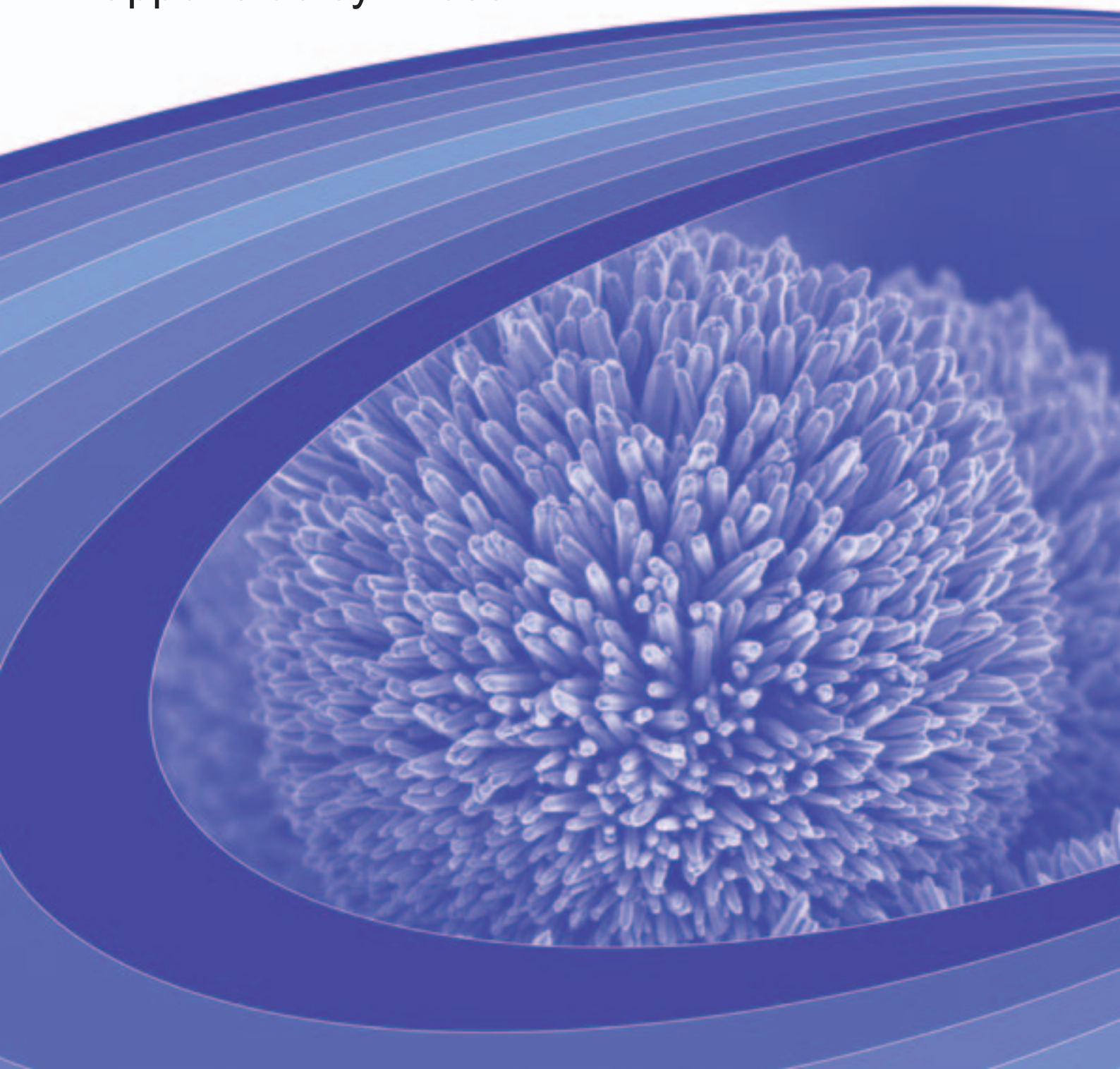
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Swiss Federal Office of Energy SFOE

Energieforschung 2009
Überblicksberichte

Recherche énergétique 2009
Rapports de synthèse



ENERGIEFORSCHUNG
RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE
2009

Vorwort / *Avant-propos* 3

Highlights 2009 5

Überblicksberichte / *Rapports de synthèse*

Effiziente Energienutzung / *Utilisation efficace de l'énergie*

Forschungsprogramm Energie in Gebäuden 13
Forschungsprogramm Verkehr 31
Forschungsprogramm Akkumulatoren 45
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen 51
Forschungsprogramm Netze 65
Forschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte 73
Forschungsprogramm Verbrennung 85
Forschungsprogramm Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS) 101
Forschungsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellen 115
Forschungsprogramm Industrielle Prozesse 133

Erneuerbare Energie / *Sources d'énergie renouvelables*

Programme de recherche Chaleur solaire et Stockage de chaleur 143
Forschungsprogramm Photovoltaik 157
Programme de recherche Solaire industriel à haute température 171
Forschungsprogramm Biomasse und Holzenergie 181
Forschungsprogramm Wasserkraft 197
Forschungsprogramm Geothermie 207
Forschungsprogramm Windenergie 219

Kernenergie / *Énergie nucléaire*

Forschungsprogramm Kerntechnik und Nukleare Sicherheit 229
Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung 247
Programme de recherche Fusion thermonucléaire contrôlée 261
Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle 267

Querschnittsprogramme / *Programmes transversaux*

Forschungsprogramm Energie–Wirtschaft–Gesellschaft 273

Anhänge / *Annexes* 289

Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE)
Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) 289

Zuständigkeiten bei den Forschungsprogrammen
Responsables des programmes de recherche 290

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 sowie der Pilot- und Demonstrationsprogramme erfolgt durch die Bereichs- und Programmleiter des BFE. Für die Umsetzung der Ergebnisse in den Markt werden sie unterstützt durch das Forschungsprogramm Wissens- und Technologietransfer und die Bereichsleiter des Programms EnergieSchweiz.

Die am Anfang 2011 zu erscheinen *Projektliste der Energieforschung des Bundes 2008/2009* wird Auskunft über die Aufwendungen der mit öffentlichen Mitteln finanzierten Energieforschung sowie eine detaillierte Zusammenstellung der Geldflüsse geben. Zur Erinnerung: 2007 kamen rund 55 % der von der öffentlichen Hand aufgewendeten 174,2 Mio. Franken aus dem ETH-Bereich. Das BFE war mit einem Anteil von 15 % noch vor der EU (10 %) zweitgrösster Finanzgeber. Die meisten Geldmittel kamen der effizienten Energienutzung zugute (67,2 Mio. Franken), 52 Mio. flossen in die Kernenergie und 39,3 Mio. in die erneuerbaren Energie. Für energiewirtschaftliche Grundlagen wurden 15,6 Mio. Franken aufgewendet.

Die im vorliegenden Band publizierten Überblicksberichte der Programmleiter des BFE zeigen die Fortschritte derjenigen Projekte auf, die durch das BFE mitfinanziert worden sind. Daneben sind aber auch Hinweise auf andere, mit öffentlichen und privaten Mitteln durchgeführte Forschungsarbeiten aufgeführt. Der detaillierte Fortschritt einzelner Projekte kann in den entsprechenden Jahres- und Schlussberichten verfolgt werden, die auf der Website www.energieforschung.ch publiziert werden. Das Reproduzieren von einzelnen Beiträgen ist unter Angabe der Quelle gestattet.

Juni 2010

Bundesamt für Energie (BFE)

Titelbild: *Elektronenmikroskopische Aufnahme von Zinkoxid-Nanostrukturen, welche elektrochemisch auf Polystyrene-Kügelchen abgeschieden wurden. Felder von diesen periodisch angeordneten Strukturen können nützlich sein als Baustein für neuartige Dünnschichtsolarzellen. (Quelle: Empa)*

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. L'accompagnement des divers programmes de recherche et de développement est pris en charge par les chefs de domaine et de programme à l'OFEN. Pour la transposition des résultats vers le marché, ceux-ci sont appuyés par le programme de Transfert scientifique et technologique et par les responsables de domaine du programme SuisseEnergie.

La *Liste des projets de la recherche énergétique de la Confédération 2008/2009*, *à paraître en début 2011*, renseignera sur les dépenses des pouvoirs publics au titre de la recherche énergétique, ainsi que sur la composition des flux de financement. Rappelons que, en 2007, près de 55 % des 174,2 MCHF déployés par les collectivités publiques étaient issus du Domaine des EPF. Avec une part de 15 %, l'OFEN occupait encore le deuxième rang des bailleurs de fonds, devant l'UE (10 %). La plus grande part des moyens financiers étaient inscrits au titre de l'utilisation efficace de l'énergie (67,2 MCHF), alors que 52 MCHF étaient attribués à l'énergie nucléaire et 39,3 MCHF aux sources d'énergie renouvelables. 15,6 MCHF étaient consacrés aux fondements de l'économie énergétique.

Le présent volume rassemble les rapports de synthèse annuels des chefs de programme de l'OFEN. On y trouvera décrits les progrès obtenus dans le cadre des divers projets cofinancés par l'OFEN. Il y est également fait mention des travaux de recherche accomplis grâce à d'autres moyens publics et/ou privés. Le progrès détaillé des projets est documenté dans les rapports annuels et finaux spécifiques qui peuvent être téléchargés du site www.recherche-energetique.ch. La reproduction d'extraits du présent document est autorisée, à condition d'en indiquer la source.

Juin 2010

Office fédéral de l'énergie (OFEN)

Page de titre : *Image prise au microscope électronique à balayage des nanostructures d'oxyde de zinc. Les arrangements de telles structures pourraient être un élément utile dans de nouveaux types de cellule solaire nanostructurée avec absorbeur ultra mince. (source : Empa)*

Highlights 2009

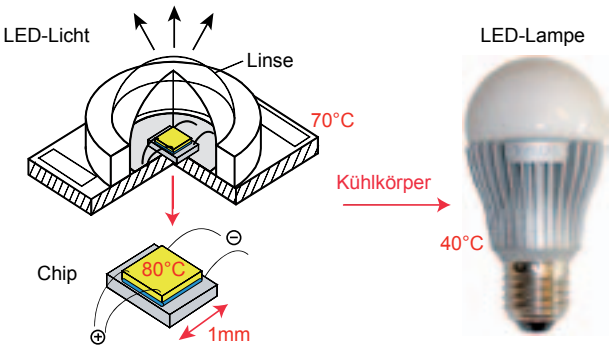
Sanierung geschützter Bestandsgebäude
Assainissement de bâtiments protégés

Innen- oder Aussendämmung? Die Tours Cayla mit Baujahr 1954 gehören zum Inventar geschützter Bauten der Stadt Genf. Die Forscher des CUEPE an der Universität Genf konnten die Behörden dafür gewinnen, je mindestens ein Gebäude mit Aussen- bzw. Innendämmung zu sanieren. Mit dem Projekt konnte gezeigt werden, dass beide Lösungen architektonisch und bauphysikalisch überzeugend realisierbar sind. Der Heizenergiebedarf wurde auf die Hälfte reduziert, wobei die Lösung mit Aussendämmung weitere 15 % einspart. (→ Seite 13)

Isolation intérieure ou extérieure? Les Tours Cayla, édifiées en 1954, font partie de l'inventaire des bâtiments protégés de la ville de Genève. Les chercheurs du CUEPE de l'Université de Genève ont convaincu les autorités d'équiper au moins deux de ces bâtiments d'une isolation extérieure et intérieure, respectivement. Le projet a démontré que l'une et l'autre solution étaient réalisables, tant du point de vue de l'architecture que de la physique du bâtiment. Les besoins d'énergie de chauffage ont été réduits de moitié, l'isolation extérieure valant encore un plus de 15 %. (→ page 13)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Energie in Gebäuden
L'énergie dans les bâtiments

Effiziente LED-Beleuchtung
Eclairage efficace par LED



Mit der weissen LED (Licht emittierende Diode) steht eine neue Technologie zur effizienten Raumbeleuchtung zur Verfügung. Doch Markt und Entwicklung sind unübersichtlich und verbindliche Qualitätsstandards sind kaum vorhanden. Deshalb wurden die spezifischen Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung identifiziert und die drei Schlüsselmerkmale Effizienz, Lichtqualität und Lebensdauer bewertet. Bezüglich Einsatz ist die LED-Beleuchtung dort attraktiv und wirtschaftlich, wo sie ihre einzigartigen Vorteile ausspielen kann: gerichtetes Licht, sehr lange Lebensdauer, keine Wärme im Lichtstrom, ultraviolettfreies Licht, Farbmodulation und verlustarme Dimmung. (→ Seite 51)

Une technique nouvelle, celle de la diode blanche superluminescente (LED) fait de plus en plus d'adeptes dans l'éclairage. Or le marché et le développement évoluent sans cesse et il n'y a guère de normes de qualité contraignantes. On a donc défini les caractéristiques spécifiques d'un tel éclairage et on en a évalué les trois qualités essentielles, à savoir l'efficacité, la qualité d'éclairage et la durée de vie. Son adoption est indiquée là où il peut faire jouer ses avantages indéniables: éclairage orienté, très longue durée de vie, flux de lumière sans réchauffement ni rayonnement UV, modulation de la couleur et réglage de la puissance impliquant peu de déperditions. (→ page 51)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Elektrizitätstechnologien und -anwendungen
Technologies et utilisations de l'électricité

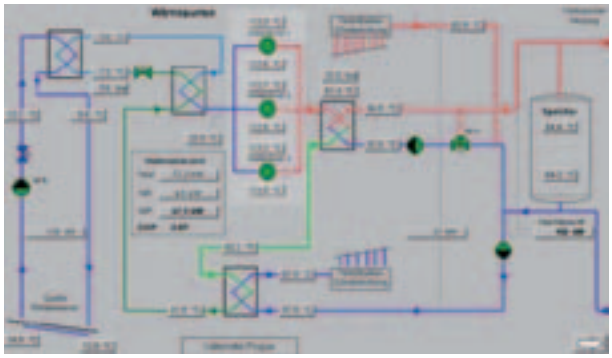
Energieeffizientes Trocknen
Séchage peu gourmand d'énergie

Trocknungsverfahren zur Herstellung von hochwertigem Trockenfuttermitteln für Nutztiere können durch mechanische Entwässerung (Vorpresse) bedeutend effektiver werden.In zwei Projekten wurden folgende Resultate erreicht: (1) 27 % Effizienzgewinn (Primärenergie 190 statt ursprünglich 258 Liter Heizöl$_{EL}$ pro Normtonne Trockengut; (2) Reduktion des CO_2-Ausstosses um 240 t/a in einer durchschnittlichen Trocknungsanlage (1000 Normtonnen Trockengut/a; 3000 MWh/a); (3) bessere Futtermittelqualität bei stark verkürzter Durchlaufzeit von 60 auf 45 Minuten und 15 °C tieferer Trockentemperatur; (4) Bessere Rendite nach 3 Jahren Pay-Back Time für die Investition in die Vorpresse; (5) das energiereiche Prozesswasser kann mittels biotechnologischer und chemischer Verfahren weiter verwertet werden. (→ Seite 133)

La déshydratation mécanique (pressage préalable) diminue fortement les besoins d'énergie dans la production de fourrage de haute valeur pour le bétail. En effet, deux projets ont donné les résultats suivants: (1) 27 % de gain d'efficacité (énergie primaire 190 litres d'huile de chauffage$_{EL}$ au lieu de 258 litres, initialement, par tonne standard de produit séché); (2) réduction des rejets de CO_2 de 240 t/a dans un séchoir moyen (1000 tonnes standard de produit séché/a; 3000 MWh/a); (3) meilleure qualité de fourrage avec un temps de rotation ramené de 60 à 45 minutes et une température de séchage abaissée de 15 °C; (4) rendement amélioré, après 3 ans d'amortissement, de l'investissement dans le séchage préalable; (5) l'eau résiduaire riche d'énergie peut être réutilisée grâce à des processus biotechnologiques et chimiques. (→ page 133)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Industrielle Prozesse
Processus industriels

Exergieanalyse der Propanwärmepumpe im Schulhaus *Limmat* in Zürich
Analyse exergétique de la pompe à chaleur à propane dans une école de Zurich



