nationaler und internationaler Zusammenarbeit entstanden sind.

Für die Aufsichtstätigkeit der HSK sind die Immissionsmessungen in der Umgebung des PSI, des ZWILAG und der KKWs, die Bestimmung der alphastrahlenden Nuklide in Proben aus dem Reaktorkreislauf wichtig. Solche Analysen werden insbesondere bei der Inaktivfreigabe von Materialien gemäss der Richtlinie B04 (ehemals HSK-R-13) und den Reglementen über die Abgabe radioaktiver Stoffe und die Umgebungsüberwachung gefordert.

Kombinierte anti-vaskuläre Tumortherapie: Transport von Wirkstoffen zu Krebszellen [14]: Die strahlentherapeutische Bekämpfung von Tumoren birgt die Gefahr, dass bei einer Erfolg versprechenden Behandlung auch das gesunde, den Tumor umgebende Gewebe, geschädigt wird. Bei einer äusseren Bestrahlung lässt sich dies zum Beispiel durch geeignetes Einblenden oder durch die Überlappung der Strahlenfelder im Bereich des Tumors vermeiden. Bei der Kombination von biologisch/chemischen Agenzien und Bestrahlung könnte man versuchen, durch spezifisch nur in die Zellen des Tumorgewebes eindringende Stoffe den Tumor so stark vorzuschädigen, dass dieser anschliessend einer geringeren Strahlendosis für seine gänzliche Zerstörung bedarf. Bei einer derartigen Therapieart ist es wichtig, den Wirkstoff punktgenau auf die zu behandelnden Tumorzellen zu lenken.

Im vorliegenden Projekt wurden dazu als Transport-Vehikel Liposomen verwendet. Liposomen sind biologische Kleinst-Hohlkugeln mit einer Doppelwand aus Fettmolekülen. Da Liposomen von vielen Geweben nur sehr schlecht aufgenommen werden, wurden in einem weiteren Schritt Teilstücke von Antikörpern in die Liposomenhüllen eingesetzt, damit die Reagenzien in den Zellen besser aufgenommen werden können. Diese Methode wurde als Kombinationstherapie an einem Mausmodell getestet. Mit der Hilfe von zytotoxischen Substanzen wurden Tumorzellen selbst und so genannte tumorassoziierte Makrophagen angegriffen. Die Kombinationstherapie bewirkte, dass das Tumorwachstum in den Mäusen fast gänzlich gestoppt werden konnte.

Artist: Rückhaltung von Aerosolen im Dampferzeuger: KKW-Unfallsequenzen mit Kernschmelzen, so genannte Containment–Bypass-sequenzen, ein Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafte Isolation des Dampferzeugers haben nach heutigem Kenntnisstand zwar eine sehr kleine Eintretenswahrscheinlichkeit, tragen aber aufgrund der grossen Freisetzung von radioaktiven Aerosolen in die Umgebung deutlich zum Risiko eines KKW bei. Der Aerosoltransport durch die Dampferzeuger in die Umgebung soll deshalb realistisch modelliert werden.

Im Rahmen des Projektes Aerosol Trapping in a Steam Generator (ARTIST) werden von einem internationalen Forschungs-Konsortium unter Leitung des PSI Experimente durchgeführt, welche Daten und Informationen über den Aerosoltransport durch die Dampferzeuger bei unterschiedlichen Störfallbedingungen erfassen und für die Modellentwicklung aufbereiten sollen. Die Untersuchungen werden an einem Dampferzeuger–Modell durchgeführt, dessen Grösse und Aufbau die realen thermohydraulischen Gegebenheiten der Framatome–Dampferzeuger widerspiegelt, wie sie im KKW-Beznau eingesetzt sind.

Das im Jahre 2003 gestartete und bis 2007 abzuschliessende ARTIST-Projekt ermöglicht die Entwicklung realistischerer Modelle für den Aerosoltransport durch die Dampferzeuger (und ähnlich komplexe Strukturen), die danach in den Level-2 PSA-Studien eingesetzt werden können. Ferner werden Erkenntnisse über die Wirksamkeit von Accident Management Massnahmen gewonnen, die zur Bewertung dieser Massnahmen in den Level-2 PSA-Studien genutzt werden können. Die dynamischen und komplexen Vorgänge werden so besser verstanden, wodurch der Risikobeitrag genauer modelliert und entsprechende Störfallsequenzen zuverlässiger abgeschätzt werden können.

THEMENBEREICH MENSCH, ORGANISATION UND SICHERHEITSKULTUR

OECD Halden Reactor Project: Wie verhält sich der Mensch im Zusammenhang mit Ma-

schinen [4]: Die Erforschung des menschlichen Leistungsvermögens (*Human Performance*) bei der Bedienung komplexer Systeme bildet ein Schwerpunkt der MTO-Forschung in Halden. Seit einigen Jahren steht die Verbesserung des Wissensstands in der kognitiven Ergonomie im Vordergrund. Derartige Studien sind nur dank den einzigartigen Einrichtungen, wie dem Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB) möglich.

In der Programmperiode 2003-2005 wurden verschiedene Versuchsserien im HAMMLAB durchgeführt, deren Ergebnisse auch für probabilistische Sicherheitsanalysen anwendbar sind, zum Beispiel zur Identifikation menschlicher Fehler und deren Eintretenswahrscheinlichkeit (s. Fig. 5).

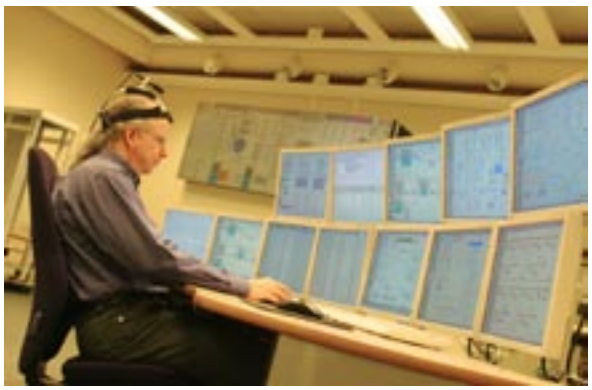
Im Bereich *Design & Evaluation of Human System Interfaces and Control Rooms* wurde ein Darstellungskonzept (*function-oriented displays*) für Kommandoraumbildschirme auf seine Anwendbarkeit erprobt. Ebenfalls wurden Versuche zur Ergonomie von grossflächigen Übersichtsbildschirmen durchgeführt. Für deren Gestaltung wurde ein Leitfaden entwickelt.

Im Bereich der Visualisierungstechnologien (*Visualisation Technologies*) erforscht Halden Virtual Reality (VR)-Techniken für die Ausbildung von Anlageoperateuren (s. Fig. 6). Mit VR-Werkzeugen kann sich das Betriebspersonal mit komplexen Abläufen unter sicheren Trainingsbedingungen vertraut machen. So kann beispielsweise die Strahlendosis für das Personal bei Reparatur- und Instandhaltungsarbeiten reduziert werden, wenn die Verweilzeit in der Strahlenzone verringert wird.

Im Programmbereich *Operation & Maintenance* wurde u.a. eine neue Methode für die Zustandsüberwachung elektrischer Kabel entwickelt. Die neue Methode besitzt grosses Potential in der praktischen Anwendung, da durch sie defekte Stellen gefunden werden können ohne die Kabel freilegen zu müssen. Diese und ähnliche Prüfmethoden werden mit der fortschreitenden Alterung der Kernanlagen voraussichtlich immer dringlicher werden.

Der Programmbereich *Sicherheit digitaler Systeme* (*Digital System Safety*) befasst sich mit Methoden für die Spezifikation, Tests, Sicherheitsüberprüfung, Risikoanalysen sowie für die Qualifizierung von Hard- und Software. In der vergangenen Dreijahresperiode hat die Halden-Forschergruppe einen zusammenfassenden Bericht über die Forschungsergebnisse der letzten zehn Jahre, ein so genannter *Lessons learned*- Bericht, erstellt.

HRA – Human Reliability Analysis: Wie verhalten sich Operateure bei Störfällen? [15]: Das 1997 initiierte Projekt *Human Reliability Analysis* (HRA) untersucht den Einfluss menschlicher



Figur 5: *Das Halden Man-Machine Laboratory (HAMMLAB), wo moderne Mensch-Maschine Schnittstellen ausgetestet werden (Quelle: OECD Halden Reactor Project)*

Figur 6: *Halden Virtual Reality (VR) Lab. Die Visualisierungstechnolgie macht Strahlenfelder sichtbar (Quelle: OECD Halden Reactor Project)*

Handlungen auf Störfälle in Kernkraftwerken, analysiert sie und ermittelt deren Fehlerwahrscheinlichkeiten. Damit ist die HRA ein wichtiger Bestandteil der Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA).

Die aktuellen Schwerpunkte der HRA-Forschung sind:

- Systematische Erfassung und Quantifizierung von ungeplanten, menschlichen Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen,
- Dynamische PSA (zeitabhängige Modelle für das Anlagen- und Personalverhalten sollen die Interaktionen zwischen Mensch und Maschine besser abbilden),
- Dynamische Aspekte von Operateurhandlungen,
- Modellierung von Teamverhalten und
- Reduktion der Unsicherheit bei der Bestimmung von Fehlerwahrscheinlichkeiten.

Die PSI-Forschungsgruppe beteiligt sich auch an führenden, internationalen Arbeitsgruppen im Bereich HRA. Ferner leitet sie im Rahmen der Working Group on Risk Assessment (WGRISK) der OECD-NEA ein Projekt zur Entwicklung einer HRA-Datenbank.

Im Berichtsjahr wurde eine Methode zur Quantifizierung von *Error of Commissions* (EOCs) und die Entwicklung von Operateur-Simulationsmodellen für zukünftige, dynamische PSA-Modelle entwickelt:

- Error of Commissions: Quantifizierung von EOCs, um sie in einer PSA berücksichtigen zu können.
- Die EOCs wurden im Rahmen eines vom Kernkraftwerk Beznau unterstützten Pilotprojektes erfolgreich in den Rechnungen angewendet. Neben Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen wurde ein abschliessender Bericht über die werkspezifische Studie erstellt.
- Bei der Quantifizierung der identifizierten EOCs (d.h. die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der menschlichen Handlung, welche zum betrachteten EOC führt) wurde der auf THERP (Technique of Human Error Rate Prediction) und *Expert Judgement* beruhende Ansatz verfeinert. Dazu wurden mit Hilfe von realen EOC-Ereignissen die Einflüsse, welche eine Fehlentscheidung der Operateure begünstigen oder weniger wahrscheinlich machen, besser charakterisiert.
- Dynamische PSA: Mit dynamischen PSA-Modellen (d.h. zeitabhängige Modelle für das Anlagen- und Personalverhalten) kann die Interaktion zwischen Mensch und Anlage realitätsnah abgebildet werden. Sind wichtige Anlageparameter zu beliebigen Zeitpunkten verfügbar, verbessert dies die Modellierung der Diagnoseprozesse von Operateuren. Um das Verhalten der Schicht bei einem Frischdampfleitungsbruch zu untersuchen, wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die Thermohydraulik, die probabilistische Bruchmechanik und das Operateurverhalten berücksichtigt. Da im Modell die entsprechenden Vorschriften abgebildet wurden, kann die Software selber Szenarien entwickeln, die auch EOCs beinhalten können. Im Berichtsjahr wurden die Analysen vervollständigt, so dass verschiedene Szenarien bis zu einem gewissen Endzustand simuliert werden können.

Das im HRA-Projekt erarbeitete Wissen steht der HSK im Rahmen ihrer Aufsichtstätigkeit zur Verfügung. Seit 1999 liefern die PSI-Forscher Expertisen zur Überprüfung von werkspezifischen HRA-Studien. Für die Fallbeispiele werden Störfallvorschriften von Kernkraftwerken in der Schweiz herangezogen und aus dem Blickwinkel der Forschung hinterfragt. Solche Betrachtungen haben schon zu Beginn des Projektes zu sicherheitstechnischen Verbesserungen der Vorschriften geführt.

Damit die menschlichen Fehlhandlungen, die EOCs, langfristig umfassender in der PSA abgebildet werden können, sind effiziente Methoden zu deren Identifikation und Quantifizierung zu entwickeln. Angesichts der wachsenden Bedeutung der PSA im Rahmen der integrierten Aufsicht der HSK kommt der Entwicklung dieser Methode eine hohe Bedeutung zu. Dem PSI ist es gelungen, ein Werkzeug zur effizienten Identifikation von PSA-relevanten EOCs bereit zu stellen. Die Entwicklung eines Quantifizierungsverfahrens für EOCs gestaltete sich aufwändiger als ursprünglich angenommen. Die Möglichkeiten und Grenzen bezüglich der probabilistischen Behandlung der EOCs sollen in die Richtlinie über den Umfang und die Qualität einer PSA einfliessen.

UMGANG MIT RADIOAKTIVEN ABFÄLLEN, STILLLEGUNG UND ENTSORGUNG

Felslabor Mont Terri: Endlagerung radioaktiver Abfälle im Opalinuston? [16]: Das Mont Terri Forschungsprogramm hat für die Beurteilung der Sicherheit von geologischen Tiefen-lagern einen hohen Stellenwert, da es wichtige Grundlagendaten für die Sicherheitsanalyse und die bautechnische Machbarkeit im Opalinuston liefert. Die Teilnahme am Mont Terri Projekt ermöglicht der HSK, die von ihr und ihren Experten entwickelten Modelle und Rechenwerkzeuge, die bei der Überprüfung von Sicherheitsanalysen eingesetzt werden, an konkreten Datensätzen des Felslabors zu validieren. Das Projekt stellt daneben auch eine wichtige Plattform dar, um den internationalen Stand der Forschung zu verfolgen. Mit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS, Deutschland) und dem Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (IRSN, Frankreich) sind neben der HSK zwei weitere Sicherheitsbehörden am Mont Terri Projekt beteiligt. Am Forschungsprogramm beteiligen sich insgesamt 12 Organisationen aus 6 Ländern (Schweiz, Frankreich, Deutschland, Spanien, Belgien und Japan).

Im Felslabor Mont Terri werden seit zehn Jahren hydrogeologische, geochemische und felsmechanische Experimente durchgeführt, um die Eignung des Opalinustons für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle zu untersuchen. Gegenwärtig laufen 24 Experimente, wobei die HSK das EZ-B Experiment (*Mechanical Heterogeneities and Fracture Generation in the Excavated Disturbed Zone*) in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgeologie der ETH-Zürich durchführt.

Ziel des EZ-B Experiments ist die Charakterisierung und Modellierung der Kluftbildung in der Auflockerungszone *Excavated Disturbed Zone* (EDZ), die beim Ausbruch eines Stollens infolge der Spannungsumlagerungen im näheren Stollenumfeld entsteht. Das in der Auflockerungszone gebildete EDZ-Kluftnetzwerk kann entlang des Stollens zu präferentiellen neuen Fliesspfaden führen und die Sicherheit eines Endlagers beeinflussen. Mit dem EZ-B Experiment sollen die Mechanismen der Kluftbildung sowie Häufigkeit, Verteilung, Ausdehnung und Geometrie der EDZ-Klüfte analysiert und mit numerischen Modellsimulationen verglichen werden.

Die strukturgeologische Analyse der beim EZ-B Experiment gewonnenen Bohrkerne und die Charakterisierung der EDZ-Klüfte konnten bis Ende 2005 abgeschlossen und in einem Bericht dokumentiert werden (Technical Note 2005-30). Die geophysikalischen Messdatensätze (single- und cross-hole seismic measurements) können aufgrund ihres grossen Umfangs erst im Laufe des Jahres 2006 vollständig aufgearbeitet und ausgewertet werden. Gleiches gilt für die Auswertung der zu verschiedenen Zeiten erhobenen 3D Laser-Scanner-Messungen sowie für die Modellierung der Kluftbildung.

Die durchgeführten numerischen Modellrechnungen liefern zusammen mit den Ergebnissen des EZ-B Experimentes einen wertvollen Beitrag zur Beurteilung der möglichen Auswirkungen der EDZ auf die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers. Sie tragen wesentlich zu einem besseren Verständnis der komplexen Vorgänge in der Auflockerungszone bei.

Nationale Zusammenarbeit

Innerhalb der Schweiz haben die Institute, welche die Forschungsarbeiten ausführten effizient und kooperativ zusammengearbeitet. Regelmässige Gespräche mit der HSK ermöglichten eine Ausrichtung der Fachinhalte entsprechend der aktuellen Bedürfnisse, wobei auch ausführlich über geplante Nachfolgeprojekte sowie über die Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und Aufsichtspraxis diskutiert wurde. Neben dem *Paul Scherrer Institut* findet im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung die Zusammenarbeit mit folgenden Institutionen statt: Nationale Alarmzentrale (NAZ) in Zürich, Sektion für die Überwachung der Radioaktivität (SUER) in Fribourg, Institut de Radiophysique Appliquée (IRA) in Lausanne, Universität Bern, ETH Zürich, EPF Lausanne, Functional Genomics Center der Universität Zürich, Universität Fribourg, Zwischenlager Würenlingen AG (ZWILAG).

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden Projekte sind direkt oder indirekt in Forschungsprojekte des 5. und 6. EU-Rahmenprogramms eingebunden:

RIKORR [1]: EURATOM, Nr. FIKS-2000-00048, CASTOC – Crack growth of low alloy steel for pressure boundary components under transient light water reactor operating conditions

STARS [3]: EURATOM, Nr. FIKS-2000-00041, NACUSP – Natural circulation and stability performance of BWRs

OECD Halden Reactor Project [4]

Zusammenarbeit in der Dosimetrie [11]: EURATOM, Nr. FIKR-2001-00175, EVIDOS – Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields

Aeroradiometrie 2 [12]: 5. EURATOM, Nr. FIKR-2000-20098, ECCOMAGS – European calibration and coordination of mobile and airborne gamma spectrometry

Bei den folgenden Projekten handelt es sich um internationale Kooperationsprogramme:

MSWI Project During Postulated Severe Accidents in LWRs [5]

OECD-MCCI [6]

OECD-OPDE [7]

OECD-ICDE

OECD-FIRE

OECD CABRI Water Loop Project [8], [9], [10]

US-NRC & HSK Co-Operative Research Activities

OECD Halden Reactor Project [4]

Felslabor Mont Terri [16]

Weitere internationale Kooperationen im Rahmen von Forschungsprojekten, internationalen Organisationen und Standardisierungsaktivitäten können den einzelnen Projektberichten entnommen werden.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Die Projekte konnten im Berichtsjahr planmässig abgewickelt werden. Sie lieferten wichtige wissenschaftliche Grundlagen, welche direkt oder indirekt in die Aufsichtstätigkeit der HSK einfliessen werden. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche der HSK und umgekehrt erfolgt dank der sehr guten Arbeitsbeziehungen mit den Projektleitern und ihren Teams reibungslos. Der Kompetenzerhalt und -ausbau innerhalb der Aufsichtsbehörde sowie die Bereitstellung von interessanten Forschungsthemen für die Wissenschaftler sind somit gewährleistet. Der Trend zu internationalen Forschungskooperationen setzte sich auch in diesem Jahr fort.

Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2006 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den einleitend beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils handelt es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten. Das Strategiepapier zum Thema *Strategie Regulatorische Sicherheitsforschung* wurde erstellt, um die verschiedenen Themenbereiche nach ihrer Bedeutung für die Sicherheit, für den Kompetenzerhalt und für die Öffentlichkeit, sowie nach ihrer Dringlichkeit zu gewichten. Es bildet die Grundlage für die Ausrichtung der regulatorischen Sicherheitsforschung.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden
Die Berichte sowie weitere Informationen sind im HSK-Dokumentenarchiv unter www.hsk.ch erhältlich.

[1] H.P. Seifert, S. Ritter, U. Ineichen, B. Gerodetti (hans-peter.seifert@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, ***Risskorrosion in druckführenden Komponenten des Primärkreislaufs von SWR, RIKORR II*** (JB)

[2] M. Niffenegger, B. Tirbonod (hans.leber@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Labor für Werkstoffverhalten, 5232 Villigen PSI, ***Diagnostik für Werkstoffschädigung durch Ermüdung*** (JB)

[3] M. A. Zimmermann (martin.zimmermann@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, ***Safety Research in relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland (STARS)*** (JB)

[4] T. Bjorlo, F. Øwre (thorbjorn.bjorlo@hrp.no), Halden Reactor Project, N-1750 Halden, Norway, ***OECD Halden Reactor Project: Nuclear Safety and Reliability, Fuels and Safety-Man-Machine-Systems Research*** (JB)

[5] Nam Dinh, R.C. Hansson, A. Karbojian, W. Ma, H.S. Park and B.R. Sehgal (namdinh@safety.sci.kth.se), Division of Nuclear Power Safety - Royal Institute of Technology Sweden, ***MSWI Project during Postulated Severe Accidents in LWRs*** (JB)

[6] A. Hügli (Andre.hügli@hsk.ch), HSK, 5232 Villigen, ***Begutachtung 2004 für das Projekt OECD-MCCI*** gemäss Bericht von Sudhamay Basu (sxb2@nrc.gov), U.S. Nuclear Regulatory Commission, OECD MCCI (SB)

[7] E. Mathet et al. Eric.mathet@oecd.org, ***Piping Failure Data Exchange Project*** (JB)

[8] IRSN-Report 2005-77: ***CABRI Waterloop Programme:***

[9] ***CABRI Status Report No. 10***, 23.09.2005

[10] ***Summary Record of the 12th Meeting of the Technical Advisory Group of the OECD/NEA-IRSN CABRI Waterloop Project***, Aix-en-Provence, France, 29 – 30 June 2005

[11] CH. Schuler, M. Boschung, G. Butterweck, T. Schange, C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, ***Zusammenarbeit in der Dosimetrie*** (JB)

[12] B. Bucher, G. Butterweg, R. Rybach, G. Schwarz (benno.bucher@hsk.ch, HSK, 5232 Villigen, ***Aeroradiometrische Messungen***

[13] J. Eikenberg, I. Mailand (jost.eikenberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, ***Zusammenarbeit in der Radioanalytik*** (JB)

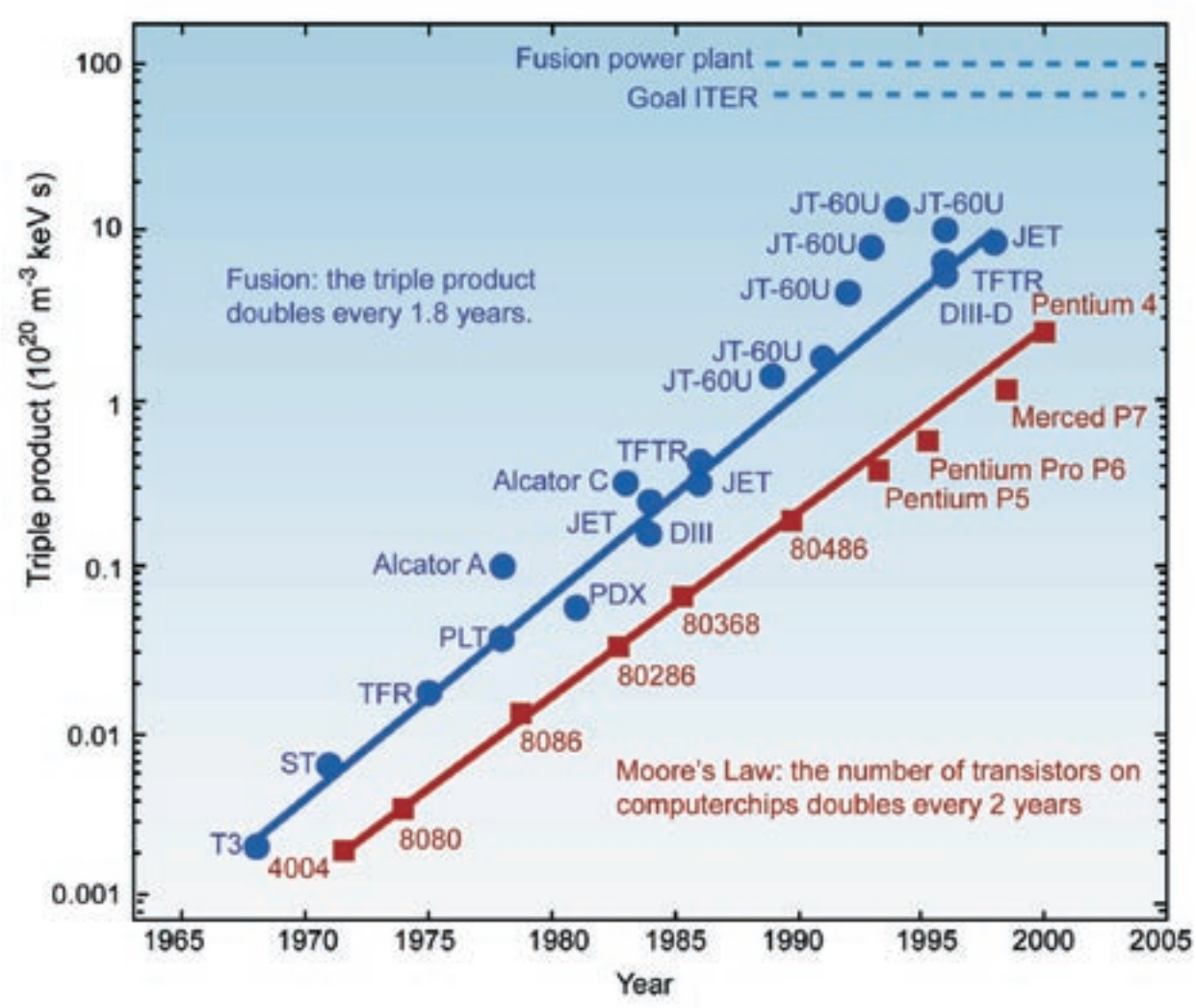
[14] K. Ballmer-Hofer, C. Marty (kurt.ballmer@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, ***Kombinierte antivaskuläre Tumortherapie*** (JB)

[15] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, ***Human Reliability Analysis (HRA) Applications and Methods Development*** (JB)

[16] E. Frank (loew@erdw.ethz.ch), HSK, 5232 Villigen, ***Felslabor Mont Terri*** (JB)

FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Andreas Werthmüller
andreas.werthmueller@sbf.admin.ch



Le progrès de la recherche sur la fusion contrôlée

L'avancement de la recherche sur la fusion en comparaison avec l'évolution de la puissance des micro-processeur : dans le passé la fusion s'est développée plus vite que l'informatique.