Seit Januar 2006 ist im Schulhaus Limmat eine Propanwärmepumpe in Betrieb, welche den Altbau aus dem Jahre 1909 mit Heizwasser und Brauchwarmwasser versorgt. Sie bezieht ihre Wärme aus einem Abwasserkanal mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 14 °C. Die Wärmepumpe weist eine Jahresarbeitszahl von 2,7 auf. Mittels einer Exergieanalyse konnte gezeigt werden, dass die Wärmepumpe nicht optimal funktioniert, und dass auch die Hydraulik ein Verbesserungspotenzial aufweist. So läuft zum Beispiel das ganze Wärmeabgabesystem auf einer zu hohen Abgabetemperatur, da eine kleine Abwartswohnung mit versorgt wird, die eine hohe Vorlauftemperatur benötigt. Mit den in diesem Bericht vorgeschlagenen Massnahmen kann die Jahresarbeitszahl auf 4,4 gesteigert werden. (→ Seite 73)

Depuis janvier 2006, le collège Limmat possède une pompe à chaleur à propane qui produit l'eau de chauffage et l'eau sanitaire nécessaires dans ce bâtiment datant de 1909. La chaleur est tirée d'une canalisation pour l'évacuation des eaux usées dont la température moyenne sur l'année est de 14 °C. Son coefficient de performance annuel est de 2,7. Or une analyse exergétique a montré que son fonctionnement n'est pas optimal et que le système hydraulique peut être amélioré aussi. Ainsi la fourniture de chaleur est réglée sur une température exagérément élevée, parce que liée à un petit logement de concierge qui nécessite une température de départ élevée. Les mesures proposées dans le rapport permettent de porter le coefficient de performance annuel à 4,4. (→ page 73)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Wärmepumpen, WKK, Kälte
Pompes à chaleur, CCF, réfrigération

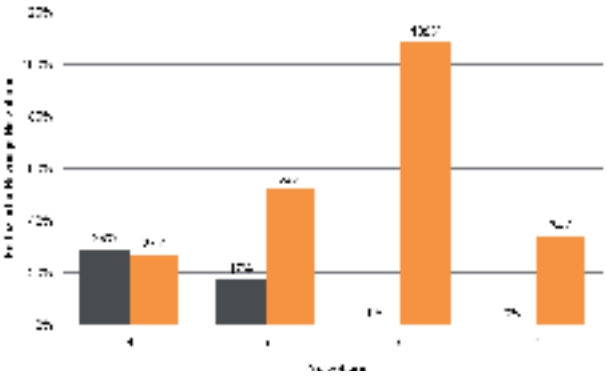
Vakuumisolation spart 90 %
Isolation par le vide améliorée de 90 %

Erfolgversprechende Ansätze für eine hocheffiziente thermische Vakuumisolation könnten bei bereits effizienten A++-Kühlschränken eine weitere Energieverbrauchsreduktion von bis zu 80 % ermöglichen. Neben dem Kühlschrank kann diese innovative Technologie auch für Kaffeemaschinen oder weitere Haushaltsgeräte mit thermischen Isolationen verwendet werden. Da eine derartige Isolation nur thermisch wirksam ist, wenn dauerhaft Innendrücke von $<10^{-3}$ mbar eingehalten werden, kommen als Wandmaterialien nur Metalle, Glas oder metallbeschichtete Kunststoffe in Frage. Die technische Umsetzung stellt eine grosse Herausforderung dar, die in vielen Bereichen entsprechende Forschungsarbeiten erfordert. (→ Seite 51)

Selon certains indices prometteurs, un nouveau type d'isolation thermique par le vide permettrait de réduire encore d'un facteur pouvant atteindre 80% la consommation d'énergie des armoires frigorifiques A++, déjà très efficaces. Cette technique innovante est applicable aussi sur des machines à café et sur d'autres appareils électroménagers à isolation thermique. Elle n'agit toutefois qu'avec des pressions internes durablement inférieures à 10^{-3} mbar, exigeant des parois en métal, en verre ou en matière plastique métallisée. La mise en oeuvre est très difficile et elle implique des travaux de recherche dans de nombreux domaines. (→ page 51)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Elektrizitätstechnologien und -anwendungen
Technologies et utilisations de l'électricité

Kosten der dezentralen Einspeisung
Coûts de l'injection décentralisée

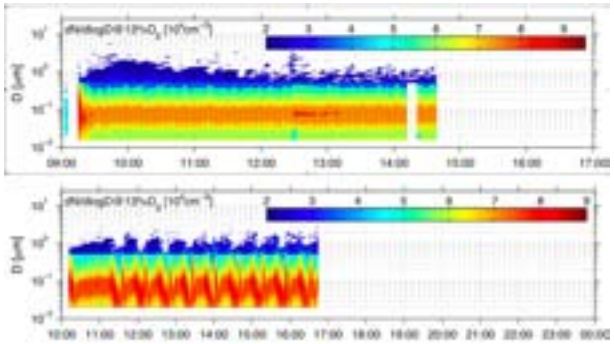


Eine Studie zeigt, dass ein starker Zubau dezentraler Erzeugung grundsätzlich möglich ist, dass jedoch, im Szenario III, Angebotsvariante D+E der Energieperspektiven 2035, mit Mehrkosten für Netzausbau und Systemdienstleistungen in Höhe von ca. 15 % der tarifrelevanten Netzkosten zu rechnen ist. Dies entspricht einer Erhöhung um knapp 1,5 Rp./kWh. Auf den im Jahre 2009 gesamten Verbraucherstrompreis bezogen entspricht dies einer Steigerung um ca. 7 %. (→ Seite 273)

Il ressort d'une étude que rien ne s'oppose, en principe, à un fort développement de l'injection d'électricité décentralisée. Cependant, dans les conditions du scénario III, offre D+E, des Perspectives énergétiques 2035, il faut prévoir des coûts de réseau accrus de 15% (développement des réseaux, services-système). Cela représente près de 1,5 ct/kWh, soit un renchérissement d'environ 7% du prix total de vente au consommateur en 2009. (→ page 273)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG)
Énergie – Économie – Société (EES)

Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen
Rejets produits par les chaudières modernes à pellets utilisées normalement

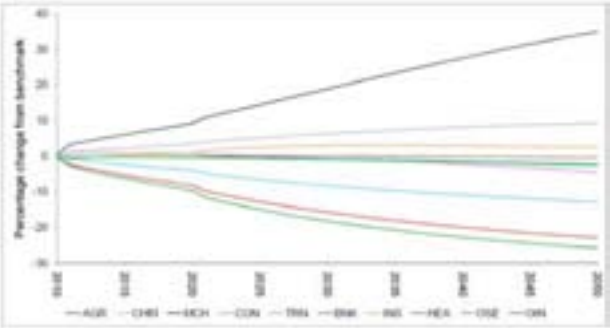


Emissionen von Partikeln unterschiedlicher Korngrösse von 2 Pelletkesseln bei Nennleistung (oben) und Anfahren mit anschliessendem mehrfachen Takten (unten) wurden gemessen. Start/Stop ergibt deutlich mehr und grössere Partikel auf als bei stationärem Betrieb. In der Startphase treten kurzfristig deutlich erhöhte Emissionen an unvollständig oxidierten Gasen und Feststoffen auf. Bei stationärem Betrieb sind die Emissionen gering. Beim Ausschalten treten wiederum kurzfristig deutlich erhöhte Emissionen auf. Da die Emissionen bei jedem Start- und Stoppvorgang einige Minuten lang bedeutend höher sind als bei stationärem Betrieb, ist taktender Betrieb grundsätzlich unerwünscht. Die Emissionen im Taktbetrieb sind für die untersuchten Kessel nur dann vertretbar, wenn die Laufzeit inklusive Start und Ausschalten mindestens 80–90 Min. beträgt. (→ Seite 181)

On a mesuré les rejets de particules de divers grains de 2 chaudières à pellets opérant à la puissance nominale (en haut) et au démarrage, suivi de plusieurs changements de phases programmés (en bas). Le fonctionnement arythmique produit des particules nettement plus grosses et plus denses que l'exploitation stationnaire. Au démarrage, on observe brièvement le rejet nettement accru de gaz insuffisamment oxydés et de corps solides. En fonctionnement stationnaire, les rejets sont modestes. Au débranchement, on a à nouveau des rejets accrus pendant peu de temps. Comme tout changement de rythme s'accompagne de rejets fortement accrus durant quelques minutes, le fonctionnement arythmique est généralement peu souhaitable. Pour les chaudières examinées, ce type d'exploitation n'est indiqué que si le temps de marche est d'au moins 80–90 minutes, démarrage et arrêt compris. (→ page 181)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Biomasse und Holzenergie
Biomasse et bois-énergie

Makroökonomische Auswirkungen künftiger Energiepolitik
Effets macroéconomiques de la future politique de l'énergie

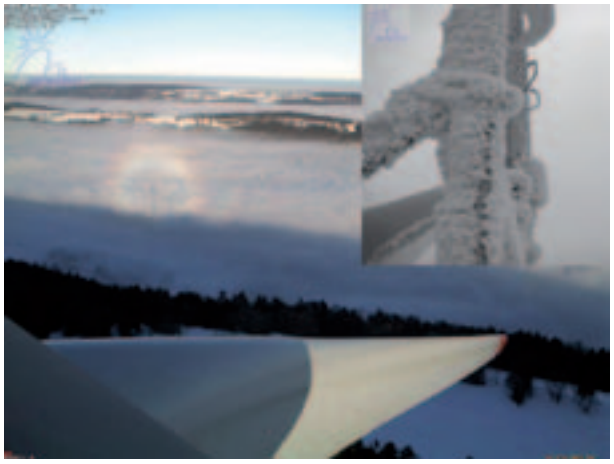


Basierend auf Energieszenarien werden im Projekt CITE (Computable Induced Technology and Energy) makroökonomische Grössen modelliert. CITE unterscheidet sich im Vergleich zu anderen Modellen durch den expliziten Einbezug der neuen Wachstumstheorie. Wachstum entsteht durch die Akkumulation von physischem und Wissenskapital, wobei der Anreiz zur Akkumulation endogen ist. Die Modellrechnungen zeigen, dass die makroökonomischen Auswirkungen zukünftiger Energiepolitik relativ moderat sind. (→ Seite 273)

A partir des scénarios énergétiques, le projet CITE (Computable Induced Technology and Energy) modélise des grandeurs macroéconomiques. CITE se caractérise par l'intégration explicite de la nouvelle théorie de la croissance. Celle-ci repose sur l'accumulation de capital physique et de savoir, l'incitation à la croissance étant endogène. Les calculs sur ce modèle montrent que les effets macroéconomiques de la future politique de l'énergie sont relativement modestes. (→ page 273)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG)
Énergie – Économie – Société (EES)

Vereisungsforschung im Jura
Recherches sur le givrage dans le Jura

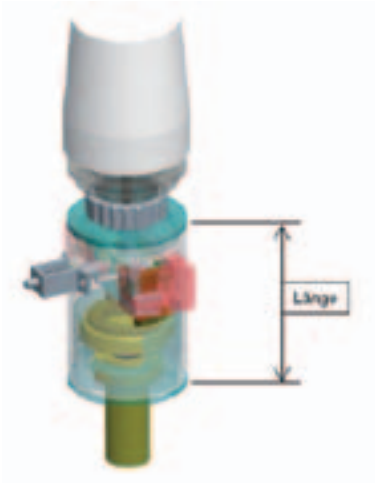


Im Jura werden die Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen erstmals quantifiziert. Dies geschieht durch den Vergleich zweier Anlagen mit und ohne betriebene Blattheizung. Neben der Bestimmung der Energiemengen, die durch Vereisung respektive durch die Enteisung verloren gehen, werden die Zusatzlasten für die Anlage und die möglicherweise veränderten Geräuschemissionen durch Eis sowie die Zuverlässigkeit der Enteisung und des Eisdetektors gemessen. Erkenntnisse zur Dauer und Art der Vereisung werden in die derzeit erarbeitete Vereisungskarte der Schweiz einfliessen. (→ Seite 219)

Dans le Jura, on chiffre les effets du givrage sur le fonctionnement des éoliennes et sur leur rendement énergétique. Pour ce faire, on compare entre elles deux installations, dont l'une avec et l'autre sans chauffage des pales. Il s'agit de déterminer les quantités d'énergie perdues du fait du givrage ou qui sont consacrées au dégivrage, mais aussi les charges supplémentaires imposées à l'installation ainsi que les émissions sonores peut-être modifiées, et la fiabilité du dégivrage et du détecteur de glace. Les enseignements recueillis, concernant la durée et le type de givrage, figureront dans la carte des glaciations en Suisse, en cours d'élaboration. *(→ page 219)*

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Windenergie
Energie éolienne

Raumkühlung mit Heizkörpern
Refroidissement par corps de chauffe

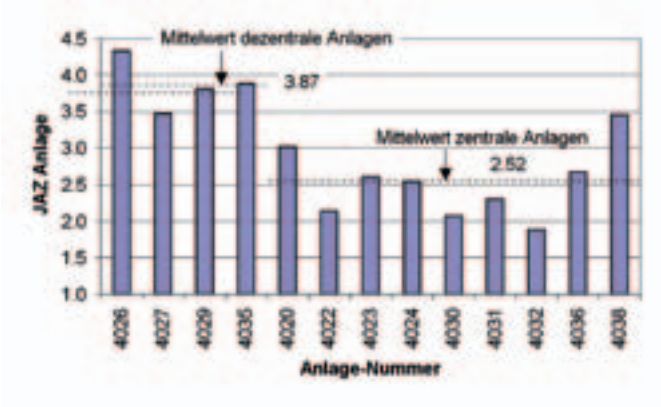


Können Heizkörper zur Kühlzwecken eingesetzt werden? Kann die Regulierung mit einem selbsttätig, stromlos regulierenden Thermostaten mit Umkehrfunktion realisiert werden? Diesen Fragen sind das Ingenieurbüro J. Schnyder zusammen mit dem NTB Buchs, der Firma Arbonia und HPS Ingenieure nachgegangen. Die Versuche im Labor mit einem Funktionsmuster sowie thermische Simulationen haben ergeben, dass Kühlleistungen zwischen 4 % und 11 % der Norm-Heizleistungen erreicht werden können. Damit können sommerliche Raumtemperaturen um bis zu 4 Kelvin gesenkt werden. Ein Kühl-Heizkörper erhöht die sommerliche Behaglichkeit spürbar. (→ Seite 13)

Un corps de chauffe peut-il servir à des fins de refroidissement? Peut-on assurer la régulation au moyen d'un thermostat autonome à fonction réversible travaillant sans électricité? Telles sont les questions auxquelles se sont attachés le bureau d'ingénieurs J. Schnyder, collaborant avec NTB Buchs, l'entreprise Arbonia et HPS Ingénieurs. Des essais en laboratoire à l'aide d'un modèle de fonctions ainsi que des simulations thermiques montrent que l'on peut obtenir une capacité de réfrigération de 4 % à 11 % de la puissance de chauffage standard. Cela suffit pour réduire la température estivale d'un local de 4 Kelvin au maximum. Ainsi, un corps de chauffe refroidisseur augmente sensiblement le confort. *(→ page 13)*

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Energie in Gebäuden
L'énergie dans les bâtiments

Analyse von Grosswärmepumpen
Analyse de grosses pompes à chaleur

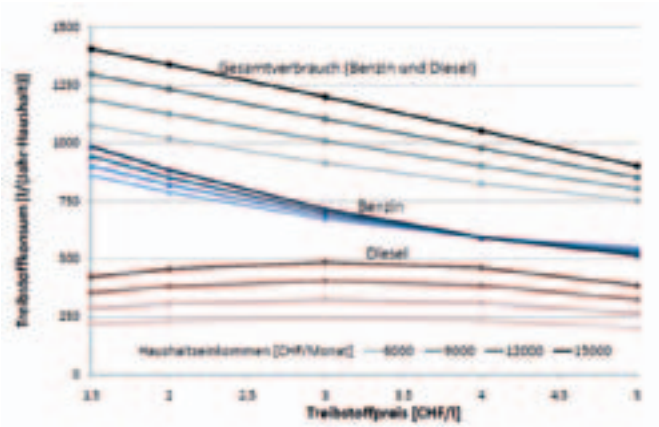


Die energietechnische Analyse von 13 Grosswärmepumpen zeigt erhebliche Unterschiede zwischen zentralen und dezentralen Wärmeversorgungsanlagen. Der Hauptgrund liegt in den erhöhten Wärmeverlusten der Verbindungsleitungen und der zusätzlich benötigten Pumpenergie, die bei der zentralen Versorgung von mehreren Gebäuden anfallen. Innerhalb der verschiedenen Anlageklassen gibt es weitere Unterschiede, die vor allem auf die Art der Wärmequelle zurück zu führen sind. Aus dem Vergleich der reinen Wärmepumpen-Wirkungsgrade mit den Anlagenwirkungsgraden zeigt sich auch, dass ein enormes Verbesserungspotential in einer guten Anlagenplanung liegt. Leider konnten nicht alle realisierten Anlagenkonzepte als energetisch optimal bewertet werden. (→ Seite 73)

L'analyse énergétique de 13 pompes à chaleur de gros calibre a montré de substantielles différences entre centrales de chauffage et équipements décentralisés. La raison principale en sont les déperditions accrues par les conduites et l'énergie de pompage requise pour l'approvisionnement centralisé de plusieurs bâtiments. Par ailleurs, au sein des classes de pompes à chaleur, il existe des différences liées avant tout à la source de chaleur. La comparaison du rendement de la seule pompe à chaleur avec celui de l'équipement complet montre aussi l'importance décisive d'une bonne planification. Il faut reconnaître que toutes les installations examinées ne méritent pas, dans l'optique énergétique, une appréciation optimale. (→ page 73)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Wärmepumpen, WKK, Kälte
Pompes à chaleur, CCF, réfrigération

Einfluss von Treibstoffpreisen auf das Mobilitätsverhalten
Prix du carburant et comportement en mobilité



Zwei Studien (Auswertung makroökonomischer Daten und Befragung) haben die Effekte erhöhter Treibstoffpreise auf das Mobilitätsverhalten analysiert. Kurzfristig reagieren Konsumenten sehr schwach auf Preisänderungen. Langfristig ist davon auszugehen, dass bei einem relativ geringen Benzinpreis, eine Preiserhöhung um 10 % zu einem Rückgang des Benzinkonsums von etwa 3 % führt. Weiter wurde bestätigt, dass trotz hohen Mobilitätskosten, die Befragten dazu tendieren nicht umzuziehen. (→ Seite 273)

Deux enquêtes (Analyse de données macroéconomiques et sondage) ont été consacrées aux effets d'un renchérissement des carburants en termes de comportement dans le domaine de la mobilité. Dans l'immédiat, les réactions des consommateurs aux fluctuations de prix sont minimes. A terme, on peut admettre que, si une essence relativement bon marché renchérit de 10%, la demande diminuera de quelque 3%. Il se confirme par ailleurs que des coûts de mobilité élevés ne poussent guère les personnes interrogées à déménager. (→ page 273)

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Energie – Wirtschaft – Gesellschaft (EWG)
Énergie – Économie – Société (EES)

Deterministische Sicherheitsanalysen

Die Mission des Projekts STARS (Sicherheitsexpertise und -forschung bezüglich Transientenanalysen der Reaktoren in der Schweiz) besteht in Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet von Sicherheitsanalysen für Leichtwasserreaktoren. Für eine möglichst weitgehende mechanistische Beschreibung, die auch als «Best-Estimate Analyse» bezeichnet wird, werden hierfür gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische Modelle entwickelt und angewandt. Hierzu werden dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Simulationsprogramme adaptiert, eingesetzt und auch weiterentwickelt. In der Schweiz übernimmt STARS teilweise die Rolle einer technisch-wissenschaftlichen Forschungs- und Sachverständigenorganisation zur Unterstützung des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI).

Für den Bereich Systemtechnik wurden die bestehenden Modellierungen aller Schweizerischen Kernanlagen auf das Rechenprogramm *Trace* übertragen, dem aktuellsten Programm für die Simulation des Systemverhaltens von Leichtwasserreaktoren. Die Modelle wurden anhand bestehender Anlagendaten, durch die Nachrechnung von Experimenten an grosstechnischen Versuchsanlagen und durch den Vergleich mit anderen bereits überprüften Rechenprogrammen validiert. Ein langfristiges Ziel ist zudem die Einführung integraler Analysemethoden, mit denen beispielsweise physikalische Modelle, der Detaillierungsgrad der räumlichen Modellierung und die Schnittstellen zwischen den Analyseprogrammen problemspezifisch herangezogen werden (multi-physics). Als Prototyp wurde eine Prozedur entwickelt, mit der ein 3D-Modell des Reaktordruckbehälters (RDB) des *European Pressurized Water Reactors* (EPR) generiert werden konnte. Schliesslich wurden Anwendungen von CFD-Programmen (Computational Fluid Dynamics) für den EPR und den Siedewasserreaktor BWR/6 (KKW Leibstadt) entwickelt.

Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Regulatorische Sicherheitsforschung
Recherche réglementaire en sécurité nucléaire

Analyses déterministes en sûreté nucléaire

La mission du projet STARS (« *Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland* ») réside dans la R&D dans le domaine des analyses en matière de sûreté nucléaire pour les réacteurs à eau légère. En vue d'une description mécanistique aussi large que possible, que l'on nomme aussi « *Best Estimate Analysis* », on a développé et appliqué des modèles thermo-hydraulico-mécaniques couplés. Des programmes de simulation ont été adaptés à l'état de la science et de la technique, mis en œuvre et continuellement développés. En Suisse, STARS tient partiellement le rôle d'une organisation technico-scientifique dans la recherche et la compréhension des procédés pour soutenir l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN).

Dans le domaine spécifique de la technique des systèmes, les modélisations existantes de toutes les installations nucléaires suisses ont été reportées sur le programme de calcul *Trace*, le programme le plus moderne pour la simulation du comportement des systèmes de réacteurs à eau légère. Les modèles, basés sur des données effectives des installations, ont été validés par des expériences menées sur de grandes installations expérimentales et par la comparaison avec d'autres programmes de calcul déjà éprouvés. Un but de longue haleine est l'introduction de méthodes intégrales d'analyse avec lesquelles on pourra tirer, problème par problème, des modèles physiques, le degré de détail des modélisations spatiales, ainsi que les interfaces entre les programmes d'analyse (« multi-physics »). Comme prototype, une procédure a été développée, avec laquelle un modèle 3D de la cuve du *European Pressurized Water Reactors* (EPR) a pu être généré. Enfin, des applications du programme CFD (« *Computational Fluid Dynamics* ») ont été développées pour l'EPR et le réacteur à eau bouillante BWR/6 de la centrale de Leibstadt.

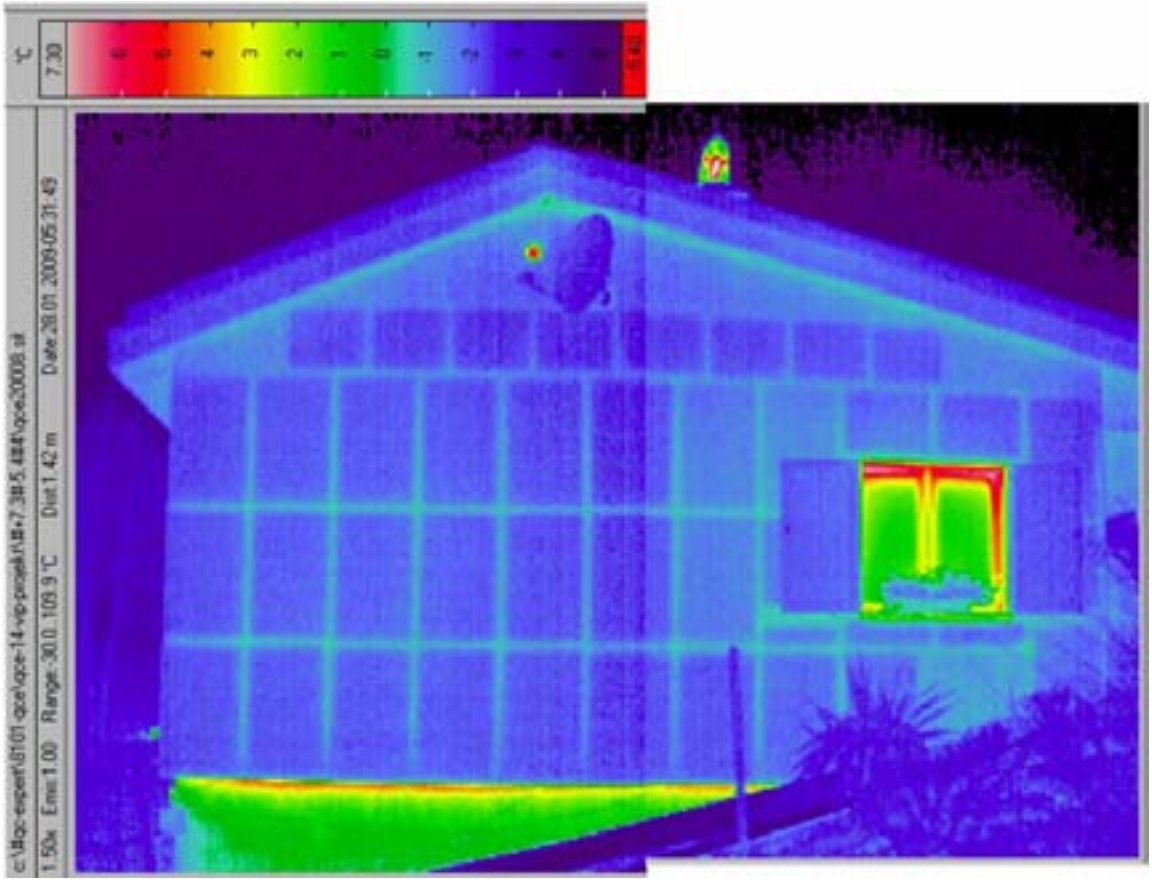
Forschungsprogramm / *Programme de recherche*
Kerntechnik und Nukleare Sicherheit
Techniques et sécurité nucléaires

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Charles Filleux

filleux.ren@baslerhofmann.ch



Infrarotaufnahme einer mit Vakuumisolationspaneelen (VIP) verkleideten Fassade

Aus der Thermografieaufnahme geht hervor, dass die Temperatur bei den Fugen deutlich höher ist als auf den VIP-Paneelen, was eine Wärmebrücke d.h. einen linearen Wärmeverlust bedeutet. Das Bild verdeutlicht auch, dass die VIP's zum Zeitpunkt der Aufnahme intakt (unbelüftet) waren. (Bild: Empa Building Technologies)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Thema Energieeffizienz in Gebäuden hat im Jahr 2009 in Politik und Gesellschaft an Bedeutung gewonnen: Auf Anfang Jahr wurde die «Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn)» in Kraft gesetzt. Ebenso viel Aufmerksamkeit hat die Einführung des Gebäudeausweis der Kantone (GEAK) gebracht: Über 1000 akkreditierte Fachleute haben innert weniger Monate 15'000 Gebäudeausweise erstellt. Dadurch ist die Bevölkerung weiter sensibilisiert worden, und der Bekanntheitsgrad der diversen Gebäudestandards Minergie und Minergie-P ist gestiegen. Vor diesem Hintergrund, sowie dank der Mittel die über den Klimarappen in die Gebäudesanierung geflossen sind, ist das Interesse an neuen Produkten für die Wärmedämmung bei Bauherren und Fachplanern geweckt worden.

In keinem Forschungsbereich sind Politik und Forschung derart miteinander verknüpft, wie in der Energieforschung. Von ihre wird erwartet, dass sie eine Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz, der nachhaltigen Energieversorgung, sowie zur wirtschaftlichen Stärkung des Standorts Schweiz beiträgt. Das Forschungsprogramm *Energie in Gebäuden* verfolgt deshalb inhaltlich eine breite Abstützung.

Gestützt auf das *Energieforschungskonzept* der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE [63] verfolgt das Forschungsprogramm *Energie in Gebäuden* in der Periode 2008 – 2011 folgende Ziele:

- Energieverbrauchsreduktion;
- Steigerung der Energieeffizienz;
- Integration Erneuerbarer Energien;
- Minimierung des CO_2-Ausstosses durch verbesserte Technologien.

Dazu dienen nachfolgende fünf Schwerpunkte, die im Detailkonzept [64] weiter präzisiert sind.

Fünf Schwerpunkte des Forschungsprogramm *Energie in Gebäuden*

Gebäude- und Siedlungskonzepte für eine 2000-Watt-kompatible Bauwerksentwicklung

Unter «Bauwerk» wird das Zusammenwirken der Teilsysteme Nutzung, Struktur (Konstruktion, Form) und Prozess (Planungs-, Bau- und Betriebsprozess) über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes verstanden.

Zielsetzung: Es ist eine ganzheitliche, d.h. Disziplinen übergreifende Strategie sowie eine technologische Basis für das «Gebäude als Gesamtsystem» zu entwickeln, unter besonderer Berücksichtigung der grauen Energie und der standortinduzierten Mobilität.

Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energetische Gebäudesanierung

Gebäude werden für 50 bis 80, manchmal sogar bis 100 Jahre Nutzungsdauer geplant. In der Schweiz sind ca. 65 % der Wohnbauten älter als 40 und ca. 40 % älter als 60 Jahre. Der Gebäudebestand wird zurzeit lediglich mit einer Rate von weniger als 1 % pro Jahr saniert und die Neubaurate beträgt rund 1 %. Die Ersatzbaurate (Abbruch und Neubau) ihrerseits liegt in der Schweiz deutlich unter 0,1 % pro Jahr. Somit werden insgesamt pro Jahr etwa 2 % des Gebäudebestandes durch Sanierung oder Neubau auf den aktuellsten Stand von zeitgemässen Neubauten gebracht. Das sind jährlich mehrere tausend Gebäude. In den nächsten 20 bis 30 Jahren dürften dies in der Schweiz einige hunderttausend Gebäude sein.

Zielsetzung: In Zusammenarbeit mit Industriepartnern sollen Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für Gebäudeerneuerungen unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen in bestehenden Bauten (technisch, ökonomisch, konstruktiv) entwickelt werden.

Heizen, Kühlen und Lüften im 2000-Watt-kompatiblen Gebäude

Niedertemperaturwärme wird heute noch zu oft mit fossilen Energieträgern erzeugt, welche einen sehr hohen Exergieanteil enthalten. Die Klima- und Kältetechnik in zentralen Anlagen und mit Raumklimageräten zeigt ein grosses, noch weitgehend ungenutztes Energieeffizienzpotenzial, welches durch Nutzung geringer Temperaturdifferenzen genutzt werden könnte. Gleichzeitig ist ein hoher Deckungsbeitrag durch erneuerbare Energien möglich.

Zielsetzung: Entwickeln einfacher Gebäudetechnikkonzepte für Neubauten sowie für die Erneuerung des Gebäudebestands, welche auf Verzicht

fossiler Brennstoffe und Integration erneuerbarer Energien bauen.

Effizienzsteigerung beim Stromverbrauch in Gebäuden

Der Elektrizitätsbedarf nimmt unter anhaltendem Wirtschaftswachstum bei allen Verbraucherkategorien stetig zu. Der Anteil, welcher durch das Gebäude selbst verursacht wird (Haustechnik, Aufzüge, fest eingebaute Geräte und Beleuchtung) liegt deutlich über 50 %. In Wohnbauten werden 15 % des Stromverbrauchs alleine für die Beleuchtung eingesetzt. In Dienstleistungsgebäuden sind es im Mittel 22 %.

Zielsetzung: Es sind Technologien zu entwickeln, welche zu wesentlichen Verbesserungen der elektrischen Effizienz von Geräten in Gebäuden und der vermehrten Integration der Tageslichtnutzung im Gebäude führen.