Centres de gravité du programme et buts fixés

L'ampleur et les coûts de ce domaine très particulier de la recherche énergétique rendent une étroite coopération internationale indispensable. Aussi, en Suisse, les activités de recherche en fusion thermonucléaire sont-elles entièrement intégrées au programme fusion de la Communauté Européenne de l'énergie atomique (Euratom), auquel notre pays est associé depuis 1978. Financées par le Domaine des EPF, le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), le Secrétariat d'État à l'éducation et à la recherche (SER) et l'Union Européenne (UE), elles sont effectuées, pour l'essentiel, à l'EPFL. À côté des infrastructures du Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP), l'EPFL dispose d'installations au PSI. En outre, avec un soutien financier de l'OFEN, des recherches portant sur le comportement physico-chimique des parois des réacteurs de fusion après interactions avec le plasma sont conduites à l'Institut de physique de l'Université de Bâle. Sur le plan administratif, la recherche en matière de fusion thermonucléaire est suivit par le SER.

Travaux effectués et résultats acquis pour 2005

L'essentiel en bref…

- Le 28 Juin 2005, les six partenaires internationaux d'*ITER* (UE, y compris la Suisse, Fédération de Russie, Chine, Corée du Sud, Japon, et les USA) se sont mis d'accord sur le choix de Cadarache en France, comme site du projet. Cet accord ouvre la voie à la finalisation des divers accords sur *ITER*. Vers la fin de l'année, l'Inde s'est également jointe au projet *ITER* en tant que septième partenaire.
- *En parallèle avec l'accord sur ITER*, l'UE et le Japon se sont mis d'accord pour co financer un programme visant à développer au plus tôt un réacteur de fusion de démonstration. Ce programme, appelé "Broader Approach", comprend une phase d'ingénierie de l'installation d'irradiation des matériaux (*IFMIF*), la construction d'un *tokamak* supraconducteur au Japon et l'exploitation d'un centre de recherche sur la fusion au Japon.
- En septembre 2005, la Confédération a prolongé pour une année quatres accords de coopération avec Euratom : le Contrat d'Association, l'Accord d'exécution sur le développement de la fusion *EFDA* (*European Fusion Development Agreement*), l'Accord d'implémentation *JET* et l'Accord d'exécution sur la mobilité des chercheurs.
- À l'EPFL, les recherches se sont poursuivies en physique expérimentale et théorique des plasmas (chauffage, turbulences, effets de bord, etc.), sur diverses technologies importantes pour les réacteurs de fusion (systèmes de chauffage, diagnostic) et, à son antenne localisée au PSI, sur la supraconductibilité et les matériaux.
- L'Université de Bâle a collaboré avec les équipes des *tokamaks JET* (à Culham, UK), *TEXTOR* (à Jülich, DE), *Tore Supra* (à Cadarache, FR) et *TCV* (au CRPP/EPFL) pour caractériser les changements de surface que subissent des miroirs de tungstène et de molybdène après une exposition au plasma.

***International Thermonuclear Experimental Reactor* (*ITER*)**

Le 28 Juin 2005, les 6 partenaires *ITER*, l'UE, y compris la Suisse, la Fédération de Russie, la Chine, la République de Corée du Sud, le Japon et les États-Unis ont approuvé le choix du site européen, à Cadarache près d'Aix-en Provence, comme site du projet *ITER*. Peu de temps après, l'Inde s'est jointe au projet comme septième partenaire. C'est donc des pays qui représentent tant des pays développés ou émergents et dont la population totale est environ la moitié de la population mondiale, qui seront les acteurs principaux du développement de cette forme d'énergie compatible avec les principe de l'Agenda 21 et ses concepts de durabilité. Les travaux pour finaliser les divers accords internationaux nécessaires à la construction d'*ITER* et les travaux préparatoires, tant dans l'UE qu'en France, ont progressé à un rythme soutenu. Il est prévu que tout le paquet d'accords sera bouclé dans le courant du printemps 2006 de sorte

Figure 1 : *la maquette du site d'ITER avec au centre le bâtiment qui hébergera la salle de montage et le puit du réacteur.*

que les signatures formelles pourront se faire dans la deuxième moitié de 2006. La direction du projet *ITER* se met en place en parallèle avec la finalisation des accords.

En parallèle avec l'accord sur le site, l'UE et le Japon sont convenu d'un programme visant à développer au plus tôt un réacteur de démonstration. Ce réacteur, dénommé *DEMO*, sera conçu pour produire de l'électricité et prouver l'utilisation de la fusion sous conditions économiques. Les projets du programme EU-Japon seront coordonnés par des équipes européenne et japonaise. Sa réalisation rapide nécessite une exploitation efficace d'*ITER* basée sur des expériences préparatoires sur des machines "satellites" comme le *Joint European Torus* (*JET*) ou un nouveau *tokamak* (appelé temporairement *NCT*) qui sera construit au Japon. En parallèle, la science et la technologie des matériaux devront être développées. Dans ce cadre, une installation d'irradiation avec un faisceau intense de neutrons à 14 MeV, soit l'*International Fusion Material Irradiation Facility* (*IFMIF*) devra jouer un rôle crucial. Les études d'ingénierie d'*IFMIF* seront poursuivies avec la réalisation d'un prototype de l'accélérateur de deutérons, les études sur une cible de lithium permettant de produire les neutrons et sur un porte-échantillons pour *IFMIF*. Finalement, un centre de recherche sera établi au Japon pour permettre diverses activités communes, comme les études sur *DEMO* ou la simulation numérique.

Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

Pratiquement toute la recherche effectuée en Europe dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée se déroule au sein d'un programme de l'UE, dans le cadre du traité Euratom. Ce programme, rattaché aux Programmes-cadres et dont le budget représente environ 40 % des sommes totales attribuées à la fusion en Europe, finance l'exploitation et l'utilisation des grandes infrastructures de recherche, comme le *JET* à Culham, Royaume-Uni, de même que la participation européenne à *ITER*. En outre, il co-finance de nombreuses activités conduites dans des laboratoires nationaux qui lui sont associés, comme, pour la Suisse, le CRPP de l'EPFL. Au titre du 6e programme cadre (2002-2006) d'Euratom, la recherche en fusion dispose ainsi de 750 millions d'Euros, dont 200 millions sont réservés pour la participation européenne à *ITER*. Un volet important de ce programme est l'*EFDA* (*European Fusion Development Agreement*) qui gère l'exploitation de *JET* et les travaux préparatoires d'*ITER* en Europe, de même que de nombreuses recherches en physique des plasmas et en technologies importantes pour la fusion.

Euratom et la Suisse

L'Accord de coopération entre la Confédération suisse et Euratom, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre de durée illimitée. Des accords plus spécialisés, quant à eux, fixent les modalités de la coopération européenne en matière de fusion. Ces accords sont actuellement au nombre de quatre: l'*EFDA* (*European Fusion Development Agreement*), le *JIA* (*JET Implementing Agreement*), qui règle l'utilisation de la grande installation européenne, l'*Accord sur la mobilité*, qui encourage et facilite les échanges de personnel entre les associations, et le *Contrat d'association*, qui précise les rapports scientifiques, techniques, administratifs et financiers

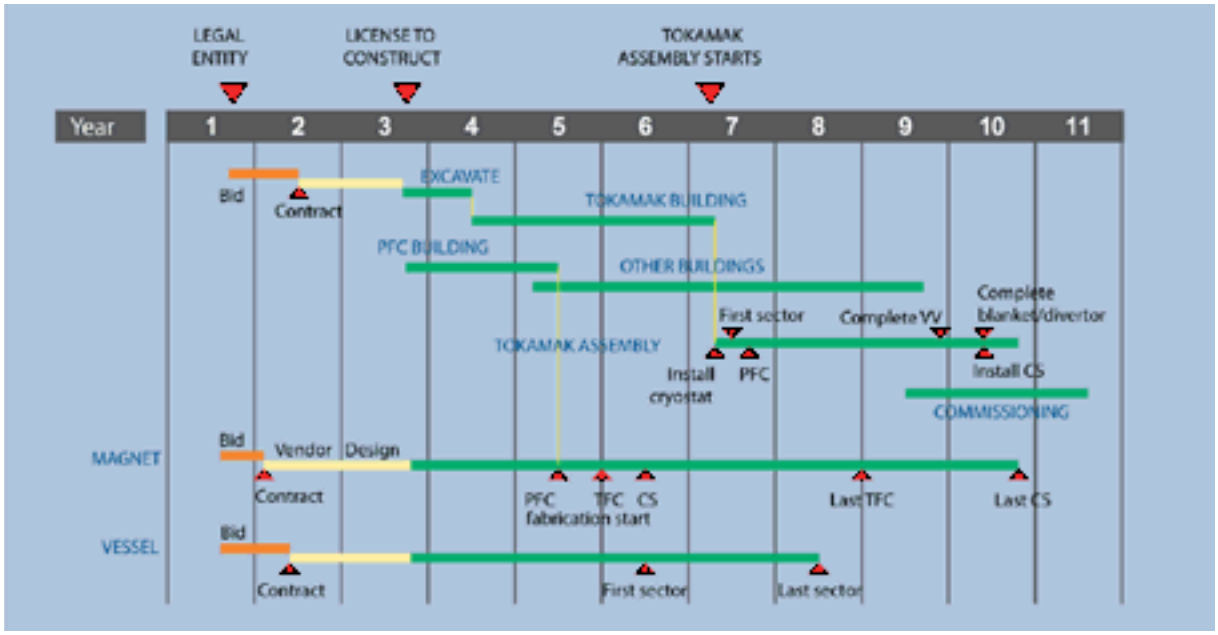


Figure 2 : *la planification du projet ITER prévoit une durée de construction d'environ 10 ans.*

du CRPP/EPFL avec le programme fusion européen. Tous ces accords sont en vigueur jusqu'à la fin 2006, soit jusqu'à la fin du 6e PCRD Euratom. La préparation des accords pour le 7e PCRD a débuté en 2005 et sera terminée en 2006. En plus de sa contribution annuelle aus PCRD de l'UE, la Suisse a participé avec 396'606 Euros au *JET Joint Fund* (une caisse commune pour l'exploitation du JET prévue aux termes du JIA). Ces contributions sont couvertes par les crédits ouverts pour financer la participation suisse au 6e PCRD de l'UE et qui sont gérés par le SER.

Le CRPP : l'Association Suisse/Euratom

Les activités du programme fusion européen sont très orientées vers *ITER*. À cet égard, *JET* est devenu un véritable banc d'essai pour les technologies d'*ITER* car le tokamak européen est fondé sur le même concept de confinement magnétique du plasma. En fait, l'année 2005 a été marquée par la décision d'initier un important programme pluri-annuel de modifications de la machine elle-même. Ces modifications portent sur une couverture de la paroi interne de JET en béryllium, matériau identique à celle de la paroi d'*ITER*, une augmentation de la puissance de chauffage par injection de particules énergétiques et par l'implémentation de nouveaux diagnostics. Le but de ce programme est une meilleure simulation et prédiction des conditions et scénarios d'opération d'*ITER*.

Par ailleurs, le programme européen est aussi fortement impliqué dans la recherche sur les matériaux, y compris les études préliminaires de la future grande source de neutrons *IFMIF*. En effet, la conviction est maintenant générale que cette dernière est aussi indispensable qu'*ITER* sur la voie de la domestication de la fusion. Dans cadre de la "*Broader Approach*", l'UE et le Japon ont décidé de mettre en œuvre un programme de recherche et développement axé sur *IFMIF*, visant à développer l'accélérateur, la cible de lithium et la cellule d'irradiation.

Comme par le passé, le CRPP a continué en 2005 d'être étroitement associé à toutes ces activités. Les personnes qui désirent plus détails sur les recherches du CRPP peuvent commander le Rapport annuel que publie cette institution (http://crppwww.epfl.ch). Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée portent, d'une part, sur la physique du *tokamak*, la technologie de la fusion (en particulier, le chauffage du plasma), la théorie et la simulation numérique à l'EPFL et, d'autre part, sur la supraconductivité et les matériaux au PSI. Dans le cadre des perfectionnements apportés au *JET* mentionnés plus haut, le CRPP a développé un nouveau système d'antenne dont une partie a été installée en 2005. En outre, un physicien du CRPP a été nommé *JET Task Force Leader* pour l'étude des phénomènes de bords en physique des plasmas.

Le *TCV* (*Tokamak à Configuration Variable*) est la grosse installation à disposition du CRPP à Lausanne. Elle présente la propriété unique au monde de pouvoir produire des plasmas de formes différentes, ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futures réacteurs de fusion. C'est dans ce contexte que les recherches en physique des plasmas se sont poursuivies à Lausanne en 2005. Elles ont permis de caractériser plus avant les propriétés du chauffage par ondes cyclotron-électroniques, les effets de bords et de diverses perturbations sur le comportement du plasma et la physique des barrières de confinement internes au plasma. De nombreux progrès ont été apportés dans tous ces domaines.

Le groupe de théorie du CRPP a continué en 2005 ses études dans plusieurs domaines d'excellence qui lui sont traditionnels. Ce sont des études d'instabilité dans les plasmas qui affectent les phénomènes de transport d'énergie, l'exploration de nouvelles structures de confinement magnétiques tri dimensionnelles le support à l'interprétation des expériences sur *TCV* et aux activités de la *Task Force* européenne sur la modélisation des *tokamaks*, *Integrated Tokamak Modelling Task Force*. Ces recherches utilisent d'une manière intensive les outils de calcul numérique et bénéficient, outre d'un réseau de plus de 100 PC, d'un nouveau ordinateur massivement parallèle, le *Blue Gene* d'IBM, possédant environ 10'000 processeurs de haute performance.

La nouvelle installation pour la physique des plasmas, *TORPEX* (*Toroïdal Plasma Experiment*), mise en service en 2003, est devenue entièrement opérationnelle. Elle a confirmé qu'elle se prête bien à l'étude des phénomènes de turbulence et de transports anormaux dans les plasmas toroïdaux. C'est aussi un excellent instrument didactique pour la formation de physiciens spécialisés sur les plasmas et plusieurs thèses de doctorat sont en voie de finition.

En supraconductivité, l'installation *SULTAN* du CRPP, également située au PSI, peut mettre à son actif une pleine année de tests pour des prototypes de câbles supraconducteurs destinés aux futurs aimants d'*ITER*. Il s'agissait essentiellement d'études d'optimisation de conducteurs avec des brins de Nb_3Sn avec des propriétés améliorées et de conducteur de type "*cable in conduit*". L'UE a également reconnu le CRPP comme centre de compétence dans ce domaine en décidant de lui confier en 2005 une deuxième installation importante, le "Dipôle Européen", qui servira avec *SULTAN* aux essais de qualification des conducteurs d'*ITER*.

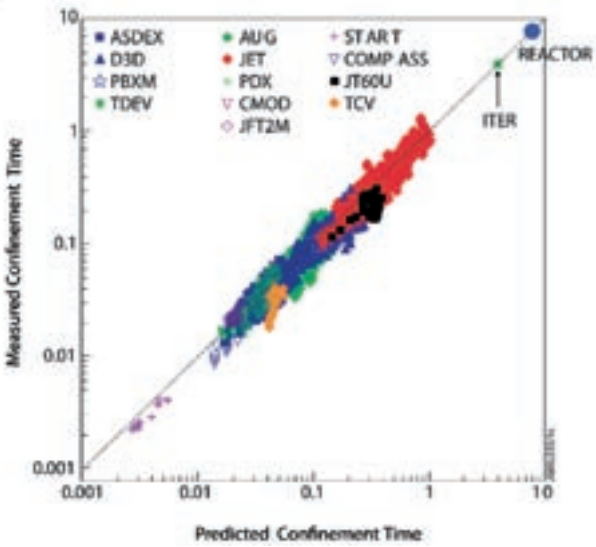


Figure 3 : *le réacteur d'ITER nous rapproche considérablement de l'objective d'utiliser la fusion comme source d'énergie du quotidien.*

L'attrait des futures centrales électriques de fusion dépend beaucoup du développement de matériaux dits «à basse activation», c'est-à-dire qui, soumis à un intense bombardement neutronique pendant des périodes prolongées, ne développent pas d'isotopes radioactifs à longue durée de vie tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques. C'est pourquoi, les recherches sur les matériaux sont un volet inséparable de la recherche en fusion et de telles études ont été poursuivies tout au long de 2005 à l'antenne du CRPP située au PSI. Les travaux du Groupe matériaux couvrent, dans ses domaines de spécialisation, les principaux sujets importants : développement et caractérisation après irradiation des aciers à basse activation et des matériaux réfractaires (comme le tungstène), les études de corrosion, l'extrapolation des méthodes de test basées sur des petits échantillons. La prédiction des effets d'irradiation nécessite un effort dans la simulation numérique, domaine où le CRPP est particulièrement compétent.

L'expertise reconnue du CRPP dans le développement de chauffage par ondes cyclotron-électroniques fait que cette institution s'est vue confier le rôle de laboratoire chef de file en Europe pour le développement du gyrotron destiné à *ITER* (170 GHz, 2 MW). L'installation à Lausanne du banc d'essai pour cet instrument s'est poursuivie en 2005 et sera prête pour les premiers essais du gyrotron en 2006. Le CRPP a également fait une contribution significative dans la conception de l'antenne pour les ondes cyclotron-électroniques d'*ITER* (appelée "*Upper Launcher*"), où après une étude approfondie des exigences de la physique, il a proposé un changement de concept de référence de l'antenne. Ce changement a été accepté par l'équipe d'*ITER* et c'est le CRPP qui joue maintenant le rôle principal dans ce projet.

En collaboration avec des laboratoires spécialisés (Laboratoire des systèmes énergétiques (LASEN) et le *Center for Energy Policy and Economics* (CEPE) de l'EPFZ), des travaux dans le domaines des études socio-économiques pertinents à la fusion et aux nouvelles sources d'énergie ont également débutés en 2005.

Collaboration avec l'Université de Bâle

L'Institut de physique de l'Université de Bâle a mis à profit son expertise dans l'utilisation de la spectroscopie par émission de photoélectrons pour étudier les propriétés de surface des matériaux qui, dans une installation de fusion, sont exposés au plasma. L'année 2004 a été placée sous le signe des miroirs. En effet, ces surfaces réfléchissantes seront un élément essentiel de plusieurs dispositifs diagnostiques prévus pour *ITER*, puisqu'une exposition directe des instruments de mesure au plasma n'est pratiquement jamais possible. Des études sont donc en cours dans plusieurs centres de recherche pour développer des miroirs résistant bien aux phénomènes d'érosion et de déposition d'impuretés que l'on observe à l'intérieur d'un réacteur de fusion. L'expertise du groupe Oelhafen est un auxiliaire précieux de ces études et des collaborations se sont nouées non seulement avec le CRPP, partenaire traditionnel des Bâlois, mais aussi avec les équipes des *tokamaks TEXTOR*, à Jülich (DE), *Tore Supra*, à Cadarache (FR) et, bien sûr, *JET*, à Culham (UK)

Dans les systèmes de diagnostic, des miroirs sont installés, soit en face du plasma, soit dans des labyrinthes qui conduisent l'image du plasma vers les instruments de mesure. L'érosion superficielle domine à proximité du plasma alors qu'avec un éloignement croissant, c'est le dépôt d'impuretés qui devient de plus en plus important. Les deux phénomènes influent négativement sur les propriétés réfléchissantes des miroirs et les analyses du groupe de Bâle cherchent à caractériser ces altérations dans des miroirs de molybdène et de tungstène, deux matériaux actuellement envisagés pour les systèmes diagnostiques d'*ITER* en raison de leur bonne résistance à l'érosion.

Autres collaborations et aspects internationaux

Collaboration dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie (AIE)

Le programme de l'AIE en fusion nucléaire est étroitement coordonné avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme Euratom. Les *Implementing Agreements (IA)* permettent de réaliser des activités de R&D en exploitant efficacement le savoir combiné d'experts et en évitant des duplications inutiles. Neuf *IA* sont actuellement en cours d'exécution. Ils couvrent des thèmes divers liés à la physique des plasmas, aux matériaux et aux aspects socio-économiques de la fusion. Euratom participe à tous, et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux d'entre eux, l'un concernant la recherche sur les matériaux (EPFL et PSI), l'autre étudiant les interactions plasma – paroi du réacteur (Université de Bâle).

Liste des projets de R&D

[1] P. Oelhafen, (peter.oelhafen@unibas.ch), Institut für Physik der Universität *Basel:* ***Plasma – wall interaction studies related to fusion reactor materials***. RA 2005.

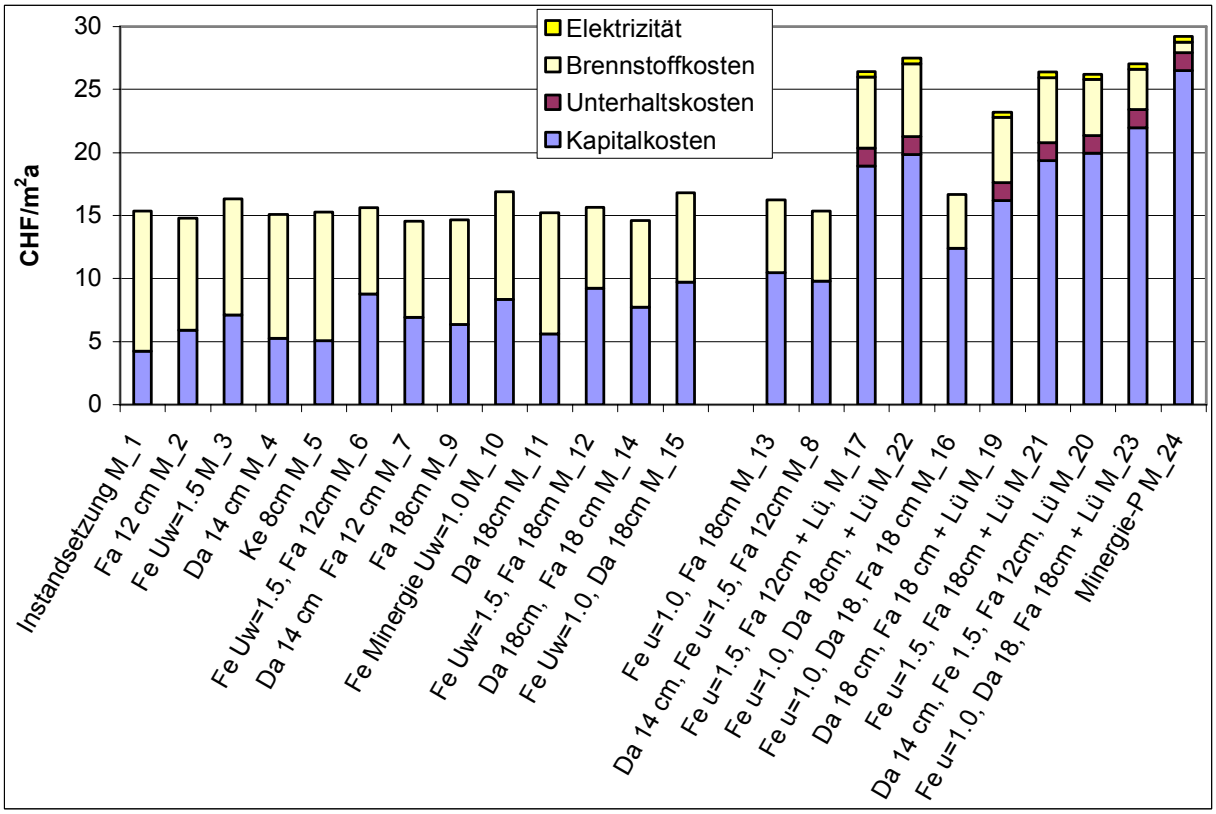
Références

[2] ***Site internet ITER:*** www.iter.org Informations sur l'histoire et l'avancement du Projet ITER.

[3] ***Site internet EFDA:*** www.efda.org Iinformations sur la recherche europénne dans le domaine de la fusion.