Innovative Materialien und Komponenten für den Gebäudebereich

Materialien werden im Bauwesen traditionell meist nur eine Funktion zugedacht. Es besteht ein Mangel an multifunktionalen Materialien und Fassadenelementen.

Zielsetzung: Nutzen von Synergien aus Materialwissenschaften, Chemie, Physik und Nanotechnologie, um neuartige Baustoffe und Komponenten zu entwickeln.

Pilot- und Demonstrationsprojekte (P+D)

Das Forschungsprogramm *Energie in Gebäuden* ist für den zunehmend wichtigen Know-how-Transfer prädestiniert.

Zielsetzung: Förderung von Leuchtturmprojekten zur Demonstration von Schlüsseltechnologien mit Fokus auf die Gebäudesanierung sowie Erstanwendungen neuer Technologien und Systeme in Neubauten und Bestandsbauten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Projekte im Bereich Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2009 ca. 60 Projekte mit einer Förderung durch das Bundesamt für Energie.

Für diejenigen Projekte, welche erst im zweiten Halbjahr 2009 in Angriff genommen wurden, liegen noch kaum Ergebnisse vor. Um eine Übersicht über die aktuellen Projekte zu vermitteln, wurden diese dennoch in die Liste der Projekte aufgenommen und kurz beschrieben.

Gebäude- und Siedlungskonzepte für eine 2000 Watt-kompatible Bauwerksentwicklung

Grundlagenarbeiten und Tools

An der HSLU ist eine grundlegende Arbeit durchgeführt worden, mit dem Ziel, das *System klimagerechte Bauwerke und Quartiere* [44] mit seinem Umfeld, Einflussfaktoren und inneren Zusammenhängen für einen Disziplinen übergreifende Diskurs zugänglich zu machen. Systemcharakter und Wirkungszusammenhänge werden anhand einer systemischen Methode untersucht und grafisch visualisiert.

Klimagerechte Gebäude und Quartiere sind Teil eines Gesamtnetzwerkes, sowohl in räumlicher (Gebäudepark Schweiz) als auch in zeitlicher Hinsicht. Vor dem Hintergrund der Frage, ob und unter welchen Bedingungen die vorgeschlagenen Zielwerte der 2000-Watt-Gesellschaft erreicht werden können, wurde zusammen mit dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich eine Vorstudie zum *Gebäudeparkmodell Schweiz – Grundlagen zur Überarbeitung des SIA Effizienzpfades Energie* [48] in Auftrag gegeben.

Ein weiteres Projekt mit Grundlagencharakter ist die Untersuchung der *Gesamtenergieeffizienz von Minergie-P Wirtschaftsbauten* [13]. Dabei ging es um die Frage, inwiefern die Anforderung an die Gebäudehülle für Minergie-P-Bauten das entscheidende Kriterium ist, oder ob nicht die Effizienz auf Stufe Primärenergie einschliesslich Heizung, Kühlung und Beleuchtung ausschlaggebend für eine gute Gesamtenergieeffizienz ist.

Heute kommen vermehrt dynamische Gebäudesimulationsprogramme als Planungsinstrumente zum

Einsatz, mit welchen eine detaillierte Energiebedarfsanalyse, die Dimensionierung der HLK-Systeme und eine Beurteilung des thermischen Komforts erstellt werden können. Um die Resultate solcher Berechnungen nachvollziehbar und vergleichbar und damit behördentauglich machen zu können, sind Anforderungsprofile mit Standard-Eingabewerten (Randbedingungen), normierte Report-Formate und Gebäude-Testbeispiele zur Überprüfung der Programme erforderlich. Damit soll eine Zertifizierung der Programme künftig ermöglicht werden. Das Projektteam Empa / HSLU nimmt sich dieser Aufgabe im Rahmen des Projekts *Anforderungen an behördentaugliche Dynamische Simulationsprogramme* [10] an.

Mit der Einführung der SIA Norm 382/1:2007 «Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen» wurde ein neues Verfahren für den Bedarfsnachweis klimatisierter Gebäude eingeführt. Neben der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle und dem Sonnenschutz ist auch eine Anforderung an die Wärmespeicherfähigkeit einer Zone definiert. Da in der Norm nur homogene Bauteile beschrieben werden, können in den Berechnungstools keine inhomogenen Bauteile berechnet werden. Mit dem Projekt *Berechnung der Wärmekapazität von inhomogenen Konstruktionen* [14] soll diese Lücke geschlossen werden.

Beim Projekt *Design Performance Viewer 2.0: Evolution und Weiterentwicklung* [47] hat sich im Berichtsjahr herausgestellt, dass der Programmkern neu programmiert werden musste, um eine höhere Flexibilität zur Anbindung der diversen Module zu ermöglichen. Dennoch sollte das Werkzeug im Frühjahr 2010 bereitstehen.

Nachhaltige Gebäudekonzepte und Quartierentwicklung

Schwerpunkte für ein nachhaltiges Gebäudekonzept sind eine hohe Flexibilität, ein geringer Ressourcenverbrauch und eine optimale Erschliessung. Das Konzept *Swisswoodhouse* [26] setzt an diesen Punkten an. Swisswoodhouse ist ein mehrgeschossiges Gebäude, welches an zukünftige Wohnformen angepasst werden kann. Durch den hohen Vorfertigungsgrad für Bauhülle und Gebäudetechnik soll das Produkt wirtschaftlich sein. Ein investorenorientiertes Rating-System bildet die Grundlage für die Bewertung und die Promotion für nachhaltige Gebäude am Markt [65].

Figur 1: Swisswoodhouse (Bild: Bauart Architekten)

Bauten mit betonter Nutzung der Sonnenenergie sind in ihrer organisatorischen, strukturellen und formalen Sprache als Ausdruck eines Energiekonzeptes zu verstehen. Diese Klimarhetorik führt in ihrer konsequenten Anwendung zu neuen Typologien von klimagerechten Bauten und erfordert neue integrative und ganzheitliche Entwurfsstrategien. Je früher solare Strategien in den Entwurf einfliessen, desto höher ist das Potenzial für die Umsetzung, und desto kostengünstiger deren Umsetzung. Das Projekt *Methodik zur Integration von solaren Strategien in der Architektur* [6] des CCTP an der HSLU untersucht anhand von zwei Fallstudien das Potenzial von aktiv- und passivsolaren Strategien für die Sanierung von Siedlungen und den Ersatzneubau im urbanen Kontext.

Ziel des Projekts *Nullenergiegebäude – die nächste Generation energieeffizientes Bauen* [20] ist die Dokumentation und Analyse exemplarischer Gebäude nahe der Nullenergiebilanz, um dabei Methodik und Werkzeuge für die Arbeit mit diesen Gebäuden zu entwickeln. Es sollen neue zukunftsweisende bauliche Energieeffizienzstandards auf der Basis von Nullenergiegebäuden geschaffen und verbreitet werden. Diese Grundlagen bieten dann die Basis für die marktreife Entwicklung von Nullenergiegebäuden in der Schweiz, z. B. unter dem Label von Minergie. Im Forschungsprojekt werden auch Arbeiten im Rahmen des Projekts der Internationalen Energieagentur (IEA) *Towards Net Zero Energy Solar Buildings (NZEB)* im IEA ECBCS Annex 52, IEA SHC Task 40 durchgeführt.

Der Ersatz der Siedlung Bernerstrasse im Grünauquartier (Altstetten, Zürich) durch die Ersatzneu-

bauten Werdwies stellt das erste und bisher grösste Ersatzneubauprojekt der Schweiz dar. Der Entscheid für den Ersatzneubau sowie die Prozesse zu Entwicklung, Bau und Bezug des Neubauprojektes sind beispielhaft und können schweizweit als Demonstrationsobjekt dienen. Im Sinne einer Erfolgskontrolle als auch einer Erfolgsdemonstration wurden mit dem Projekt *Nachhaltige Quartierentwicklung Grünau-Werdwies Zürich* [36] die wichtigsten Auswirkungen der Ersatzneubauten auf das Grünauquartier aus der Optik der nachhaltigen Quartierentwicklung und des nachhaltigen Bauens evaluiert.

Ein neues Forschungsfeld am Building Science and Technology Laboratory der Empa ist die *Untersuchung des Einflusses des Mikroklimas auf die städtische Umgebung* [5]. Dabei geht es primär darum, mittels CFD-Simulation und experimentellen Untersuchungen im neu erstellten Windkanal das Grundlagenwissen weiter zu entwickeln.

Gebäudehülle

Für VIP mit Pulverkern aus pyrogener Kieselsäure, die für Bauanwendungen hergestellt werden, gibt es noch keine Normierungsgrundlagen. Deshalb wurden im Projekt *Vakuumdämmung im Baubereich – Deklaration und Auslegung* [8] verschiedene Qualitätsverfahren erarbeitet und auf aktuelle Produkte angewendet. Die Kommission SIA 279 (Wärmedämmstoffe) unterstützt die Entwicklung und Anwendung von Qualitätsmassnahmen analog zu anderen Wärmedämmstoffgruppen. Der im Rahmen eines Teilprojekts erarbeitete *Wärmebrückenkatalog für VIP* liegt bereits in der definitiven Fassung vor [9].

Bei der Anwendung von VIP im Fassadenbereich besteht im Gegensatz zu Dach- und Bodenkonstruktionen noch wenig Erfahrung. Die Temperaturen, denen die VIP in der Fassade ausgesetzt sind, unterscheiden sich von den Boden- und Dachanwendungen. Im Stossbereich, wo Wärmebrücken entstehen, können Abzeichnungen an der Fassade sichtbar werden. Diese Fragen zusammen mit Langzeitmessungen von Temperatur und Feuchte an zwei Objekten wurden im Projekt *Vakuumdämmung in Fassadenanwendungen – messtechnische Begleitung und Leistungsuntersuchung* [17] untersucht. Mittels Thermografieaufnahmen kann auch festgestellt werden, ob die VIP nach dem Einbau intakt (unbelüftet) sind (vgl. Bild auf Titelseite).

Für die g-Wert-Messung am Bau wird am SUPSI und an der HES-SO in Genf eine transportable Messeinrichtung entwickelt: *Mesure in situ des Performances énergétiques de façades transparentes et translucides* [37].

Sowohl Minergie-P als auch das Passivhaus fordern für die Zertifizierung die Einhaltung einer hohen Luftdichtigkeit der Gebäudehülle (bei Minergie ist die luftdichte Gebäudehülle eine Empfehlung aber keine Anforderung). Diese Luftdichtigkeit wird mit einem Luftdichtigkeitstest (bekannt auch als «Blower-door»-Messung) ermittelt. Die Erfahrung zeigt, dass die heute im Neubau geforderten Werte von 0,6 l/h meistens erreicht werden können, die Anforderung von 1,5 l/h bei der Modernisierung aber öfters nicht erreicht werden kann (gerade bei Holzbauten). Damit die geforderten Grenzwerte betreffend Luftdichtigkeit begründet werden können und auch die die Messwerte beeinflussenden Faktoren bekannt sind, soll in der Studie *Praxistest Luftdichtigkeitsmessungen bei Minergie-P- Bauten* [35] durch Recherche, Gespräche mit Fachleuten und durch eigene Messungen mehr Klarheit geschaffen werden.

Der Markt der Gebäudethermografie ist jung und entwickelt sich in verschiedene, qualitativ sehr unterschiedliche Richtungen. Eine auf diesem Markt wichtige Informationsquelle ist die vom Projektleiter Ch. Tanner verfasste Dokumentation *Infrarotaufnahmen von Gebäuden* [66]. Ziel des BFE-Projekts *Energetische Beurteilung von Gebäuden mittels IR-Bildern* [46] ist die Validierung und Weiterentwicklung der empirischen Methode QualiThermo, welche in begrenztem Rahmen eine energetische Gebäudebeurteilung auf Grund von Gebäude-Thermografieaufnahmen zulässt.

Sommerlicher Wärmeschutz

Der sommerliche Wärmeschutz – und damit auch der thermische Komfort in Holzbauten – ist nach wie vor Gegenstand von Untersuchungen. In einer experimentellen Untersuchung an acht Einfamilienhäusern in Holzbauweise sind die Autoren zum Schluss gekommen, dass die Wirksamkeit des Sonnenschutzes (als Folge des Öffnens und Schliessens) einen weit grösseren Einfluss auf die Raumlufttemperatur hat, als alle anderen Massnahmen, eingeschlossen die Nachtauskühlung

über Fenster und die Nutzung eines Lufterdregisters [29].

Aufbauend auf dieser Studie führt die Berner Fachhochschule unter Beizug von Herstellern von Wohngebäuden in Holzbauweise im Rahmen des Projekts *Parameteruntersuchung des sommerlichen Raumklimas von Wohngebäuden* [24] extensive Simulationen durch, um die Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Einflussparametern (Fensterfläche und Ausrichtung, Verschattung, Lüftung sowie Speicherfähigkeit) zu untersuchen.

An der HES-SO in Sion im Wallis wird ein intelligentes «Plug & Play»-System *Stores intelligents* [31] zur Steuerung von elektrisch angetriebenen Storen in Einzelräumen untersucht. Das vorgeschlagene System ist modular und reagiert auf Sonnenstrahlung, Raumlufttemperatur und Personenpräsenz und eignet sich insbesondere für die Nachrüstung in Bestandsbauten.

Elektrochrome Fenster sind eine Alternative zum konventionellen Sonnenschutz. Bisher erfolgte die Handhabung auf manuelle Weise. An der EPFL LESO-PB wird ein Algorithmus entwickelt, welcher den Betrieb bezüglich visuellem Komfort und Energieeffizienz optimieren soll: *Automatic control of an electrochromic window* [32].

Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energetische Gebäudesanierung

Bei der Sanierung von Bestandsbauten wurden im Programm Energie in Gebäuden bisher zwei Strategien verfolgt: Einerseits «konventionelle» Sanierung unter Einbezug erneuerbarer Energien und anderseits Entwicklung und Demonstration der Anwendung vorfabrizierter Elemente für Dach und Fassade.

«Konventionelle» Sanierung von Wohnbauten unter Einbezug von thermischer Solarenergie

Anhand einiger exemplarischer Sanierungsbeispiele wurden im Rahmen des Projekts *Advanced Housing Renovation by Solar & Conservation* [22] die Möglichkeiten und Grenzen einer konventionellen Sanierung aufgezeigt.

In einer Studie der Universität Genf [50] ist die Sanierung zweier sechsstöckiger Gebäude aus den 1950er Jahren beschrieben. Die Gebäude sind im Inventar geschützter Bauten der Stadt Genf aufgeführt. Das erste Gebäude wurde mit 4 – 8 cm Aussendämmung, das andere mit 6 cm Innendämmung wärmetechnisch saniert. Der Heiz-Energiebedarf konnte auf die Hälfte reduziert werden, die Lösung mit Aussendämmung hat den Heizenergieverbrauch um weitere 15 % reduziert. Der Unterschied im Erscheinungsbild ist erst bei genauerem Hinsehen feststellbar.

Das Projekt *200Plus – Gute Detaillösungen im Fassadenbereich* [18] ist ebenfalls ein Teilprojekt aus IEA SHC Annex 37. Leider sind die Erwartungen bis jetzt noch nicht erfüllt worden.

Figur 2 : Tours Cayla in Genf vor Sanierung (links), mit Aussendämmung (Mitte) und mit Innendämmung (rechts) (Bild W. Weber)

An der HES-SO Valais ist die Bearbeitung des Projekts *Renovation des bâtiments: Aspects énergétiques et économiques* [1] gestartet worden.

Die Lucido-Solarfassade – eine Solare Wärmedämmung – ist eine Art atmungsaktiver Gebäudehaut, die die eigene Fassadentemperatur reguliert. Diese funktioniert wesentlich anders als eine konventionelle gedämmte Fassade, welche lediglich den Transmissionswärmefluss reduziert. Die Lucido-Solarfassade eignet sich auch für die Bauerneuerung, wie der Beitrag *Solarfassade für Wohnbau – Erneuerungen mit tiefstem Energieverbrauch* von Fent Solare Architektur im Rahmen der IEA SHC Task 37 zeigt [34].