PROGRAMM ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

Lukas Gutzwiller
lukas.gutzwiller@bfe.admin.ch



Mobilisierung der energetischen Erneuerungspotenziale im Wohnbaubestand

Kostenstruktur (CHF pro Energiebezugsfläche und Jahr) der untersuchten Sanierungsmassnahmenpakete am Beispiel eines Achtfamilienhauses (Brennstoffpreis 7 Rp./kWh, Strompreis 17 Rp./kWh, Realzinssatz 3% p.a.). Es sind 24 Massnahmenpakete von Instandsetzung bis Minergie-P dargestellt. Legende: Fa x cm = Fassade x cm Wärmedämmung; Fe Uw x = Fenster mit U-Wert x; Da x cm = Dach mit x cm Dämmung; Ke = Keller; Lü = Lüftung.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Forschungsprogramm *Energiewirtschaftliche Grundlagen (EWG)* des Bundesamts für Energie werden ökonomische, soziologische sowie politologische Fragestellungen bezüglich der Produktion, Verteilung bzw. Nutzung von Energie untersucht. Das im Forschungsprogramm erarbeitete Wissen ist die Basis sowohl für die Behandlung politischer Geschäfte als auch für die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik. Es dient somit der Erarbeitung neuer und der Überprüfung bestehender Instrumen-te. Die Forschungsresultate des Programms kommen zudem den Kantonen sowie verschiedenen Ver-bänden und Organisationen zugute.

Die energiewirtschaftliche Forschung befasst sich mit den energiepolitischen Rahmenbedingungen in den vier Wirtschaftssektoren Haushalte, Verkehr, Dienstleistung und Industrie, wie sie auch den Per-spektivemodellen zu Grunde liegen. Die Energieproduktion (Umwandlungssektor) hat dabei eine Querschnittfunktion. Dazu kommen die beiden übergreifenden Themen der *Energieperspektiven* (www.energie-perspektiven.ch), welche das strategische Ziel der *Vision 2050* mit einschliesst, sowie der *Technologietransfer*. In den Energieperspektiven werden Energiepolitikinstrumente simuliert (siehe auch www.ewg-bfe.ch). Erstmals seit Frühjahr 2003 konnte im Berichtsjahr ein Bündel von fünf neuen Projekten ausgeschrieben werden.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2005

GEBÄUDE UND ELEKTROGERÄTE

Im Projekt ***Mobilisierung der Erneuerungspotentiale bei Wohnbauten*** [1] geht man davon aus, dass der energetische Zustand des Gebäudebestandes weit unter den heutigen technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten liegt. Bei Gebäudeerneuerungen wird zudem das energetische Effizienzpotenzial bei weitem nicht genutzt. Es werden das Erneuerungsverhalten im Bereich der Wohngebäude sowie die Rahmenbedingungen, die dieses Erneuerungsverhalten beeinflussen (wie Bau- und Planungsrecht, Mietrecht, Steuerrecht, Wohnungsnachfrage, Kreditvergabebedingungen, gesellschaftliche Werthaltungen und Zeitpräferenzen) erhoben. Aufgrund dieser Problemanalyse werden Strategien mit dazugehörigen Massnahmen und Instrumenten entwickelt, um den Rhythmus und die Qualität der energetischen Erneuerungen im Hinblick auf einen nachhaltigen Gebäudebestand zu beeinflussen. Die identifizierten strategischen Ansatzpunkte für eine Effizienzstrategie im Gebäudebestand sind:

- Nutzung der *Technologieentwicklung* und Beschleunigung der Technologiediffusion und Marktentwicklung für Effizienztechnologien. Unterstützung von Qualitätssicherung und Technologie-Benchmarking, zur Reduktion von Transaktionskosten und Anwendungsrisiken sowie zur Beschleunigung von Lerneffekten.
- *Unterstützung des techno-ökonomischen Fortschritts* mittels einer Dynamisierung der energetischen Anforderungen im Gebäudebereich
- Verbesserung von *Transparenz* und *Informationsstand* über Wohn- und Gebäudequalität und energetische Eigenschaften, um vermehrte Nachfrage und Qualitätsbewusstsein der Nutzer zu schaffen und die Entscheidungen der Eigentümer auf verbesserte Grundlagen zu stellen.
- Verstärkung der *Bauherren- und Bestellerkompetenz* zur Nutzung der bestehenden technisch-wirtschaftlichen Potenziale
- *Weiterbildung* der Planer, Anwender und Unternehmungen zur Entwicklung des Erneuerungsmarktes und zur schnelleren Diffusion von Innovationen und häufigerer Anwendung der bereits seit längerem zur Verfügung stehenden Effizienztechnologien, unter spezieller Berücksichtung ihrer Rolle und der Marktstrukturen im Erneuerungsbereich
- *Verbesserung der Rahmenbedingungen* insbesondere im Bereich Überwälzung/Mietrecht, um das Funktionieren der Marktmechanismen bei energetischen Gebäudeerneuerungen zu verbessern.
- *Verstärkte Nutzung schon bestehender staatlicher Programme und Instrumente* (wie die Wärmeschutzvorschriften, etablierte Abgaben), deren Anpassung und Verschärfung eher Akzeptanz findet als neu zu schaffende energiepolitische Instrumente. Anpassung und Dynamisierung der energetischen Anforderungen zur Korrektur des partiellen Marktversagens im Gebäude-Erneuerungsbereich (Intransparenz, Nutzer-/Benutzerdilemma, hohe Informations- und Transaktionskosten).
- Wahrnehmung der Chancen *nutzenzentrierten Marketings und Kommunikation*, bei welchem qualitative Kriterien etabliert und vermarktet werden. Dafür wird Transparenz bezüglich der qualitativen Aspekte benötigt (s. oben). Dabei werden soziale, gesellschaftliche und demographische Trends einbezogen und den

sich abzeichnenden künftigen Veränderungen Rechnung getragen.

- *Förderung* der energetischen Bestandeserneuerung zur Korrektur des partiellen Marktversagens
- *Subsidiäre Sanierungspflicht,* falls absehbar wird, dass die oben genannten Strategien nicht zielführend sind.

Im Anschluss an das Projekt *Grenzkosten im Bereich Wohngebäude* wurden in einer zweiten Phase die ***Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftbauten*** [2] untersucht. Im Bereich der Wirtschaftsbauten bestehen ähnlich grosse und kostengünstige Energie-Effizienzpotentiale wie bei den Wohngebäuden, aber aufgrund der komplexeren Gebäudehüllen und der vielfältigeren Nutzungsvielfalt auch Unterschiede. Das Projekt hat deshalb zum Ziel, die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (Wärmeschutz sowie Heizungs- und Lüftungstechnik) für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis zu stellen. Methodisch wurden innerhalb des komplexen Untersuchungsgegenstandes Schwerpunkte gesetzt und der Gebäudebestand hinsichtlich kosten- und energierelevanter Unterschiede kategorisiert. Zudem wurde ein Raster für die zu erhebenden Kostenelemente sowie für die durchzuführenden energetischen Berechnungen erstellt.

Als Resultat kann vereinfacht gesagt werden, dass sich der Zielkonflikt Energieeffizienz und Komforterhalt oder -erhöhung in folgender Regel ausdrückt: Eine Verminderung des Brennstoffbedarfs ist nicht selten mit einer Zunahme des Elektrizitätsbedarfs von einem Drittel bis zur Hälfte verbunden. Umgekehrt erhöht eine Effizienzmassnahme bei Elektrizitätsanwendungen den Heizwärmebedarf wegen nicht mehr freigesetzter Wärme in der Heizperiode um einen etwa halb bis ein Viertel so hohen Betrag. Die Reduktion einer kWh Elektrizität muss als mit einem Brennstoffeinsatz von 0.25 bis 0.75 kWh erkauft werden. Dies ist sehr viel weniger als bei der Stromerzeugung in Kraftwerken, wobei pro kWh 1.7 (bei sehr guten GuD-Kraftwerken) bis 3 kWh Brennstoffe notwendig sind, d.h. solche Massnahmen sind einer thermischen Stromerzeugung klar vorzuziehen. Das Substitutions-Verhältnis Strom zu Wärme, sozusagen die *exchangerate*, beträgt bei gebäude- und haustechnischen Massnahmen also zwischen 0.25 und 0.5 bei Stromeffizienzmassnahmen und zwischen 2 bis 4 bei haustechnischen Wärmeeffizienzmassnahmen. Der Faktor 4 gilt auch für den Einsatz von gut konzipierten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und von Wärmepumpen anstelle von brennstoffbefeuerten Heizanlagen; denn der Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen beträgt im Neubau üblicherweise rund 4 (insbesondere bei Erdsonden- oder Abluft-WP). Ein WP-Einsatz anstelle einer Heizung ist dann ratsam, wenn der Wirkungsgrad der Stromerzeugung abzüglich Übertragungsverluste grösser ist als der entsprechende Kehrwert des WP-Jahresnutzungsgrades, d.h. grösser als 0.4 (bei 2.5) bzw. 0.25 (bei 4).

Energieeffizienz-Investitionen können schnell unwirtschaftlich werden, wenn nur die energetischen Nutzen und die heutigen Energiepreise betrachtet werden. Dies führte zum Projekt ***Direkte und indirekte Zusatznutzen von energieeffizientem Wohnbau*** [3], in welchem die Zusatznutzen sowohl bei Neubauten als auch bei Sanierungen untersucht werden. Dazu gehören unter anderem die Reduktion der Aussenlärm-Immissionen, bessere Raumluftqualität und höherer Wohnkomfort dank höherer Behaglichkeit (Innenraumtemperatur und -feuchtigkeit). Die Monetarisierung der Zusatznutzen wird durch die Zahlungsbereitschaft mit den beiden Methoden *Conjoint*-Analyse und *Hedonic Pricing* ermittelt. Die provisorischen Ergebnisse der *Conjoint*-Analyse lauten wie folgt:

- Beim *Neubau* ist es offenbar vor allem die Lufterneuerungsanlage, welche den BewohnerInnen einen grossen Nutzen stiftet. Entsprechend liegen die Werte für die Willingness-to-Pay (WTP) im Bereich von 5% bis 8%. Eine noch weiter gehende Wärmedämmung als es bei Neubauten ohnehin üblich ist bzw. dreifachverglaste Fenster beeinflussen das Wahlverhalten insbesondere bei den MFH noch positiv, aber die daraus abgeleitete Zahlungsbereitschaft ist mit 0% bis 3% deutlich geringer. Im Neubau besteht zwischen Ein- und Mehrfamilienhäusern im Allgemeinen eine recht gute Übereinstimmung.
- Bei *Sanierungen* erzielen verbesserte Fenster die grösste Zahlungsbereitschaft (9% bis 13%). Verbesserungen im Fassadenbereich (3% bis 4%) sowie Lufterneuerungsanlagen (5% bis 6%) führen ebenfalls zu Zahlungsbereitschaften, die signifikant von 0 verschieden sind. Es besteht wiederum eine gute Übereinstimmung zwischen EFH und MFH. In absoluten Werten befinden sich die Werte bei MFH in einem Bereich von 80 bis 160 CHF/Monat und bei den EFH zwischen 30’000 und 60’000 CHF/Monat, was v.a. bei den Fenstern tendenziell auf eine Überschätzung der Ergebnisse hindeutet.

Das Ziel des Projekts ***Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich*** [4] ist die Entwicklung neuer Lösungen zur Förderung der Energieeffizienz auf der Nachfrageseite im Elektrizitätsbereich, dies auch im Kontext der anvisierten Öffnung des Strommarktes in der Schweiz. Dazu sollen drei bis vier mögliche Fördermodelle für die Schweiz erarbeitet und bewertet werden. In der ersten Phase

des Projekts wurden die in ausgewählten Ländern der EU bestehenden Instrumente zur Förderung der Effizienz auf der Nachfrageseite im Elektrizitätsbereich ausgewertet. Wichtigste Ergebnisse:

- Durch die Liberalisierung der Strommärkte haben die Energieversorgungsunternehmen in vielen Ländern ihre Energieeffizienz-Aktivitäten stark eingeschränkt. Demgegenüber ist auf EU-Ebene und auf nationaler Ebene ein Trend in Richtung einer Forcierung der Energieeffizienz-Politik erkennbar, die i.d.R. mehrere Energieträger umfassen. Auf europäischer Ebene ist v.a. die geplante Richtlinie zu Endenergieeffizienz und zu Energiedienstleistungen von Bedeutung.
- Die untersuchten Länder haben sehr unterschiedliche Wege zur Verbesserung der Energieeffizienz im Elektrizitätsbereich beschritten. Die umfangreichsten Energieeffizienz-Massnahmen werden in Grossbritannien und Dänemark umgesetzt. Die eingesetzten Instrumente umfassen eine Kombination von Verpflichtungen der Energieversorger, Energieeffizienzfonds, die Preisregulierung, freiwillige Vereinbarungen und Zertifikatshandel (nur GB). In anderen Ländern wie z.B. Deutschland und Österreich werden v.a. „weiche“ Massnahmen umgesetzt.
- Wichtige Elemente von Energieeffizienz-Programmen sind verbindliche Zielsetzungen, ein langfristiger Zeithorizont (inkl. Finanzierung) und ein zweckmässiges Monitoring-System. In den meisten Ländern sind die Energieversorgungsunternehmen als wichtige Akteure in die Umsetzung der Energieeffizienzpolitik eingebunden.

Im Projekt ***gesetzliche Umsetzungsmodelle des Gebäude-Energieausweises*** [5] geht um die die Analyse der rechtlichen Grundlagen für privat- oder öffentlich-rechtlichen Vollzug eines Gebäudepasses zu erarbeiten. In der EU wird ein Energieausweis für Gebäude (auch Energiepass genannt) eingeführt. Dieser muss bei Neubauten, bei Verkauf oder Vermietung von Gebäuden vorgelegt werden. Für die Schweiz besteht zwar kein Zwang zur gesetzlichen Einführung eines Gebäude-Energieausweises. Dennoch lohnt es sich über dessen Einführung zu diskutieren, da bei bestehenden Bauten des Energiesparpotential besonders hoch ist. Im Projekt wird eine Analyse der rechtlichen Grundlagen vorgenommen, welche für die Einführung eines Energieausweises notwendig sind. Geprüft wird eine Abstützung im öffentlichen wie privaten Recht. Darüber hinaus werden Vorschläge für die Einführung und den Vollzug eines Energieausweises erarbeitet. Diese sollen mithelfen, einen Entscheid für oder wider die Einführung eines Energieausweises in der Schweiz zu fällen.

ENERGIEFORSCHUNG UND TECHNOLGIE-TRANSFER

Das Projekt ***Devising a rule for the efficient allocation of research funds by CORE*** [6] wurde durch die eidgenössische Energieforschungskommission CORE mit dem Ziel lanciert, durch Anwendung einer Portfolioanalyse effektive Energieforschungsprojekte für die Schweiz zu bestimmen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Diversifikationsmöglichkeiten eines Projektportfolios analysiert. Zum einen wird das Portfolio mit dem minimalen zukünftigen Erzeugungskostenanstieg bei gegebenem Volatilitätsrisiko bestimmt. Unter dem Volatilitätsrisiko ist die Standardabweichung der Erzeugungskostenveränderung zu verstehen. Zum anderen wird das Portfolio mit minimalen Volatilitätsrisiko bei gegebener Erzeugungskostenveränderung bestimmt. Die Datengrundlage für diese Portfolioanalyse wird aus Fragebögen, die an alle BFE Projektleiter verteilt werden, stammen.

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt bezog sich die Portfolioanalyse auf historische Zeitreihen bis zum Jahr 2003 für die Erzeugungskostenveränderungen im Bereich der Elektrizität (Atomkraftanlagen, Laufkraftwerke, Speicherkraftwerke und Solaranlagen). Alle Zeitreihen enthalten als Varianten auch externe Kosten, die Gesundheitsschäden und Klimaveränderungen berücksichtigen. Aufgrund der Tatsache, dass sogenannte *Schocks* (wie z.B. Stromausfälle die durch eine Hitzwelle ausgelöst werden) die Erzeugungskostenveränderungen aller Elektrizitätserzeuger beeinflussen, wurde ein *SURE*-Verfahren angewendet, welches es ermöglicht, die systematischen Korrelationen der Erzeugungskostenveränderungen herauszufiltern.

Teilt man die effizienten Portfolios nach (i) minimalen Erzeugungskostenanstieg und (ii) minimalen Volatilitätsrisiko der Erzeugungskostenveränderung auf, so zeichnet sich folgendes Bild ab: Atom- und Solarstrom übernehmen eine Vorreiterrolle, wenn es darum geht, den Erzeugungskostenanstieg zu minimieren. Im Gegensatz dazu stehen Atomstrom, Elektrizität aus Speicherkraft und Solarstrom hoch im Kurs, wenn die Minimierung des Volatilitätsrisikos das vorrangige Ziel ist. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn prognostizierte zukünftige Zeitreihen bis zum Jahr 2035 verwendet werden. Hier schneidet vor allem Atomstrom im Portfolio mit minimalem Erzeugungskostenanstieg gut ab, während eine Kombination aus Atomstrom, Elektrizität aus Laufkraftwerken, Solarstrom und Strom aus Gasverbrennungsanlagen den besten Mix für ein minimales Volatilitätsrisikoportfolio darstellt.

VERKEHR

Das Projekt ***Massnahmen zur Absenkung des Flottenverbrauchs: Analyse der energetischen***

Wirkungen [7] verfolgt zwei Ziele. Einerseits soll die relative Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren auf den individuellen Kaufentscheid eines neuen Personenwagens empirisch erfasst, andererseits die Wirkungen der *energieEtikette* und eines Bonus-Malus-Systems auf den Flottenverbrauch von neuen Personenwagen abgeschätzt werden. Methodisch stützt sich das Projekt auf die *Contingent Valuation* (Erhebung der Zahlungsbereitschaft für Qualitätsmerkmale), die auf einer standardisierten Befragung von Neuwagenkäufern (159 Kleinwagen- und 157 Mittelklassewagenkäufer) basiert. Die Resultate des Projekts können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Umsetzung der *energieEtikette* durch den Handel war im ersten Jahr gut. Die Etikette wird vom Handel jedoch kaum aktiv als Verkaufsargument eingesetzt.
- Die *energieEtikette* ist bei den Neuwagenkäufern vergleichsweise bekannt. Sie wird jedoch nur von einer kleinen Minderheit der Neuwagenkäufer prioritär in den Kaufentscheid miteinbezogen.
- Die Discrete Choice Analyse zeigt, dass die *energieEtikette* wirkt und das Kaufverhalten der Neuwagenkäufer beeinflusst.
- Die *energieEtikette* führt zu einer Zunahme des Marktanteils der verkauften A- und B-kategorisierten Neuwagen von rund 1.5 Prozent aller Neuwagen, zu einer Absenkung des spezifischen Verbrauchs der Fahrzeugflotte von knapp 0.4 Prozent pro Jahr und zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen von jährlich 3'050 t.
- Die Bedeutung des TCS-Verbrauchskatalogs, der VCS-Auto-Umweltliste und der Top-Ten-Webpage für den Kaufentscheid von Neuwagenkäufern ist vergleichsweise gering.
- Die Einführung eines Bonus-Malus-Systems erhöht die Wirkung der *energieEtikette* auf den Kaufentscheid.
- Das Bonus-Malus-System führt in Kombination mit der *energieEtikette* zu einer Zunahme des Marktanteils der verkauften A- und B-kategorisierten Neuwagen von 5.9 Prozent aller Neuwagen, zu einer Absenkung des spezifischen Verbrauchs der Fahrzeugflotte von knapp1.6 Prozent und zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen von jährlich 12'520 t.

Aufgrund der bisher erzielten Wirkungen und des weiteren Potenzials kann die *energieEtikette* als positiv beurteilt werden. Zur Erreichung des Reduktionsziels von jährlich 3 Prozent des Flottenverbrauchs neuer Personenwagen sind jedoch zusätzliche Massnahmen notwendig, beispielsweise ein Bonus-Malus-System.

Das Projekt ***Autoklassen-Wechselverhalten*** [8] untersucht die mögliche Beeinflussung durch Lenkungsabgaben beim Neuwagenkauf. Die wohl wichtigste Konsumentenentscheidung bzgl. CO_2-Emissionen des Strassentransports ist der Neuwagenkauf. Er legt den Treibstoffverbrauch für im Mittel 160'000 Fahrzeugkilometer unwiderruflich fest. Denn ungeachtet seines Treibstoffverbrauchs wird jedes Auto bis zum Ende der technisch-wirtschaftlichen Lebensdauer gefahren und wechselt dabei im Schnitt mehrmals den Besitzer. Es besteht ein Verbrauchsunterschied von ca. 50% zwischen dem Kauf Anfang 2005 des effizientesten und einem nicht-effizienten Mittelklasse-PW gleicher Funktionalität. Über die Gesamtfahrleistung eines PW berechnet, sind dies 10 t CO_2 Differenz.

Die Erforschung des individuellen Autokaufverhaltens spielt deshalb eine wichtige Rolle. Forschungsfragen des vorliegenden Projekts sind die gegenseitige Abhängigkeiten von Autokaufverhalten und Bonus-Malus-Systemen, speziell die Frage, ob die Wirksamkeit von Bonus-Malus-Systemen stark beeinträchtigt werden könnte durch unbeabsichtigte Nebeneffekte, wenn Käufer geneigt wären, den zur Erlangung einer Bonuszahlung notwendigen Verzicht auf Leistung durch ein Mehr an Autogrösse zu kompensieren. Das Potential zum Wechsel der Autoklasse ist stark abhängig von der gewählten Definition der *energieEtikette*.

Die Angabe des absoluten Verbrauchs ist in der EU bei Neuwagen zwingend vorgeschrieben (Richtlinie 1999/94/EG), die zusätzliche Einordnung des Neuwagens mittels Effizienzklassen ist aber freiwillig und wird von den EU-Mitgliedstaaten unterschiedlich gehandhabt. Vier Länder haben Effizienzklassen basierend auf der absoluten CO_2-Emission eingeführt, zwei Länder stellen den CO_2-Ausstoss in Relation zu einem *Nutzen* des Autos, unter Verwendung der Grundfläche (Länge mal Breite) als Surrogat. Die übrigen EU-Mitgliedstaaten verzichten auf Effizienzklassen. Im Vergleich zu den EU-Mitgliedstaaten ist die schweizerische *energieEtikette* sowohl deutlich relativer als auch stärker am Angebot anstelle des Absatzes orientiert (die Effizienzklassen A und B machen ca. 40% des Absatzes aus, in EU-Ländern mit Effizienzklassen ist dieser Anteil stets unter 20%).

Zurzeit kennen überdies drei EU-Mitgliedstaaten Bonus-Malus-Systeme oder haben deren Einführung in der nahen Zukunft beschlossen. Alle drei Staaten sehen nur die Förderung einer kleinen Anzahl Neuwagenmodelle vor; in Belgien und Grossbritannien kommen je ca. 21 Neuwagenmodelle für Prämien überhaupt in Frage, in den Niederlanden ist dies noch nicht genau festgelegt. Zwei Staaten, Belgien und Grossbritannien, stellen auf die absolute CO_2-Emission ab, die Niederlande verwenden ein Hybridsystem (zu 25% absolute CO_2-Emission, zu 75% relative CO_2-Emission).

Wie Simulationen des schweizerischen Neuwagenmarkts mit dem ETH-Autokaufmodell zeigen, kann ein Bonus-Malus-System bei der heutigen Definition der Effizienzklassen in der Schweiz zwar grössere Marktumschichtungen bewirken. Die resultierende absolute CO_2-Einsparung ist aber vergleichsweise gering, was zum Teil auf den Wechsel hin zu grösseren A-Fahrzeuge zurückzuführen ist. Es scheint aber möglich, unter Beibehaltung einer relativen Bewertungszahl ein effektives Bonus-Malus-System zu implementieren, wenn die Definition der Bewertungszahl angepasst wird (so dass schwere Dieselfahrzeuge nicht für eine Bonuszahlung in Anmerkung kommen). Dazu eignet sich die *Transformation* des Leergewichts mit einem Exponenten oder mittels einer Obergrenze.

Das Forschungsprojekt hat 2005 zunächst die mögliche Anpassung der Bewertungszahl untersucht. Allerdings ist die Klassifizierungsregel (für die Effizienzklassen für den Erfolg eines Bonus-Malus-Systems in der Schweiz möglicherweise wichtiger als die Definition der Bewertungszahl. Gegenwärtig ist namentlich die Klasse A recht gross. Dies führt zu grossen *Mitnahme-Effekten*.

Die Simulationsresultate des Projekts zeigen, dass eine Abschwächung der Relativität der heutigen Bewertungszahldefinition, entweder mittels einem Exponenten <1 für das Leergewicht, oder mittels Obergrenze für das berücksichtigte Leergewicht, zu einer höheren Effizienz für Bonus-Malus-Systeme führen würden. Eine vollständig am absoluten CO_2-Ausstoss Bewertungszahldefinition scheint hingegen weniger wirksam zu sein. Das Optimum scheint also zwischen heutiger Definition und einer absoluten Bewertungszahl zu liegen. Zum Projektende im 2006 wird dieses Optimum noch genauer zu bestimmen sein.

Bei einer künftigen Ausgestaltung der *energie-Etikette* für ein Bonus-Malus-System scheint wichtig, zuerst zu beschliessen, wie hoch die Bonuszahlungen für die Klasse A und für die Klasse B sein sollten aus wirkungspsychologischer Sicht. Erst anschliessend sollten die Klassengrenzen der Effizienzklassen definiert werden so, dass die vorhandenen Mittel vollständig ausgeschüttet würden.