Vorfabrizierte Systeme für die energetische Sanierung von Wohnbauten

Mit der bestehenden Gebäudesubstanz lässt sich keine nachhaltige Entwicklung im Sinne der 2000-Watt-Gesellschaft verwirklichen. Die bestehenden Gebäude, welche den schweizerischen Energieverbrauch auf Jahrzehnte hinaus massgeblich bestimmen, sollten mindestens 80 % weniger Energie verbrauchen. Dieses Ziel kann nicht mit behelfsmässigen Instandstellungsmassnahmen, sondern nur mit gesamtheitlichen Erneuerungskonzepten erreicht werden.

Besonders der anstehende Renovationsbedarf vieler Mehrfamilienhäuser aus den Jahren 1950 – 1970 ist eine Chance für eine grundlegende Erneuerung. Gleichzeitig lassen sich oft bauliche Anpassungen realisieren, die Mehrwerte schaffen, und so alte Gebäude wieder für 40 bis 60 Jahre fit machen (Fig. 3).

Mit dem Projekt *Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings* [53] werden neue Lösungen gesucht, welche die Gebäudeerneuerung effizienter und einfacher machen. Im Vordergrund steht die die komplette Erneuerung der Gebäudehülle mit vorgefertigten Modulen, welche den höchsten Energie- und Qualitätsstandards gerecht werden.

Sanierung historischer Bauten

Die energetische Erneuerung von Altbauten mit wertvoller Fassadengestaltung ist oft problematisch. Dem Schutz der traditionellen Fassade stehen die Risiken einer bauphysikalisch heiklen Wärmedämmung von innen gegenüber. Es fehlen bewährte Rezepte und Technologien, um auch schützenswerte Bauten energetisch nachhaltig zu verbessern. Trotzdem ist es unabdingbar, diesen energetisch wie kulturell nicht unbedeutenden Gebäudebestand nachhaltig zu erneuern.

Die Problematik besteht primär in der schwierig kontrollierbaren Feuchtebelastung der Aussenwandkonstruktion. Um diese bauphysikalisch heikle Situation zu lösen, sollen neben klassischen Dämmstoffen auch neuartige Materialien und Technologien wie Aerogele, VIP, Hochleistungsdämmputze, feuchteadapative Putze im Hinblick auf eine Innen- resp. Innen-/Aussendämmung historischer Fassaden weiter entwickelt, geprüft und getestet werden. Ziel des Projekts *Nachhaltige Erneuerung historisch wertvoller Bauten* [3] sind robuste Lö-

Figur 3: Mehrfamilienhaus-Erneuerung Zürich-Höngg [58]. Das Gebäude wurde nicht nur mit vorgefertigten Elementen gedämmt; gleichzeitig wurden auch die Wohnräume vergrössert, grosszügige Balkone vorgesetzt und eine neue Attikawohnung realisiert. Aus dem «Block» der 1950er Jahre ist ein modernes Mehrfamilienhaus entstanden (Projekt und Bildnachweis Arch. Beat Kämpfen, Zürich)

sungen und mit der Denkmalpflege abgestimmte Planungsgrundlagen für bauphysikalisch heikle Situationen.

Heizen, Kühlen und Lüften im 2000-Watt-kompatiblen Gebäude

Der grösste Teil der Energie in Gebäuden wird dazu verwendet, eine Raumtemperatur von ungefähr 20 °C zu halten. Um dieses niedrige Temperaturniveau für Heizung und Kühlung zu erreichen, ist keine hochwertige Energie notwendig, da der Temperatursprung zur Aussenlufttemperatur gering ist. Dennoch wird heute hochwertige Energie wie Erdöl dafür eingesetzt. Für einen effizienteren Energieeinsatz unter Einbezug erneuerbarer Energiequellen sind neue Heiz- und Kühlsysteme auf der Basis von Energie mit niedriger Wertigkeit (LowEx) zu entwickeln. Dies wird im Projekt *Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities* [28] behandelt.

Figur 4: Energiefluss-Visualisierung der neuen Monte Rosa Hütte (Bild: ETHZ/Siemens Building Technologies)

Das Energiesparpotenzial von Gebäuden lässt sich nur dann ganz erschliessen, wenn auch das Zusammenspiel der Einzelkomponenten der Gebäudetechnik optimiert wird. Das Ziel des Projekts *Integrierte Haussysteme für optimale Energie- und Stoffbewirtschaftung* [19] ist darum die Entwicklung neuer Algorithmen und Hardware-Lösungen für das optimale Management von Energie- und Stoffflüssen in Gebäuden. Die Schlüsselidee ist dabei, das Zusammenspiel von verschiedenen Energiequellen, Speichersystemen und Verbrauchern zu optimieren. Wetter- und Besuchervorhersagen sind dabei ein wichtiges Instrument, um dieses Ziel zu erreichen. Die Neue Monte Rosa Hütte wird als Demonstrationsobjekt verwendet, wobei das Hauptziel eine möglichst hohe Energieautarkie ist.

Im Projekt *Energie im Gebäude online (Egon)* [45] wurde mit finanzieller Unterstützung der Stiftung Klimarappen ein System entwickelt werden, welches es erlaubt, den jährlichen Heizenergieverbrauch eines Gebäudes nach einer Messdauer von wenigen Wochen mit kostengünstiger Hardware voll automatisiert zu bestimmen. Mit diesem System wurde es möglich, den tatsächlichen Heizenergieverbrauch und die Energiekennzahl eines Gebäudes zu ermitteln, zu prüfen ob der Heizenergieverbrauch eines Gebäudes mit den Erwartungen übereinstimmt, und den energetischen Erfolg von Sanierungsmassnahmen zu verifizieren.

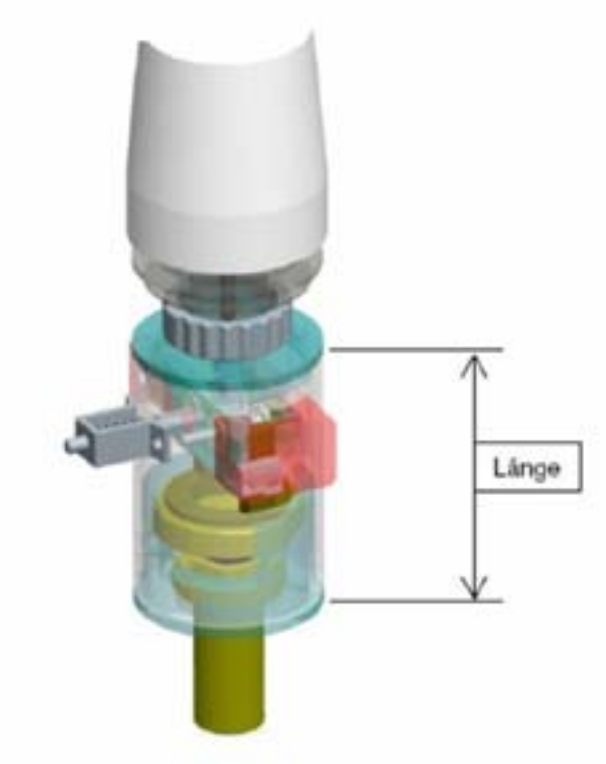
Das Projekt *Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung* [15] startete im November 2009 und ist Teil des Brenet-Themenbereichs *Kraftwerk Haus* (Brenet: Nationales Kompetenznetzwerk Gebäudetechnik und erneuerbare Energien). Der Hauptakzent im vorliegenden Projekt liegt auf Wärme-Kraftanlagen (WKA), die in ihrer Leistung auf die Wärme- und Stromversorgung einer Wohneinheit zugeschnitten sind. Das Projekt will neuartige Konzepte der gebäudeintegrierten polyvalenten Energieversorgung mit WKA aufzeigen. An polyvalenten Energieanlagen wird neben der Energieversorgung im Gebäude neu ihr Potenzial für die Energieversorgung von Elektro- resp. Hybridfahrzeugen untersucht.

Figur 5: Am Ökozentrum Langenbruck installierte Biomasse-Wärme-Kraft-Anlage mit Messdatenerfassung (Bild: Ökozentrum Langenbruck)

Das Projekt *Kraftwerk Haus im ländlichen Raum – Umsetzung von Biomasse Wärme-Kraft-Anlagen und Strom-Lastmanagement* [39] hat zum Ziel, den ersten Schritt in der sukzessiven Transformation des Gebäudes vom reinen Energiebezüger zum Energielieferanten – zum *Kraftwerk Haus* – in der Praxis zu erproben und zu erforschen. Das Zusammenspiel von lokalem Lastmanagement (LLM)

und dezentraler Stromerzeugung (PV, WKA) wird in einem Messprojekt unter Praxisbedingungen am Institutsgebäude des Ökozentrum Langenbruck erprobt.

Im Projekt *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* [27] wurde die Möglichkeit geprüft, See- und Grundwasser über ein Kältenetz zur Kühlung von Gebäuden zu nutzen. Die Machbarkeitsstudie hat gezeigt, dass ein solches Netz für Freecooling im Sommer und zur Speisung von Wärmepumpen im Winter wirtschaftlich attraktiv sein kann.



Figur 6: Optimierter Umkehrthermostatkopf (Miniaturisierung) (Bild: NTB/Schnyder)

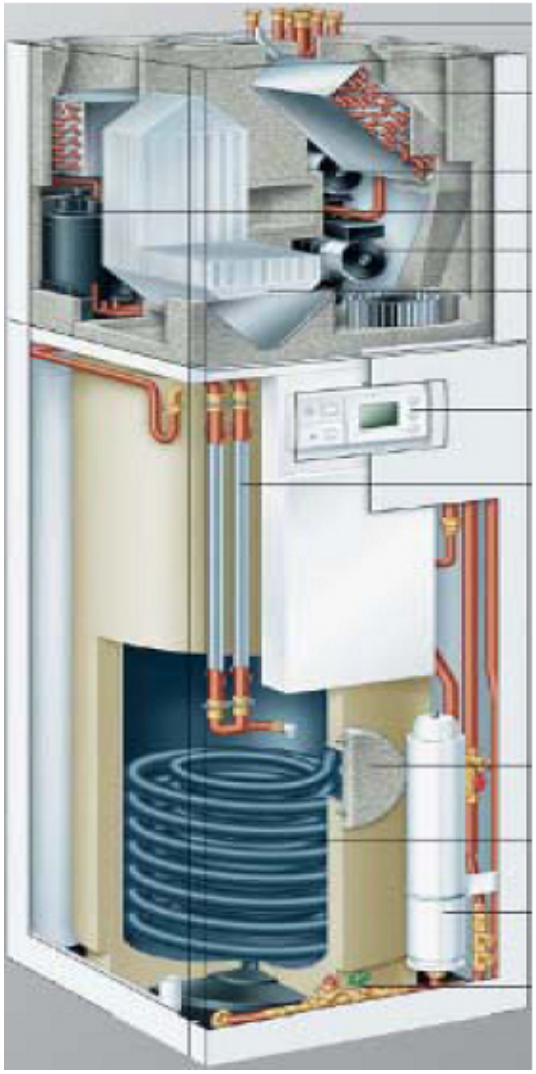
Im Projekt *Konventionelle Wärmeabgabesysteme und deren Regulierung für die Raumkühlung* [42] wurde untersucht, wie weit Heizkörper und Bodenheizungen zu Kühlzwecken dienen können, und ob deren Regulierung mittels einem selbsttätig, stromlos regulierenden Thermostaten mit Umkehrfunktion erfolgen könnte. Versuche im Labor mit einem Funktionsmuster sowie thermische Simulationen haben ergeben, dass Kühlleistungen zwischen rund 4 % und 11 % der Norm-Heizleistungen erreicht werden können. Ein Kühl-Heizkörper in einem Einzelbüro oder in einem Wohnzimmer erhöht die sommerliche Behaglichkeit spürbar und beeinflusst die Raumtemperatur positiv. Die sommerlichen Raumtemperaturen können um 2 – 4 Kelvin gesenkt werden. Zur Miniaturisierung und wirtschaftlichen Herstellung eines seriennahen Prototyps, als Vorstufe zu einer Nullserie, sind unter anderem andere Materialien und Fertigungsverfahren zu überlegen und auszuwählen.

In Untersuchungen an grösseren Wärmerückgewinnungsanlagen wurde bereits früher erkannt, dass interne und externe Leckagen respektive Rezirkulation die Energieeffizienz massgeblich negativ beeinflusst. Aktuelle Untersuchungen im Rahmen des 2009 abgeschlossenen BFE Projekts *Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Kleinlüftungsanlagen* [12] deuten ebenfalls auf ein grosses Effizienzsteigerungspotenzial hin. Die Erkenntnisse aus diesem BFE-Projekt weisen zudem darauf hin, dass in realisierten Anlagen mit nicht unbedeutenden internen und externen Leckagen zu rechnen ist. Deshalb sollen die im früheren BFE-Projekt untersuchten Anlagen im Rahmen des Projekts *Erhöhung der Energieeffizienz von Kleinlüftungsanlagen* [11] nochmals auf interne und externe Leckagen untersucht werden, damit diese Informationslücke geschlossen werden kann.

Basierend auf den hoch entwickelten natürlichen Lüftungssystemen für Nicht-Wohngebäude wird im Projekt *Optimierte automatische Fensterlüftung in Wohnbauten* [23] ein vereinfachtes standardisiertes System mit automatischer Fensterlüftung für Wohnungen in Mehrfamilienhäusern entwickelt und erprobt. Die eingesetzte Technik und Regelung soll für typische Wohnsituationen standardisiert werden. Bei der automatischen Fensterlüftung ist nicht nur an Einzellösungen für einzelne Räume gedacht, sondern auch an ein Konzept, welches integral die Wohnung umfasst. Durch eine energetisch optimale Steuerung der verschiedenen Fenster von typischen Wohnungen in Abhängigkeit vom Klima der einzelnen Räume und unter Berücksichtigung der lokalen Wetterverhältnisse soll eine effiziente Lüftung erreicht werden. Neben der Frage der optimalen Lüftung muss die Einsetzbarkeit der automatischen Fensterlüftung hinsichtlich der Akustik und Lärmproblematik sowie des Einbruchschutzes geprüft werden.

In der Schweiz werden pro Jahr gut 3000 Wohneinheiten mit wohnungsweisen Lüftungsanlagen (Komfortlüftungen) ausgerüstet, die Tendenz ist steigend (Quelle: www.energie-cluster.ch). Zusätzlich dürften in kleineren Dienstleistungs- und

Schulgebäuden ca. 2000 Anlagen gebaut werden, die eine ähnliche Grösse haben. Im Berichtsjahr konnte das Projekt *Haustechnik-Kompaktgeräte – Erkenntnisse aus der Praxis* [21] abgeschlossen werden. Der Einsatzbereich solcher Kompaktgeräte (Heizen, Lüften und Warmwasser) ist auf Bauten mit geringem Wärmebedarf beschränkt (Minergie-P). Der kleine Heizbedarf ermöglicht eine Wärmeverteilung über die Zuluft. Grundsätzlich sind die Luftverteilungen für die Luftheizungen genau gleich zu konzipieren wie für eine klassische Komfortlüftung. Das gesamte hydraulische Heizsystem kann somit entfallen und dies führt zu namhaften Kosteneinsparungen.



Figur 7: Kompaktgerät Viessmann/Vitotres 343

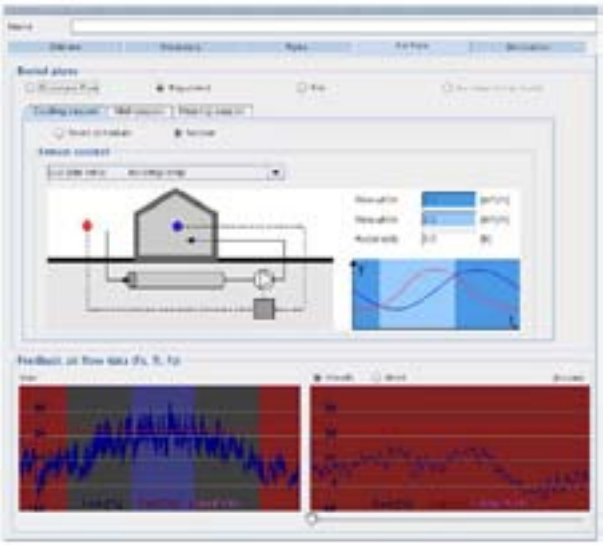
Ebenfalls abgeschlossen ist das Projekt *Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen* [2]. Nebst dem Forschungsbericht ist ein Merkblatt für Bauherren und Architekten gefertigt worden, welches einen Vergleich von Kälteabgabe- und -Erzeugersystemen sowie eine Entscheidungshilfe beinhaltet [68].

Für zukünftige Gebäude nach Anforderungen der 2000-Watt-Gesellschaft ist der Sommerbetrieb verstärkt zu beachten. Aufgrund von Klimawandel, Anforderungen an die Energieeffizienz der Gebäude, steigenden Glasanteilen in der Architektur sowie gestiegenen Komfortansprüchen an das Innenraumklima wird die Gebäudekühlung an Bedeutung gewinnen. Passive Kühlkonzepte bieten eine energieeffiziente Lösung für den wachsenden Kühlbetrieb. Neben eingeführten passiven Kühlkonzepten wie Nachtlüftung oder erdgekoppelter Kühlung kann Wärme auch über aussen liegende Gebäudebauteile an die Umgebung abgeführt werden. Ziel der Potenzialstudie *Heizen und Kühlen über thermisch aktivierte Aussenflächen* [51] ist es zu ermitteln, welche Komponenten und Systemlösungen hierfür geeignet sind, welche Leistungsfähigkeit und Effizienz sich für die Systeme ergibt, und welche Synergien für einen Heizbetrieb bestehen.

In bestehenden Bauten mit mehreren Wohneinheiten wie Ferienwohnungen, Mehrfamilienhäuser oder Apartmenthäuser wird die Heizung bei Abwesenheit der Bewohner oft nicht ausgeschaltet bzw. abgesenkt, da z.B. mehrere Wohn- und Nutzungseinheiten an der gleichen Heizgruppe angeschlossen sind, die Aufheizverzögerung zu lange ist (Komfortprobleme bei Wochenendbelegung), oder der Frostschutz nicht gewährleistet ist. Im Projekt *Internetbasiertes System zur energetischen Optimierung der Haustechnik mit Funktechnologie im Altbaubestand* [52] wird mit nur einer SPS pro Gebäude eine Applikation entwickelt, die es den Benutzern (Bewohner, Verwaltung, Vermieter, Hauswart, ...) ermöglicht, ihre Präsenzzeiten auf einer passwortgeschützten Webseite einzutragen. Dieses System ermöglicht es, die Betriebszeiten der Haustechnik auf ein Minimum zu reduzieren und somit Energie zu sparen.

Source froide solaire pour pompe à chaleur avec un COP annuel de 5 généralisable dans le neuf et la rénovation [30] ist ein Projekt der Universität Genf. Es wird nach geeigneten Anergiequellen gesucht, um den COP von Wärmepumpen zu steigern.

Für die Auslegung von Luft-Erdwärmetauschern wurde im Projekt *Easypipes* [49] in Ergänzung zu bestehenden quasistationären Berechnungstools für das dynamische Simulationsprogramm Trnsys eine neue Routine (Type 260) entwickelt.



Figur 8: Kontrolle des Luftdurchflusses im Lufterdregister Trnsys Module 260 (Grafik: P. Hollmueller)

Effizienzsteigerung beim Stromverbrauch in Gebäude

Im Rahmen einer Dissertation an der EPFL zum Thema *High Perfomance Integrated Lighting Systems (Green Lighting)* [40] gezeigt werden, dass anidolische Tageslichtsysteme (engl. Anidolic Daylighting Systems, ADS) eine ideale Grundlage für hoch effiziente, integrierte Beleuchtungssysteme sind. Solche Tageslichtsysteme sind nicht nur in der Lage, in Büroräumen über weite Teile der normalen Bürozeiten, bei verschiedenen Himmelstypen und über das gesamte Jahr eine adäquate Beleuchtungsumgebung zu schaffen; vielmehr sind sie auch bei Büroinsassen sehr beliebt. Natürlich ist jedoch in jedem Fall zusätzlich elektrische Beleuchtung notwendig, um ein ADS zu Zeiten niedrigen Tageslichtflusses zu unterstützen. Im Rahmen dieses Projektes wurde gezeigt, dass die vorteilhaftesten Kompromisse zwischen Energieeffizienz und visuellem Komfort erzielt werden können, wenn für die elektrische Beleuchtung eine Kombination aus direkt strahlenden Deckenleuchten (Umgebungsbeleuchtung) und tragbaren Schreibtischlampen (temporäre Arbeitsbeleuchtung) verwendet wird. Als Leuchtmittel sind für die Deckenleuchten hoch effiziente Leuchtstoffröhren am besten geeignet. Für Schreibtischleuchten sind Kompaktleuchtstofflampen (so genannte Energiesparlampen) oder weisse LED-Glühbirnen am besten geeignet.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Das «Green Lighting»-Projekt hat gezeigt, dass installierte Lichtleistungsdichten unter 5 W/m^2 und effektive Lichtleistungsdichten unter 3 W/m^2 heutzutage realisierbar sind, vorausgesetzt es werden moderne Tageslichtsysteme und hoch effiziente elektrische Beleuchtungssysteme in idealer Weise miteinander kombiniert. Anwendungen auf der Basis weisser LED können bereits heute in solchen Systemen zum Einsatz kommen; in naher Zukunft wird das Potenzial dieser Technologie ausserdem immer weiter wachsen. OLED-Anwendungen (OLED = engl. Abkürzung für organische Licht emittierende Diode) könnten auch eine interessante Option für zukünftige Beleuchtungsszenarien in Büroräumen werden.

Figur 9: Weiss strahlendes Lumiblade OLED «Pixel» als Demo-Kit im Labor des LESO-PB

Lichtlenksysteme kombiniert mit Sonnenschutzvorrichtungen bilden für Planungsteams ein komplexes Fenstersystem. Die Integration der künstlichen Beleuchtung verursacht zusätzlichen Planungsaufwand, will man die ergonomischen Anforderungen am Arbeitsplatz einhalten. Mittels neuer wissenschaftlicher Methoden «Goniophotomètre bidirectionnel à imagerie numérique» soll im Projekt *Outil informatique de conception et de visualisation de systèmes d'éclairage naturel* [41] ein Werkzeug für die Planer entwickelt werden, welches den neusten Erkenntnissen der Lichttechnik Genüge trägt.

Im Nachfolgeprojekt *Lampe au soufre à bulbe séparé* [4] der HEIG-VD ist es dem Forschungsteam gelungen, die Rotation des Leuchtkörpers zu unterdrücken indem die Stromversorgung verändert wurde. Dadurch, dass die Leuchtdichte um ein Vielfaches höher ist als bei einer LED und die Wärmeabfuhr gelöst werden konnte, versprechen sich die Forscher eine baldige Industrialisierung.

Ziel des Projekts *Prevision et justification des consommations d'électricité pour 3 categories de bâtiment* [16] ist es, aus Zählerablesungen und Strom-

rechnungen signifikante Vergleichswerte zu erhalten. Eine systematische Analyse der Verbraucherprofile in Hotels hat gezeigt, dass je nach Elektrizitätswerk die Hoch- und Niedertarife unterschiedlich ausgestaltet sind und zudem über die Jahre variieren. Um zu einer von Energielieferanten und der Beobachtungsperiode unabhängigen Analysemethode zu gelangen, wird als Vergleichsgrösse das Verhältnis der Leistung im Ruhezustand des Gebäudes zu jener im Betrieb verwendet.

Innovative Materialien und Komponenten für den Gebäudebereich

Mit dem an der Empa entwickelten Verfahren Anodische Fügetechnik mit Flüssiglot zur Herstellung des Glasrandverbundes von Vakuumverglasung konnten im Projekt *Development of Vacuum glazing with advanced thermal properties* [25] erfolgreich 0,5 m × 0,5 m grosse Prototypen gefertigt werden. Auf Grund eines Lebensdauermodells wird erwartet, dass während einer Lebensdauer von 30 Jahren der Druck nicht mehr als 0,1 Pa ansteigt.

Das Projekt wird dank Förderung durch den Innovationsfonds des EKZ unter Beizug der Glasindustrie weitergeführt. Bis zur industriellen Fertigung dürfte es noch einige Jahre dauern.

Im Projekt *Integrated Multifunctional Glazing for Dynamical Daylighting* [43] wird ein neuartiges dynamisches Tageslichtkonzept entwickelt. Dieses wird folgende Funktionen erfüllen:

- Lenkung des Tageslichts in grosse Raumtiefen entsprechend einem anidolischen System dank neuartigen Mikrostrukturen;
- Blendschutz und verbesserter visueller Komfort;
- Schutz vor Überwärmung im Sommer und niedrige Emissivität dank Verwendung von «M-Glas», einer Entwicklung von Prof. Ölhafen an der Universität Basel.

Das Projekt *Building Integrated Photovoltaics – Thermal Aspects* [33] am SUPSI hat zum Ziel, die thermischen und elektrischen Eigenschaften fassadenintegrierter PV Module zu untersuchen.

Nationale Zusammenarbeit

Die Begleitgruppe des Forschungsprogramms *Energie in Gebäuden* hat im Berichtsjahr die Kompetenzzentren LESO-PB und SUPSI für die Durchführung ihrer halbjährlichen Sitzungen gewählt. Damit wurde die Gelegenheit wahrgenommen, Näheres über deren aktuelle Projekte zu erfahren. Seit Beginn des Jahres 2009 ist Frau Dr. Monica Duca Widmer von Ecorisana aus Manno TI neue CORE-Patin des Forschungsprogramms.

Die Kontakte mit Forschungsteams der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (Prof. Dr. Hj. Leibundgut, Prof. Dr. H. Wallbaum, Prof. Dr. L. Guzzella), sowie mit dem Forschungsteam von Prof. Dr. J. L. Scartezzini an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) sind weiter verstärkt worden.

Regelmässige Kontakte werden zum nationalen Kompetenznetzwerk Brenet (Building and Renewable Energies Network of Technology, www.brenet.ch) wahrgenommen, insbesondere zum «Building Integrated Solar Network (BiSol)».

Unter der Federführung des Bereichsleiters Andreas Eckmanns fand Ende 2009 ein Koordinationstreffen mit den Programmleitern der Forschungsprogramme WP/Kälte/WKK und Solarwärme/Wärmespeicherung statt.

Eine erfolgreiche Zusammenarbeit besteht mit dem Verein Energie-Cluster.ch (www.energie-cluster.ch) im Rahmen der Innovationsgruppen *Hochleistungswärmedämmung* und *Komfortlüftung*. Neu ist eine Innovationsgruppe *Plusenergiehaus* ins Leben gerufen worden, an deren Workshops die Programmleitung vertreten ist.

Die Programmleitung vertritt das BFE in der Begleitgruppe des Projekts *Use of Weather and Occupancy Forecasts for Optimal Building Climate Control (OptiControl)* der ETHZ, MeteoSchweiz, Empa und der Industrie, welches durch Swisselectric Research unterstützt wird.

Auf Programmebene werden unregelmässige Kontakte zu KTI, BAFU und Swisselectric Research gepflegt.

Internationale Zusammenarbeit

Internationale Kontakte werden sowohl in direkter Zusammenarbeit in Projekten, in Netzwerken wie auch durch Teilnahme an internationalen Konferenzen wahrgenommen. Die bisherigen Erfahrungen und der Nutzen dieser Zusammenarbeit für die Schweiz können allgemein als sehr gut eingestuft werden. Im Vordergrund stehen die nachfolgend aufgeführten Institutionen.

Internationale Energieagentur (IEA)

Auf der Ebene Projektarbeit findet eine intensive Zusammenarbeit mit den IEA-Programmen *Energy Conservation in Buildings and Community Systems* (ECBCS) und *Solar Heating and Cooling* (SHC) statt. Die Schweiz ist im Rahmen des BFE-Forschungsprogramms *Energie in Gebäuden* in mehreren Projekten engagiert:

- M. Zimmermann von Empa Building Technologies und P. Schwehr von der HSLU vertreten die Schweiz im IEA ECBCS Annex 50 *Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings* [53].
- R. Hastings von AEU hat die Schweiz im IEA SHC Task 37 *Advanced Housing Renovation by Solar & Conservation* vertreten [22].
- EPFL LESO-PB hat die Schweiz im IEA ECBCS Annex 45 *Energy Efficient Electric Lighting for Buildings* [40] vertreten.
- Die ETHZ vertritt die Schweiz im Projekt *Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities* [28]. Die Newsletters sowie der Midterm Report [69] können unter www.annex49.com/materials.html heruntergeladen werden.

Seit Mitte 2009 beteiligt sich die Schweiz in folgenden weiteren Projekten der IEA:

- IEA SHC Task 41 *Solar Energy and Architecture*. Die Schweizer Vertretung wird durch die HSLU (CCTP) und das SUPSI (ISAAC-DACD) wahr genommen [7].
- Die FHNW ist am kombinierten IEA ECBCS Annex 52 / IEA SHC Task 40 *Nullenergie-Gebäude – Die nächste Generation Energieeffizienter Bauten* [20] beteiligt.
- D. Robinson von der EPFL LESO-PB vertritt die Schweiz im IEA ECBCS Annex 51 *Energy Efficient Communities: Case Studies and Strategic Guidance for Urban Decision Makers* [38].

Mehrere dieser Projekte sind erst kürzlich gestartet worden, so dass in den zitierten Jahresberichten lediglich Zielsetzung und Arbeitsplan Eingang gefunden haben.

ERA-Net im Rahmen EU Framework Programme 7 (FP7)

Das Ende 2008 gestartete Eracobuild ERA-Net [69] dient der Vernetzung und dem Informationsaustausch der Programmverantwortlichen aus den verschiedenen Mitgliederstaaten und verfolgt das Ziel, die Zusammenarbeit zwischen den nationalen Programmen zu fördern. Neun Mitgliedstaaten haben im Dezember 2009 eine gemeinsame Ausschreibung (Joint Call for Proposals) zum Thema «Sustainable Renovation of Buildings» mit einem Budget von € 4 Mio. gestartet. Das Forschungsprogramm *Energie in Gebäuden* des BFE beteiligt sich an dieser Ausschreibung mit € 200'000.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Anzahl Demonstrationsprojekte hat gegenüber dem Vorjahr wieder leicht zugenommen.

Abgeschlossene P+D Projekte

- Anlässlich der Informationsveranstaltung vom 23. Januar 2009 ist die *Energie-Detailbilanz des Eawag Forum Chriesbach* [57] einem Publikum mit 140 Interessierten vorgestellt worden. Der Primärenergiebedarf lag für das Messjahr 2007 ca. 30 % über dem Planungswert, jedoch deutlich tiefer als Minergie-P für ein vergleichbares Gebäude. Durch Betriebsoptimierung wird der Wert laufend verbessert. Erstmals wurde eine detaillierte Erhebung der Mehrkosten durchgeführt. Diese belaufen sich laut Angaben des Generalunternehmers auf 4,7 % der Gesamtinvestition.