UMWANDLUNGSSEKTOR (ERNEUERBARE ENERGIEN UND MARKTORDNUNG)

Im Projekt ***Wirtschaftlichkeit von Biomasse-Energieanlagen*** [9] werden die wirtschaftlichen Kenngrössen anhand bestehender Anlagen erhoben und analysiert. Das Projekt soll Grundlagen für die Erstellung einer Biomasse-Energie Strategie liefern, und sie soll zur Aktualisierung der nicht-amortisierbaren Mehrkosten im harmonisierten Fördermodell (Globalbeiträge an die Kantone) verwendet werden. Zudem kann die Studie wichtige Ausgangsbasis für die kostendeckenden Einspeisetarife von Biomasse-Energieanlagen sein.

Im Berichtsjahr wurden die zu analysierenden Anlagetypen präzisiert und ausgewählt, die Systemgrenzen und die grundlegenden Rahmenbedingungen festgelegt. Es werden landwirtschaftliche und gewerblich-industrielle Biogasanlagen, Holzheizanlagen ab einer Leistung von 100 kW, Holz-WKK Anlagen, sowie Anlagen zur Herstellung von Biotreibstoff untersucht. Zur Erhebung und Analyse der Daten wurde ein computergestütztes Model entworfen und erste offene Fragen gesammelt. Als Ergebnis wird für jede untersuchte Anlage ein Fact-Sheet erstellt. Resultate liegen noch keine vor.

Als Basis für eine verbesserte und zielgruppenspezifische Marktbearbeitung zur Förderung erneuerbarer Energien umfasst das Projekt ***Potenzial der Erneuerbaren Energien für bestehende Nahwärmenetze*** [10] folgende Zielsetzungen:

- Bestimmen des Marktvolumens der Nahwärmenetze
- Identifikation der nötigen Hilfsmittel für eine Umrüstung zu Handen der Entscheidungsträger
- Identifikation von technischen und administrativen Hindernissen
- Vergleich der Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu konventionellen Energieträgern

Bis Anfang März 06 werden in 3 Kantonen im Sinne einer Pilotstudie die Potentiale in bestehenden Nahwärmenetzen ermittelt. Das geplante Vorgehen zur Ermittlung des Potentials wird so einem Praxistest unterzogen um Lehren für die breite Umsetzung in allen Kantonen zu ziehen. Die Kantone TG und AG aus der Deutschschweiz werden mitarbeiten, vorgesehen ist eine Teilnahme des Kantons FR aus der Romandie. Zusätzlich wird eine erste Übersicht über die übrigen Kantone erstellt. Dazu werden mittels Erhebung in sämtlichen Kantonen die bestehenden Datengrundlagen, insbesondere das Emissionskataster, deren Inhalt und Verwendbarkeit abgeklärt.

Die in Zusammenarbeit mit dem Verband der schweizerischen Gasindustrie (VSG) verfasste ***Analyse zum Erdgasmarkt Schweiz*** [11] untersucht den Bedarf einer Öffnung des Erdgasmarktes in der Schweiz sowohl aus Sicht der Verbraucher als auch aus Sicht der Erdgasindustrie. Neben der Aufarbeitung der spezifischen technisch-ökonomischen Eigenheiten des Erdgasmarktes insbesondere im Vergleich mit der Stromwirtschaft wurden auch die Erfahrungen mit der Gasmarktöffnung in ausgewählten EU-Ländern untersucht. Anhand einer Umfrage bei Haushalten und Unternehmen und Expertengesprächen mit Erdgas-Versorgungsunternehmen und Gross-

verbrauchern wurde die Beurteilung der heutigen Situation erfasst sowie das bei einer Marktöffnung zu erwartende Verhalten der Verbraucher ermittelt. Im Rahmen der Umfrage wurde erstmals in der Schweiz mittels Marktexperimenten die Zahlungsbereitschaften für ausgewählte Eigenschaften eines Erdgas-Liefervertrags ermittelt.

Die Ergebnisse der Studie lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei einer Marktöffnung sind spezifische Eigenheiten des Erdgasmarktes im Vergleich zum Strommarkt zu berücksichtigen. Die Expertengespräche haben gezeigt, dass sich die Versorgungsunternehmen auf eine Marktöffnung vorbereitet fühlen und dass die erwarteten Auswirkungen einer Marktöffnung auf die Struktur der Branche und der Effizienz der Unternehmen als eher gering betrachtet werden. Der grösste Teil der Haushalte und der Unternehmen ist mit ihrem bisherigen Versorgungsunternehmen sehr zufrieden und schätzt die Versorgungsqualität als sehr hoch ein. Eine freie Lieferantenwahl würde sowohl von den Haushalten als auch von den Unternehmen begrüsst. Effektiv dürften jedoch nur wenige Verbraucher nach einer Marktöffnung den Lieferanten wechseln. Dies lässt sich einerseits aus den internationalen Erfahrungen ableiten. Andererseits zeigen die Marktexperimente, dass die geforderten Preisreduktionen für einen Anbieterwechsel sehr hoch sind (Preisrabatte zwischen 18% für die Haushalte und 29% für die Unternehmen).

Die Versorgungssicherheit ist ein zentrales Anliegen und zeichnet sich durch eine hohe Zahlungsbereitschaft aus. Die ermittelten geforderten hohen Preisnachlässe dürfen aber nicht über die Tatsache hinweg täuschen, dass sich diese je nach Kundengruppen teilweise stark unterscheiden.

Im Projekt ***Förderung von erneuerbaren Energien mit Schwerpunkt auf kostenbasierter Einspeisevergütung*** [12] werden die die theoretischen Grundlagen des Ausschreibungsmodells, des Quoten-/Zertifikatsmodell und des Einspeisevergütungsmodells dargestellt und diskutiert. Besonders eingegangen wir dabei auf Möglichkeiten der Kombination der einzelnen Modellansätze und mögliche Schwierigkeiten beim deren Etablierung. Bei Bedarf können die Darstellungen noch um weitere Facetten ergänzt werden.

Es werden Umsetzungsbeispiele für die einzelnen Modellansätze dargestellt, anhand derer die Ausgestaltungsmöglichkeiten und Erfahrungen diskutiert werden. Die aus den Umsetzungsbeispielen ableitbaren Erfolgskriterien in der Umsetzung wurden erarbeitet. Im vorliegenden Zwischenbericht ist dazu eine erste Liste möglicher Zielsetzungen bei der Ausgestaltung von Fördersystemen enthalten. Für diese Zielsetzungen sollen dann für die einzelnen Fördermodelle die wesentlichen Kriterien und Möglichkeit dargestellt werden, die das Erreichen der gewünschten Ziele unterstützen können.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms *Energiewirtschaftliche Grundlagen EWG* wird eine intensive Zusammenarbeit mit privaten Forschungsstellen, Universitäten, Fachhochschulen und Instituten gepflegt. Auf eine hohe **Vernetzung** unter den Forschungsstellen wird grosser Wert gelegt. Zentrales Anliegen ist der Einbezug und die Zusammenarbeit mit den Kantonen, insbesondere den kantonalen Energiefachstellen und den interessierten Fachverbänden in den Bereichen Stromversorgung und Bauen. Im vergangenen Jahr sind alle Projekte des Forschungsprogramms von speziell eingesetzten Begleitgruppen betreut worden. Damit kann die Fachkompetenz aus der Praxis und aus der Wissenschaft berücksichtigt werden, und die Umsetzung der Forschungsergebnisse wird erleichtert.

Zur **Kommunikation** der Resultate wurden die EWG Projekte an der internationalen Gebäudekonferenz CISBAT an der ETH Lausanne, am Biomassegipfel in Basel, an einer Tagung zu Raumplanung und Energie sowie verschiedenen Perspektivenforen und Energie-Aperos vorgestellt. Insbesondere wurde das Projekt *Biomasse Potenziale* in verschiedenen Presseartikeln wiedergegeben. Auch an der Tagung des Departements *Erfolgskontrolle* der kantonalen Energiefachstellen wurden mehrere EWG-Projekte vorgestellt. Zudem wurden verschiedene EWG-Projekte in internationalen Wissenschaftsperiodika publiziert; vor allem das Projekt *Internationaler Vergleich von Energiestandards* wurde im europäischen Ausland durch die Presse mehrmals aufgenommen

Zudem fliessen die Resultate mehrerer Untersuchungen, die in den letzten 18 Monaten abgeschlossen worden sind, in die Arbeiten der **BFE-Energieperspektiven** ein. Folgende Projekte sind dabei speziell zu erwähnen: *Biomasse-Potential*, *Kosten-Nutzen von Solarenergie*, *Sanierungsverhalten bei bestehenden Bauten, Grenzkosten von Wirtschaftsbauten* und *Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen.*

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen direkt beauftragt oder im Rahmen von einzelnen Projekten wie beispielsweise *Intenationaler Vergleich von Energiestandards im Baubereich* einbezogen worden. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar. In den Projekten *Förderinstrumente für Erneuerbare* und *Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich* wird mit der österreichischen Agentur zusammen gearbeitet und somit der Zugang zum europäischen Netzwerk der Energieagenturen verschaffen.

Auf europäischer Ebene ist innerhalb des sechsten Rahmenprogramms - wie für die technischen Forschungsprogramme - das Schwerpunktthema *sustainable energy systems* wichtig. Je nach Bedarf werden Schweizer Beteiligte im Rahmen von klar umschriebenen Aufgaben finanziell unterstützt, beispielsweise im Programm *Intelligent Energy Europe*.

Bewertung 2005 und Ausblick 2006

Neben den Arbeiten zu den **Energieperspektiven 2035/2050** war das Jahr 2005 geprägt durch den Abschluss der im Frühjahr 2003 ausgeschriebenen Projekte sowie der Neuausschreibung von fünf neuen Projekten. Zudem wurde das EWG **Schwerpunktprogramm** aufdatiert. Dieses orientiert sich am Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 - 2007 und leitet die neuen Schwerpunkte von den Zielen der sich in Arbeit befindenden Technologie-Roadmap ab. Das Ziel dieser Roadmap ist die Identifizierung von viel versprechenden Technologien zum Erreichen einer 2000-Watt-Gesellschaft. Im Jahr 2005 standen die Projekte zu Energieeffizienz und Biomassenutzung im Vordergrund. Im Gebäudebereich besteht die Absicht, zusammen mit den Kantonen die Erhebung von Energiekennzahlen von bestehenden Bauten voranzutreiben.

Auch das Jahr 2006 wird geprägt sein durch die Arbeiten zu den Energieperspektiven 2035/2050 sowie der Vision 2050. Eine grössere Ausschreibungsrunde ist für März 2006 geplant.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2005 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden
Sämtliche Schlussberichte können unter www.ewg-bfe.ch herunter geladen werden.

[1] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, M. Jakob, CEPE, *Zürich:* ***Mobilisierung der Erneuerungspotentiale bei Wohnbauten*** (SB).

[2] M. Jakob (martin.jakob@cepe.mavt.ethz.ch), CEPE, U.P. Menti (Intep), A. Baumgartner (Amstein-Walthert), *Zürich:* ***Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftbauten*** (JB).

[3] W. Ott (walter.ott@econcept.ch), econcept, M. Jakob, CEPE, *Zürich:* ***Direkte und indirekte Zusatznutzen von energieeffizientem Wohnbau*** (SB).

[4] S. Hammer (stephan.hammer@infras.ch), Infras, *Zürich,* N. Peherstorfer (österreichische Energieagentur) ***Instrumente für Energieeffizienz im Strombereich*** (JB).

[5] S. Rieder (stefan.rieder@interface-politikstudien.ch), A. Lienhard, Uni *Bern:* ***Gesetzliche Umsetzungsmodelle des Gebäude-Energieausweises*** (JB).

[6] P. Zweifel und B. Krey (pzweifel@soi.unizh.ch), Sozioökonomisches Institut der Uni *Zürich:* ***Devising a rule for the efficient allocation of research funds by CORE*** (JB).

[7] R. Iten und S. Hammer (rolf.iten@infras.ch), Infras, *Zürich,* R. Wüstenhagen und K. Sammer, IWÖ, HSG, *St. Gallen:* ***Massnahmen zur Absenkung des Flottenverbrauchs: Analyse der energetischen Wirkungen*** (SB).

[8] P. de Haan, (dehaan@env.ethz.ch), ETH *Zürich:* ***Autoklassen-Wechselverhalten*** (JB).

[9] O. Schelske, Ernst Basler und Partner, *Zürich* (oliver.schelske@ebp.ch), und T. Nussbaumer (Verenum), Y. Membrez (Erep), H. Engeli (Engeli Engineering)*:* ***Wirtschaftlichkeit von Biomasse-Energieanlagen*** (JB).

[10] R. Dettli, Econcept, *Zürich* (reto.dettli@econcept.ch), M. Kernen, Planair, *La Sagne:* ***Potenzial der erneuerbaren Energien für bestehende Nahwärmenetze*** (JB).

[11] S. Vaterlaus (stephan.vaterlaus@plaut.ch), Plaut, *Zürich;* M .Finger EPF *Lausanne:* ***Analyse zum Erdgasmarkt Schweiz*** (JB).