- In Basel wurde 2007 mit *CosyPlace* [55], [56] das erste Mehrfamilienhaus nach Minergie-P-Standard erstellt. Es wird im Winter mit einer erdgekoppelten Wärmepumpe beheizt und im Sommer mit der Erdwärmesonde passiv gekühlt. Die Wärmeabgabe im Heizbetrieb und die Wärmeaufnahme im Kühlbetrieb erfolgen über eine Niedertemperatur-Fussbodenheizung. Aus den Erkenntnissen einer ersten Messperiode zwischen November 2007 und Oktober 2008 wurde die Reglereinstellung optimiert. Seit Oktober 2008 sind überdies sämtliche Wohnungen bezogen. Die Effizienz der Wärmepumpenanlage konnte gegenüber der ersten Messperiode gesteigert werden. Verantwortlich dafür sind die neuen Reglereinstellungen sowie ein grösserer Warmwasserbedarf infolge einer höheren Personenbelegung. Im Heizbetrieb betrug der Wärmeerzeugernutzungsgrad 4,3. Im passiven Kühlbetrieb erreichte der wöchentliche Nutzungsgrad dank Optimierung während der Sommerperiode 2009 Werte bis 15,2. Die gute erreichte thermische Behaglichkeit zeigt sich bei den Raumtemperaturen, die vorwiegend im Bereich 20 °C bis 26 °C lagen, auch wurde im Sommer ein registrier- und spürbarer Kühleffekt erreicht. Die Raumluftfeuchte war in der Winterperiode eher gering. Der gemessene Heizwärmebedarf liegt mit 111 MJ/m^2 gegenüber dem Vorjahreswert von 103 MJ/m^2 wenig höher, und noch immer deutlich über dem Nachweiswert von 36 MJ/m^2. Eine befriedigende Erklärung konnte noch nicht gefunden werden.
- Das Langzeitmessprojekt *Solarix-Wandheizsystem* [61] konnte im Berichtsjahr abgeschlossen werden. Die Erwartungen wurden im Winter 2008/2009 nur teilweise erfüllt, was die Sensibilität des Systems auf die Sonneneinstrahlung untermauert.

Sanierungen im Minergie-P Standard

Die folgenden P+D-Projekte hatten zum Ziel, den Nachweis zu erbringen, dass bei einer Sanierung der Minergie-P Standard erreicht werden kann.

- Beim *Zweifamilienhaus Rohrer, Stansstad* (Baujahr 1965) [59] ist eine messtechnische Erfolgskontrolle durch die HSLU durchgeführt worden. Die Übereinstimmung mit den Planungswerten ist gut. Das Gebäude wurde gemäss Minergie-P-Antrag bei einer Energiebezugsfläche von 373 m^2 mit einem effektiven Heizwärmebedarf von 16,9 kWh/m^2·a bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C berechnet. Der gemessene effektive Heizwärmebedarf von 19,7 kWh/m^2·a bezieht sich auf eine mittlere Raumlufttemperatur von 20,9 °C. Im Vergleich mit dem theoretischen Heizenergiebedarf bei 21 °C wird der reale effektive Heizwärmebedarf um ca. 4 % überschritten. Der Energiebedarf für Warmwasser liegt mit 19,1 kWh/m^2 um 38 % höher als der Standardnutzungswert von SIA 380/1. Der von Energieberatern kommunizierte Energiebedarf von 1000 kWh/a pro Person wird um 19 % überschritten.
- *Sanierung eines Mehrfamilienhauses aus dem Jahre 1946 – Profit statt Dynamit* [60]. Im vorliegenden Fall wurden auf einer unternutzten Parzelle an herrlicher Wohnlage mit Seesicht durch Anbau und Aufstockung zusätzliche Wertschöpfung und Attraktivität bei sinkender Umweltbelastung generiert. Der thermische Komfort kann überall in den Wohnungen – Winter wie Sommer – unabhängig von den Aussentemperaturen zwischen 20 °C bis 25 °C gehalten werden. Im Jahre 2009 betrug der Stromverbrauch für alle 8 Wohnungen 23'729 kWh, wovon 7'744 kWh (33 %) auf die Wärmepumpe (Heizung und Warmwasser) entfielen. Bilanzmässig stellte die hauseigene PV-Anlage dazu mit 6'958 kWh einen Grossteil der elektrischen Energie bereit.
- Im Rahmen des CCEM Retrofit *Nachhaltige Wohnbausanierung* wurde das Projekt *Nachhaltige Modernisierung eines typischen Mehrfamilienhauses der 1950er Jahre – Erfolgskontrolle im Rahmen IEA Annex 50 initiiert* [58]. Die Sanierung erfolgte mit dem Ziel, den Minergie-P-Standard zu erreichen (vgl. Fig. 3). Die Ergebnisse der Erfolgskontrolle stehen noch aus.

Laufende P+D Projekte

- Erfolgskontrolle *Marché International Support Center: Bilanziertes Nullenergiebürogebäude* [61]. Es sind erste viel versprechende Messergebnisse vorhanden. Eine Aussage, inwieweit das Ziel «Nullenergiegebäude» erreicht wird, ist noch verfrüht.
- *Wohnsiedlung Burgunder, Bern* [54]. Die autofreie Wohnsiedlung Burgunder in Bern setzt mit ihren Zielen einen schweizweit neuen Massstab.

In den drei Hauptbereichen der Nachhaltigkeit Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft sollen die Möglichkeiten, Grenzen sowie Auswirkungen einer konsequent nachhaltigen Quartierentwicklung ausgelotet werden. Im P+D-Projekt werden die beiden Hauptziele des autofreien Wohnens (Mobilität) und des Standards Minergie-P-ECO evaluiert und in den Kontext mit den übrigen Themen der Nachhaltigkeit gestellt.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Wie bereits im einleitenden Kapitel dieses Überblicksberichts erwähnt, war das Jahr 2009 für das Thema «Energieeffizienz in Gebäuden» ein dynamisches und weitgehend auch erfolgreiches Jahr. Diese Dynamik hat sich auch auf die Energieforschung im Gebäudebereich übertragen: Die Zusammenarbeit mit den diversen Kompetenzzentren im Gebäudebereich ist gut etabliert und konnte dank der Forschungsaufträge des BFE weiter ausgebaut werden. Das Qualitätsniveau der Schweizer Forschung ist gut und wird im In- und Ausland anerkannt.

Die Projektnehmer des Forschungsprogramms *Energie in Gebäuden* sind international gut vernetzt und die Bereitschaft, in führenden Positionen mitzuwirken, ist gross.

Erfreulich ist, dass in vielen Projekten der Beitrag der Industrie substantiell ist. Damit wird das Interesse an unseren Projekten dokumentiert. Die Umsetzung am Markt erfolgt auf unkomplizierte Weise.

Die inhaltlichen Schwerpunkte liegen bei «Gebäude- und Siedlungskonzepte für eine 2000-Watt-kompatible Bauwerksentwicklung», «Konzepte, Technologien und Planungswerkzeuge für die energetische Gebäudesanierung», sowie «Heizen, Kühlen und Lüften im 2000-Watt-kompatiblen Gebäude». In den Schwerpunkten «Effizienzsteigerung beim Stromverbrauch in Gebäuden» und «Innovative Materialien und Komponenten für den Gebäudebereich» konnten nur unterdurchschnittlich viele Projekte generiert werden.

Erfreulich ist auch die Verdoppelung der Anzahl P+D-Projekte. Die Webseite des Programms www.bfe.admin.ch/forschunggebaeude wird beachtet und regelmässig besucht.

Ausblick: Das Ziel für das Jahr 2010 ist, die angelaufenen Projekte gut zu betreuen, und trotz Budgetengpässen neue Projekte generieren zu können.

Liste der F+E-Projekte

Unter www.bfe.admin.ch/forschunggebaeude/ (Rubrik Projekte) sind die Jahres- und Schlussberichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] M. Bonvin (michel.bonvin@hevs.ch), HES-SO Valais, Enerconseil Sàrl, Signa-Terre SA, Sion, *Renovation des bâtiments: Aspects énergétiques et économiques* (Rapport annuel projet 103334)

[2] P. Benz-Karlström (petra.benz@baslerhofmann.ch), Basler & Hofmann Ingenieure Planer und Berater AG, Zürich, *Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen* (Schlussbericht Projekt 101464)

[3] J. Carmeliet (jan.carmeliet@empa.ch) ETH-HBT c/o Empa Building Technologies, Dübendorf, *Nachhaltige Erneuerung historisch wertvoller Bauten* (Jahresbericht Projekt 103139)

[4] G. Courret (gilles.courret@heig-vd.ch), AIT-CeTT et HEIG-VD, Yverdon-les-Bains, *Lampe au soufre à bulbe séparé* (Rapport annuel projet 103152)

[5] V. Dorer (viktor.dorer@empa.ch), Empa Building Science and Technology Laboratory, Dübendorf, *Urban Climate and Energy Demand in Buildings* (Jahresbericht Projekt 103151)

[6] D. Ehrbar (doris.ehrbar@hslu.ch), S. Moosberger, HSLU Technik & Architektur CCTP und ZIG, Horw, *Methodik zur Integration von Solaren Strategien in der Architektur* (Jahresbericht Projekt 103216)

[7] D. Ehrbar (doris.ehrbar@hslu.ch), Hochschule Luzern Technik & Architektur CCTP, Horw, und K. Nagel (kim.nagel@supsi.ch), ISAAC-DACD-SUPSI, Trevano, IEA SHC TASK 41: *Solar Energy and Architecture* (Jahresbericht Projekt 103423)

[8] M. Erb (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher + Pauli AG, Basel,: *Vakuumdämmung im Baubereich – Deklaration und Auslegung* (Jahresbericht Projekt 102134)

[9] M. Erb (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher + Pauli AG, Basel,: *Vakuumdämmung im Baubereich – Deklaration und Auslegung* (Schlussbericht zu Teilprojekt Wärmebrückenkatalog Projekt 102134)

[10] T. Frank (thomas.frank@empa.ch), Empa Abteilung Bautechnologien, Dübendorf, *Anforderungen an behördentaugliche Dynamische Simulationsprogramme* (Jahresbericht Projekt 103232)

[11] B. Frei (beat.frei@hslu.ch), Hochschule Luzern Technik & Architektur ZIG, Horw, *Erhöhung der Energieeffizienz von Kleinlüftungsanlagen* (Jahresbericht Projekt 103227)

[12] R. Furter (rudolf.furter@hlsu.ch), HTA, Luzern/Horw: *Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Kleinlüftungsanlagen* (Schlussbericht Projekt 101977)

[13] R. Gadola (reto.gadola@hslu.ch), Hochschule Luzern Technik & Architektur, Luzern, HLSU, Luzern: *Gesamtenergieeffizienz von Minergie-P-Wirtschaftsbauten* (Schlussbericht Projekt 102773)

[14] R. Gadola (reto.gadola@hslu.ch), Hochschule Luzern Technik & Architektur ZIG, *Berechnung der Wärmekapazität von inhomogenen Konstruktionen* (Jahresbericht Projekt 103223)

[15] Ch. Gaegauf (christian.gaegauf@oekozentrum.ch), Ökozentrum, Langenbruck, *Gebäudeintegrierte polyvalente Energiebereitstellung* (Jahresbericht Projekt 103333)

[16] F. Gass (fga@weinmann-energies.ch), S. Pache, Weinmann-Energies SA et Ecost, Echallens: *Prevision et justification des consommations d'électricité pour 3 categories de bâtiment* (Rapport annuel projet 102747)

[17] K. Ghazi Wakili (karim.ghaziwakili@empa.ch), Empa Building Technologies, Dübendorf, *Vakuumdämmung in Fassadenanwendungen – messtechnische Begleitung und Leistungsuntersuchung* (Jahresbericht Projekt 102945)

[18] A. Gütermann (ag@amena.ch), Amena ag, Winterthur, IEA SHC Task 37: *200Plus – Gute Detaillösungen im Fassadenbereich* (Jahresbericht Teilprojekt 101968)

[19] L. Guzzella (lguzzella@ethz.ch), S. Fux, IDSC ETH Zürich, *Neue Monte Rosa Hütte: Integrierte Haussysteme für optimale Energie- und Stoffbewirtschaftung* (Jahresbericht Projekt 102946)

[20] M. Hall (monika.hall@fhnw.ch), A. Binz, Institut Energie am Bau HABG FHNW, IEA ECBCS Annex 52 /IEA SHC Task 40: *Nullenergie-Gebäude – Die nächste Generation Energieeffizienter Bauten* (Jahresbericht Projekt 103325)

[21] W. Hässig (haessig@sustech.ch), Hässig Sustech GmbH, Uster: *Haustechnik-Kompaktgeräte – Erkenntnisse aus der Praxis* (Schlussbericht Projekt 101714)

[22] R. Hastings (robert.hastings@aeu.ch), AEU, Wallisellen: IEA-SHC Task 37: *Advanced Housing Renovation by Solar & Conservation* (Schlussbericht Projekt 101968)

[23] H. Huber (heinrich.huber@fhnw.ch), FHNW Institut Energie am Bau, *Optimierte automatische Fensterlüftung in Wohnbauten* (Jahresbericht Projekt 103321)

[24] D. Kehl, A. Müller (andreas.mueler@bfh.ch), Berner Fachhochschule – Architektur, Holz und Bau, Biel, *Parameteruntersuchung des sommerlichen Raumklimas von Wohngebäuden* (Jahresbericht Projekt 103215)

[25] M. Koebel (matthias.koebel@empa.ch), Empa Building Technologies, Dübendorf, *Development of Vacuum glazing with advanced thermal properties* (Schlussbericht Projekt 102341)

[26] M. Koschenz (markus.koschenz@reuss-engineering.ch), Reuss Engineering AG, Gisikon: *Swisswoodhouse – Ein Gebäude für die 2000-Watt-Gesellschaft - Synthesebericht* (Schlussbericht Projekt 102526)

[27] B. Matthey (info@masai-conseils.com), Bernard Matthey Ingenieurs-Conseils SA, Montezillon, *Freecooling en milieu urbain* (Rapport final projet 101229)

[28] F. Meggers (meggers@hbt.arch.ethz.ch), ETH Zürich, P. Benz-Karlström (petra.benz@baslerhofmann.ch), Basler & Hofmann, Zürich: IEA-ECBCS Annex 49 *Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities* (Jahresbericht Projekt 102532)

[29] M. Ménard (menard@lemonconsult.ch), P. Keller (patrick.keller@hslu.ch), Lemon Consuklt GmbH, Zürich und Hochschule Luzern Technik & Architektur Zentrum für Integrale Gebäudetechnik, *Sommerlicher Wärmeschutz bei Wohngebäuden in Holzbauweise – Messungen in acht Minergie Einfamilienhäusern* (Schlussbericht Projekt 102675)

[30] F. Mermoud (floriane.mermoud@unige.ch), B. Lachal, Université de Genêve Institut des Sciences de l'Environnement, Carouge, COP5: *Source froide solaire pour pompe à chaleur avec un COP annuel de 5 généralisable dans le neuf et la rénovation* (Rapport annuel projet 103235)

[31] F. Moghaddam Bützberger (mof@hevs.ch), HES-SO Valais, 1950 Sion, *Stores Intelligents* (Rapport annuel projet 103261)

[32] N. Morel (nicolas.morel@epfl.ch), EPFL bâtiment LESO station 18, Ecublens, *Automatic control of a electrochromic window* (Rapport annuel projet 103320)

[33] K. Nagel (kim.nagel@supsi.ch), Isa Zanetti, ISAAC-DACD-SUPSI, Trevano, *Building Integrated Photovoltaics – Thermal Aspects* (Jahresbericht Projekt 103155)

[34] E. Nelson (Eric.Nelson@fent-solar.com), G. Fent (Giuseppe.Fent@fent-solar.com), Fent Solare Architektur, Wil, IEA SHC Task 37: *Solarfassade für Wohnbau – Erneuerungen mit tiefstem Energieverbrauch* (Schlussbericht zu Teilprojekt 101968)

[35] G. Notter (gregor.notter@hslu.ch), Hochschule Luzern Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik, Horw, *Praxistest Luftdichtigkeitsmessungen bei Minergie-P-Bauten* (Jahresbericht Projekt 103222)

[36] W. Ott, (walter.ott@econcept.ch), Econcept, Zürich, *Nachhaltige Quartierentwicklung Grünau-Werdwies Zürich* (Schlussbericht Projekt 102531)

[37] D. Pahud (daniel.pahud@supsi.ch), R. Camonovo (reto.camponovo@leea.ch) ISAAC-DACD-SUPSI, Trevano et LEEA-HEPIA-HESSO, Genève, G-Box: *Mesure in situ des Performances énergetiques de façades transparentes et translucides* (Rapport annuel projet 102947)

[38] D. Robinson (darren.robinson@epfl.ch), LESO-PB Station 18 EPFL, Ecublens, IEA ECBCS Annex 51 *Energy Efficient Communities: Case Studies and Strategic Guidance for Urban Decision Makers* (Annual Report Project 103322)