[12] A. Veigl (andreas.veigl@energyagency.at), österreichische Energieagentur, *Wien:* ***Förderung von erneuerbaren Energien mit Schwerpunkt auf kostenbasierter Einspeisevergütung*** (JB).

ANHANG / ANNEXE

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS / RÉPERTOIRE DES SIGLES

ÖFFENTLICHE FORSCHUNGSINSTITUTE / INSTITUTIONS PUBLIQUES DE RECHERCHE

BFH	**Berner Fachhochschule**
HTA	Hochschule für Technik und Architektur, *Biel*, *Burgdorf*
SHL	Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, *Zollikofen*
EMPA/ LFEM	**Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt / Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherches, *Dübendorf***
ZEN	Zentrum für Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen
EPFL	**École polytechnique fédérale de *Lausanne***
CRPP	Centre de recherches en physique des plasmas
ICP	Institut de chimie-physique
LA	Laboratoire d'automatique
LENI	Laboratoire d'énergétique industrielle
LESO-PB	Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment
LMS	Laboratoire de mécanique des sols
ETHZ	**Eidgenössisch Technische Hochschule *Zürich***
CEPE	Centre for Energy Policy and Economics
EEH	Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik
HBT	Institut für Hochbautechnik
IET	Institut für Energietechnik
IFG	Institut für Geophysik
IMES	Institut für mechanische Systeme
IMRT	Institut für Mess- und Regeltechnik
LAV	Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme
LTC	Labor für Technische Chemie
LTNT	Labor für Thermodynamik in neuen Technologien
MAVT	Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
PRE	Professorship in Renewable Energy Carriers
TFP	Thin Film Physics Group
FHNW	**Fachhochschule Nordwestschweiz**
FHA	Fachhochschule Aargau, *Brugg-Windisch*
FHBB	Fachhochschule beider Basel, *Muttenz*
FHSO	Fachhochschule Solothurn, *Olten*
FHO	**Fachhochschule Ostschweiz**
HSR	Hochschule für Technik, *Rapperswil*
NTB	Hochschule für Technik, *Buchs*
SPF	Institut für Solartechnik der HSR
FHZ	**Fachhochschule Zentralschweiz**
HTA	Hochschule für Technik und Architektur, *Luzern*
HES-SO	**Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale**
EIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, *Yverdon*
HEVs	Haute École Valaisanne, *Sion*
PSI	**Paul Scherrer Institut, *Villigen***
ENE	Forschungsbereich Allgemeine Energie
FUN	Forschungsbereich Festkörperforschung mit Neutronen
LES	Waste Management Laboratory
LMN	Laboratory for Micro- and Nanotechnology
LTH	Laboratory for thermal-hydraulics
LWV	Laboratory for materials behaviour
NES	Forschungsbereich Nukleare Energie & Sicherheit
TEM	Forschungsbereich Teilchen und Materie
SUPSI	**Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana, *Canobbio,***
DCT	Dipartimento delle Costruzioni e del Territorio
LEEE	Laboratorio di energia, ecologia e economia
IST	Instituto Scienze della Terra
USI	**Università della Svizzera italiana, *Lugano***
MecoP	Istituto di Microeconomia e economia Pubblica
	Universität *Bern*
IBC	Institut für Biochemie
IAC	Institut für angewandte Chemie
	Université de *Genève*
CHIAM	Département de chimie minérale, analytique et appliquée
Cryst	Laboratoire de cristallographie
CUEPE	Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie
	Université de *Neuchâtel*
IMT	Institut de microtechnique
	Universität *Zürich*
SOZPSY	Sozialpsychologie
SOI	Sozialökonomisches Institut
ZFH	**Zürcher Fachhochschule**
ZHW	Zürcher Hochschule, *Winterthur*
HSW	Hochschule *Wädenswil*

NATIONALE ORGANISATIONEN / ORGANISATIONS NATIONALES

CORE	Commission fédérale pour la recherche énergétique / Eidgenössische Energieforschungskommission
BRENET	Building and Renewable Energies Network of Technology
CCEM	Competence Center for Energy & Mobility
ESC	Energy Science Center
KTI/CTI	Förderagentur für Innovation / Agence pour la promotion de l'innovation

INTERNATIONALE ORGANISATIONEN & PROGRAMME / ORGANISATIONS & PROGRAMMES INTERNATIONAUX

COST	Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique (UE)
EU / UE	Europäische Union / Union Européenne
EURATOM	European Atomic Energy Community
EUREKA	Pan-European network for market-oriented, industrial R&D
NEA / AEN	Nuclear Energy Agency of the OECD
IEA / AIE	International Energy Agency
ITER	Internat. Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
EESD	Energy, Environment and Sustainable Development (5th European FP)
OECD / OCDE	Organisation for Economic Co-operation and Development / Organisation de coopération et de développement économiques
SES	Sustainable Energy Systems (6th European FP)

ORGANISATION DER FORSCHUNG / ORGANISATION DE LA RECHERCHE

	Bereiche / Domaines	BFE-Bereichsleiter / Responsables de domaine à l'OFEN [1]	Programmleiter / Chefs de programme F,E+D / RD+D
I. Rationelle Energienutzung / Utilisation rationnelle de l'énergie	Gebäude (inkl. Solararchitektur) / Bâtiment (y compris architecture solaire)	Andreas Eckmanns	Charles Filleux
	Verkehr (inkl. Batterien, Supercaps) / Transports (y compris accumulateurs et supercaps)	Martin Pulfer	Martin Pulfer
	Elektrizität (Speicherung, Nutzung inkl. Geräte / Électricité (stockage, utilisation, y compris appareils)	Felix Frey	Roland Brüniger
	Elektrizitätsnetze / Réseaux électriques	Rainer Bacher	Rainer Bacher
	Wärme-Kraft-Kopplung / Couplage chaleur-force	Fabrice Rognon	Thomas Kopp
	Verbrennung / Combustion		Stephan Renz
	Kraftwerk 2020 / Centrales à gaz 2020		Peter Jansohn
	Brennstoffzellen (inkl. Wasserstoff) / Piles à combustible (y compris hydrogène)	Andreas Gut	Andreas Luzzi
	Verfahrenstechnische Prozesse (Industrie, Gewerbe) / Technologie des procédés (industrie, artisanat)	Martin Stettler	Martin Stettler
II. Erneuerbare Energien / Sources d'énergie renouvelables	Solarwärme (inkl. Speicherung) / Chaleur solaire (y compris stockage)	Urs Wolfer	Jean-Christophe Hadorn
	Photovoltaik / Photovoltaïque		Stefan Nowak
	Solarchemie / Chimie solaire		Pierre Renaud
	Umgebungswärme (Wärmepumpen) / Chaleur ambiante (pompes à chaleur)	Fabrice Rognon	Thomas Kopp
	Holz / Bois	Daniel Binggeli	Daniel Binggeli
	Biomasse (ohne Holz) / Biomasse (sans le bois)	Bruno Guggisberg	Bruno Guggisberg
	Kleinwasserkraftwerke / Force hydraulique (petites installations)		Manuel Buser
	Wasserkraft (grosse Werke) & Talsperren / Force hydraulique (grandes installations) & barrages	Georges Darbre	Georges Darbre
	Geothermie / Géothermie	Markus Geissmann	Rudolf Minder
	Wind / Énergie éolienne		Robert Horbaty
III. Kernenergie / Énergie nucléaire	Kerntechnik und nukleare Sicherheit / Technique et sécurité nucléaire	Christophe de Reyff [2]	Konstantin Foskolos
	Regulatorische Sicherheitsforschung / Recherche réglementaire en sécurité nucléaire		Brigitte Faust
	Kernfusion / Fusion nucléaire		Andreas Werthmüller
IV. Energiewirtschaftliche Grundlagen / Fondements de l'économie énergétique	Energiepolitik / Politique énergétique	Lukas Gutzwiller	Lukas Gutzwiller
	Ökonomie, Gesellschaft, Umwelt / Économie, société, environnement		
	Technologie-Transfer / Transferts technologiques	Andreas Gut, Christophe de Reyff, Gerhard Schriber	

[1] Auch zuständig für den entsprechenden Marktsektor in EnergieSchweiz / Est aussi responsable du secteur de marché correspondant dans SuisseEnergie

[2] Das BFE ist hier lediglich Auskunftsstelle / L'OFEN a ici un rôle de répondant

ADRESSEN DER BFE-BEREICHSLEITER / ADRESSE DES RESPONSABLES DE DOMAINES À L'OFEN

Rainer Bacher, Tel. 031 322 56 15
Daniel Binggeli, Tel. 031 322 68 23
Georges Darbre, Tel. 031 325 54 91
Andreas Eckmanns, Tel. 031 322 54 61
Felix Frey, Tel. 031 322 56 44
Markus Geissmann, Tel. 031 322 56 10
Bruno Guggisberg, Tel. 031 322 56 40
Andreas Gut, Tel. 031 322 53 24
Lukas Gutzwiller, Tel. 031 322 56 79
Martin Pulfer, Tel. 031 322 49 06
Christophe de Reyff, Tel. 031 322 56 66
Fabrice Rognon, Tel. 031 322 47 56
Gerhard Schriber, Tel. 031 322 56 58
Martin Stettler, Tel. 031 322 55 53
Urs Wolfer, Tel. 031 322 56 39

Die folgende Adresse ist für alle Obengenannten gültig: **BFE, 3003 Bern**
Adresses communes à tous les responsables: **OFEN, 3003 Berne**
Fax: 031 / 323 25 00 E-mail: **Vorname.Name@bfe.admin.ch / prénom.nom@bfe.admin.ch**

ADRESSEN DER PROGRAMMLEITER AUSSERHALB DES BFE / ADRESSES DES CHEFS DE PROGRAMMES À L'EXTÉRIEUR DE L'OFEN

Roland Brüniger
R. Brüniger AG, Zwillikerstr. 8, 8913 Ottenbach
Tel. 01 760 00 66 – Fax: 01 760 00 68
E-mail: roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Manuel Buser
entec ag, Consulting & Engineering
Bahnhofstr. 4, 9000 St.Gallen
Tel. 071 228 10 20 – Fax: 071 228 10 30
E-mail: manuel.buser@entec.ch

Brigitte Faust
HSK, 5232 Villigen – HSK
Tel. 056 310 39 16 – Fax: 056 310 39 95
E-mail: brigitte.faust@hsk.ch

Charles Filleux
Basler & Hofmann AG
Forchstr. 395, 8032 Zürich
Tel. 044 387 11 22 – Fax: 044 387 11 00
E-mail: charles.filleux@bhz.ch

Konstantin Foskolos
PSI, 5232 Villigen – PSI
Tel. 056 310 26 92 – Fax: 056 310 44 11
E-mail: konstantin.foskolos@psi.ch

Jean-Christophe Hadorn
Base Consultants SA, 51, ch. du Devin
1012 Lausanne
Tel. 021 651 42 82 – Fax: 021 651 42 83
E-mail: jchadorn@baseconsultants.com

Robert Horbaty
ENCO AG, Wattwerkstrasse 1, 4416 Bubendorf
Tel. 061 965 99 00 – Fax: 061 965 99 01
E-mail: robert.hotbaty@enco-ag.ch

Peter Jansohn
PSI, 5232 Villigen-PSI
Tel. 056 310 28 71 – Fax: 056 310 26 24
E-mail: peter.jansohn@psi.ch

Thomas Kopp
FH Ostschweiz, Oberseestr. 10, 8640 Rapperswil
Tel. 055 222 49 23 – Fax: 055 222 44 00
E-mail: thomas.kopp@hsr.ch

Andreas Luzzi
FH Rapperswil,
Oberseestr. 10, 8640 Rapperswil
Tel. 055 222 48 22 – Fax: 055 222 48 44
E-mail: andreas.luzzi@solarenergy.ch

Rudolf Minder
Minder Energy Consulting,
Ruchweid 22, 8917 Oberlunkhofen
Tel. 056 640 14 64 – Fax: 056 640 14 62
E-mail: rudolf.minder@bluewin.ch

Stefan Nowak
Nowak Energie & Technologie AG
Waldweg 8, 1717 St.Ursen
Tel. 026 494 00 30 – Fax: 026 494 00 34
E-mail: stefan.nowak.net@bluewin.ch

Pierre Renaud
Planair SA, Crêt 108 a, 2314 La Sagne NE
Tel. 032 933 88 40 – Fax: 032 933 88 50
E-mail: pierre.renaud@planair.ch

Stephan Renz
Beratung Thoma & Renz, Elisabethenstr. 44,
Postfach, 4010 Basel
Tel. 061 271 76 36 – Fax: 061 272 57 95
E-mail: renz.btr@swissonline.ch

Andreas Werthmüller
SBF/SER, Hallwylstrasse 4, 3003 Bern
Tel. 031 323 35 95 – Fax: 031 322 78 54
E-mail: andreas.werthmueller@sbf.admin.ch