[39] M. Sattler (michael.sattler@oekozentrum.ch), Ökozentrum, Langenbruck, *Kraftwerk Haus im Ländlichen Raum* (Jahresbericht Projekt 103330)

[40] J.-L. Scartezzini, (jean-louis.scartezzini@epfl.ch), EPF LESO-PB, Lausanne: *High Performance Integrated Lighting Systems* (Green lighting) (Rapport final projet 101352)

[41] J.-L. Scartezzini (leso@epfl.ch), LESO-PB Bâtiment LE, 1015 Lausanne, *Outil informatique de conception et de visualisation de systèmes d'éclairage naturel* (Rapport annuel projet 103331)

[42] J. Schnyder (schnyder-energie@bluewin.ch), Energie-Dienstleistungen, Bronschhofen, R. Rusterholtz (roger.rusterholtz@ntb.ch), NTB, Buchs: *Konventionelle Wärmeabgabesysteme und deren Regulierung für die Raumkühlung* (Schlussbericht Projekt 102523)

[43] A. Schüler (andreas.schueler@epfl.ch), LESO-PB Bâtiment LE 1015 Lausanne, *Integrated Multifunctional Glazing for Dynamical Daylighting* (Annual Report Project 103326)

[44] P. Schwehr (peter.schwehr@hslu.ch), Y. Kaiser Sägesser, HLSU Kompetenzzentrum Typologie & Planung in Architektur, Horw: *CO_2-minimiertes Bauwerk – Systemische Betrachtung von klimagerechten Bauten* (Schlussbericht Projekt 102376)

[45] S. Stettler, P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), Enecolo AG, Mönchaltdorf: Energie im Gebäude online (Egon) – Hauptphase (Schlussbericht Projekt 102242)

[46] Ch. Tanner (christoph.tanner@hslu.ch), T. Frank (thomas-.frank@empa.ch), Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Horw und Empa Building Technologies, Dübendorf, *Energetische Beurteilung von Gebäuden mittels IR-Bildern – QualiThermo* (Jahresbericht 102850)

[47] F. Thesseling, (thesseling@hbt.arch.ethz.ch), ETHZ Professur für Gebäudetechnik Zürich: *Design Performance Viewer 2.0, Evolution und Weiterentwicklung* (Jahresbericht Projekt 102781)

[48] H. Wallbaum (wallbaum@ibb.baug.ethz.ch), ETH, Zürich, M. Jakob TEB Energy GmbH, Zürich: *Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz – Machbarkeitsuntersuchung anhand des neuen SIA-Effizienzpfades Energie* (Schlussbericht Projekt 102824)

[49] W. Weber (willi.weber@unige.ch), Universtité de Genève, Carouge, P. Hollmueller, Université de Lisbonne, Lisbonne: *EasyPipes* (Rapport final projet 102371)

[50] W. Weber (willi.weber@unige.ch), Peter Haefeli, ISE CUEPE, Genève, IEA SHC Task 37: *Renovation of Historic, Protected Buildings in Geneva* (Schlussbericht zu Teilprojekt 101968)

[51] C. Wemhöner (carsten.wemhoener@fhnw.ch), Institut Energie am Bau Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz, *Heizen und Kühlen über thermisch aktivierte Aussenflächen – Potenzialstudie* (Jahresbericht Projekt 103213)

[52] M. Woodtli (mail@hetag.ch), Huber Energietechnik AG, Zürich, *Internetbasiertes System zur energetischen Optimierung der Haustechnik mit Funktechnologie im Altbaubestand* (Jahresbericht Projekt 103228)

[53] M. Zimmermann (mark.zimmermann@empa.ch), Empa, Dübendorf: IEA-ECBCS Annex 50 *Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Buildings* (Jahresbericht Projekt 101902)

Liste der P+D-Projekte

[54] Hp. Bürgi (hanspeter.buergi@bsr-architekten.ch), BSR Bürgi Schärer Raaflaub Architekten sia AG, Bern, *Wohnsiedlung Burgunder Bern* (Jahresbericht Projekt 103325)

[55] R. Dott (ralf.dott@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: *Cosy Place – Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im Minergie-P Wohngebäude* (Zwischenbericht Projekt 102265)

[56] R. Dott, (ralf.dott@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: *Cosy Place – Sanfte Kühlung mit Erdwärmesonden im Minergie-P Wohngebäude* (Jahresbericht Projekt 102265)

[57] H. Güttinger (www.herbert.guettinger@eawag.ch), EAWAG, Dübendorf, Empa, Dübendorf, 3-Plan Haustechnik AG, Winterthur: *Energie-Detailbilanz des Eawag Forum Chriesbach* (Schlussbericht Projekt 102374)

[58] B. Kämpfen (info@kaempfen.com), Kaempfen architektur, Zürich, *Nachhaltige Modernisierung eines typischen Mehrfamilienhauses der 1950er Jahre – Erfolgskontrolle im Rahmen IEA Annex 50* (noch keine Messergebnisse vorhanden)

[59] P. Keller (patrick.keller@hslu.ch), Hochschule Luzern, Technik & Architektur, Luzern: *Erfolgskontrolle Zweifamilienhaus Rohrer in Stansstad* (Schlussbericht Projekt 102664)

[60] R. P. Miloni (miloni@swissonline.ch), Miloni & Partner, Lichtplanung Architektur, Hausen, Aargau: *Minergie-P-Sanierung eines Mehrfamilienhauses aus dem Jahre 1946 – Profit statt Dynamit* (Schlussbericht Projekt 102680)

[61] R. Naef (naef@naef-energie.ch), Naef Energietechnik, Zürich, *Marché International Support Center: Bilanziertes Nullenergiebürogebäude* (Jahresbericht Projekt 102377)

[62] P. Oesch (p.oesch@twdmueller.ch), Gebr. Mueller AG, Bern: *Messungen Solarix-Wandheizsystem* (Schlussbericht Projekt 100404)

Referenzen

[63] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2007, http://www.energieforschung.ch.

[64] Konzept des Energieforschungsprogramms *Energie in Gebäuden* 2008-2011, Bundesamt für Energie, 2008, http://www.bfe.admin.ch/forschunggebaeude

[65] ESI Immobilienbewertung – Nachhaltigkeit inklusive, Juni 2009, Center for Corporate Responsability and Sustainability (ccrs) der Universität Zürich (http://www.ccrs.uzh.ch/)

[66] Ch. Tanner: Infrarotaufnahmen von Gebäuden, www.theCH.ch, 11/2009

[67] Edition Minergie Sommerlicher Wärmeschutz in Wohnbauten, 2010, www.minergie.ch/edition-minergie

[68] BFE, Merkblatt Hocheffiziente Kühlsysteme für Gebäudesanierungen. Bezugsquelle: www.bundespublikationen.admin.ch

[69] Eracobuild – Strategic network of RDI Programmes in Construction ans Operation of Buildings, http://www.eracobuild.eu

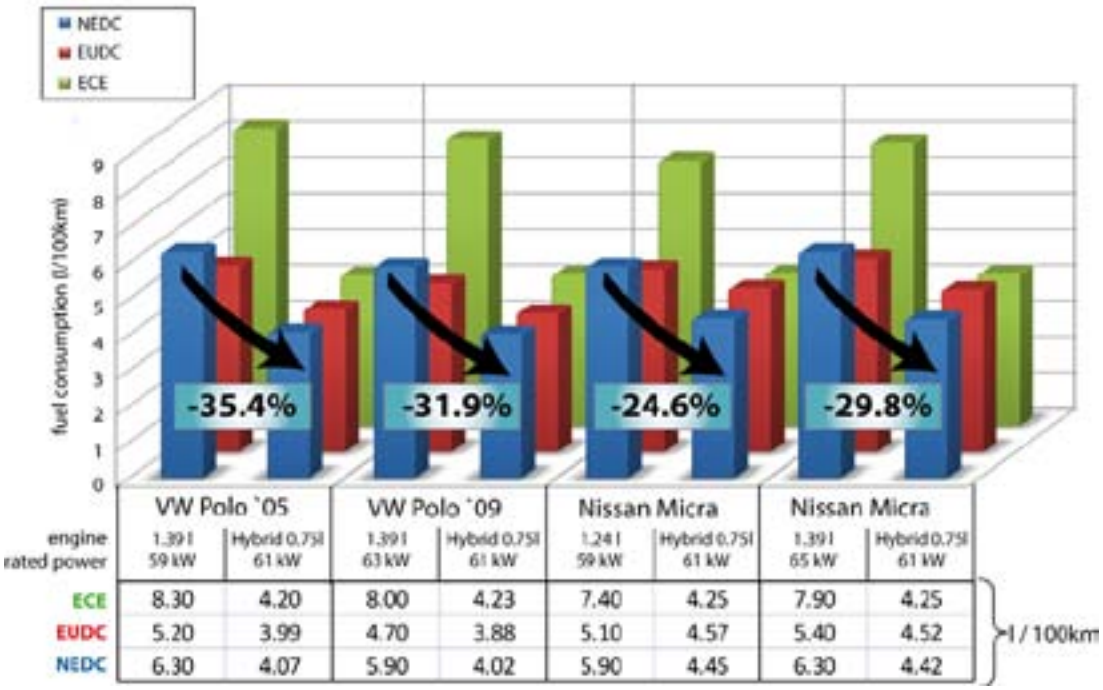
[70] ECBCS Annex 49 Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities, www.annex49.com.

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Verkehr

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



	VW Polo '05		VW Polo '09		Nissan Micra		Nissan Micra	
engine rated power	1.39 l 59 kW	Hybrid 0.75 l 61 kW	1.39 l 63 kW	Hybrid 0.75 l 61 kW	1.24 l 59 kW	Hybrid 0.75 l 61 kW	1.39 l 65 kW	Hybrid 0.75 l 61 kW
ECE	8.30	4.20	8.00	4.23	7.40	4.25	7.90	4.25
EUDC	5.20	3.99	4.70	3.88	5.10	4.57	5.40	4.52
NEDC	6.30	4.07	5.90	4.02	5.90	4.45	6.30	4.42

Der pneumatische Hybrid der ETH Zürich

Die simulierte Anwendung dieses Antriebssystems in aktuellen Fahrzeugen der Polo-Klasse weisst aktuell ein Treibstoffsparpotenzial von bis zu 35,4 % nach. Die Mehrkosten eines solchen Antriebs sind gegenüber dem herkömmlichen Ottomotor marginal.

Programmschwerpunkte

Der Verkehr ist mit 34,5 % des Gesamtbedarfs der grösste Energieverbraucher in der Schweiz. Von 1997 bis 2008 ist der Gesamtenergiebedarf der Schweiz um gut 10 %, derjenige des Verkehrs aber um 15 % gestiegen. Die Gründe für die Zunahme des Verbrauchs im Verkehrsbereich sind:

- die steigende Bevölkerungszahl;
- das Anwachsen des Anteils der das Automobil nutzenden Bevölkerung;
- die steigende Motorisierung und der Trend zu schwereren, komfortableren Personenwagen;
- die steigende Verkehrsleistung bei praktisch allen Verkehrsmitteln;
- die vermehrte Staubildungen;
- die verlängerte Freizeit und dadurch ein erhöhter Freizeitverkehr.

Der Hauptverbraucher im Verkehr ist das Automobil. Dieses wird von der Industrie bezüglich Verbrauch, Emissionen, Sicherheit und auch Komfort laufend verbessert. Diese Grössen sind jedoch stark konkurrenzierend. Gleichzeitig neigt das Kaufverhalten der Autokäufer zu immer leistungsstärkeren, grösseren und schwereren Fahrzeugen und/oder die Käufer werden mit der Werbung und der Beratung in ihrem Kaufverhalten beeinflusst. Vermutlich konjunkturell bedingt wurde dieser Trend 2008 gebrochen und der mittlere Verbrauch der Neuflotte sank 2008 stärker, als das alleine der technische Fortschritt erwarten liess.

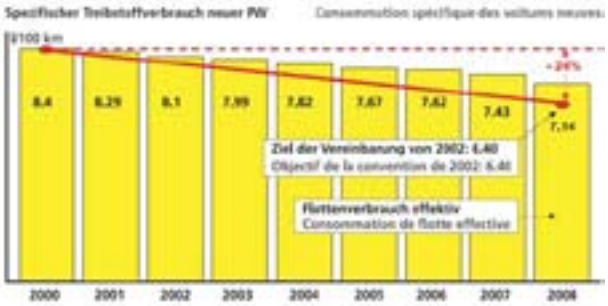


Bild 1: Entwicklung des Treibstoffverbrauchs der Schweizer Neuwagenflotte

Das Forschungsprogramm Verkehr untersucht deshalb Ansätze und Massnahmen zur Absenkung des Energieverbrauchs, insbesondere beim Hauptverbraucher, dem motorisierten Individualverkehr. Dadurch soll der Energieverbrauch und generell die Umweltbelastung abgesenkt sowie der Industrie- und Bildungsstandort Schweiz gestärkt werden. Eine Verringerung des Energieverbrauchs beim Individualverkehr wird dabei vor allem mit folgenden Ansätzen angestrebt:

- Leichtbau von Fahrzeugen;
- hoch effiziente Antriebssysteme;
- kleine Verkehrssysteme, wie z.B. E-Bikes.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Leichtbau von Fahrzeugen

Im Grundlagenprojekt *MC3 – Future Mobility using Communication, Computation and Control* [1] untersucht die ETH Zürich zusammen mit der EPF Lausanne die Möglichkeiten und die Voraussetzungen für einen radikalen Leichtbau von Fahrzeugen, der eine Absenkung des spezifischen Verbrauchs um den Faktor 3 zum Ziel hat. Das Gesamtprojekt ist in drei Teilprojekte unterteilt:

- neue Materialien für Leichtbaufahrzeuge;
- autonome Fahrzeuge und Zusammenstossvermeidung;
- Optimierung und Steuerung für Drive-by-Wire-Fahrzeuge.

Im Rahmen dieses Projekts wurden optimale Ausweichmanöver für Personenfahrzeuge erforscht. Ziel der Arbeit war die Präzisierung des Begriffs «Manövrierbarkeit» im mathematischen Sinne, um die Manövrierfähigkeit verschiedener Fahrzeugkonfigurationen vergleichen zu können.

Hintergrund ist die Interesse an erhöhter Agilität für zukünftige, leichtgewichtige Fahrzeuge, bei denen durch den Verlust an Masse nicht nur Energieersparnisse entstehen, sondern auch ein Verlust an passiver Sicherheit. Zur Vermeidung von Gefahrensituationen und Unfällen ist daher z.B. die Möglichkeit zu schnellerem Ausweichen bei einem plötzlich auftauchenden Hindernis wünschenswert. Es wurden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Steu-

erungsmöglichkeiten in dieser Hinsicht untersucht. Unter anderem werden dabei die Vorteile der aktiven Hinterradlenkung betrachtet. Hier kann als Ergebnis festgehalten werden, dass die Manövrierbarkeit grundsätzlich zunimmt, die Vorteile aber von Manöver zu Manöver unterschiedlich ausfallen und grundsätzlich weniger gross sind als erhofft. Ein weiteres Ergebnis ist die neue Kenntnis des optimal erreichbaren Fahrzeugverhaltens in besagten Manövern, welches nun für Vergleiche mit dem praktisch erreichten Verhalten herangezogen werden kann.

Ein weiterer Schwerpunkt waren «High Sideslip» Manöver. Ein solches Manöver ist zum Beispiel ein kontrolliertes Driften: Der laterale Anteil der Geschwindigkeit der Reifen ist hierbei deutlich höher als in jeder alltäglichen Fahrsituation, die Interaktion des Reifens mit dem Untergrund spielt sich in einem Regime ab, in dem das Fahrzeug kaum mehr steuerbar ist. Derartige Situation treten einerseits im Rally-Rennsport auf, können aber auch in Notfallsituationen im normalen Strassenverkehr vorkommen. In dieser Arbeit konnte nun erstmals theoretisch wie praktisch gezeigt werden, dass das Fahrzeug in diesem Zustand kontrolliert werden kann. Wenn es auch grundsätzlich nicht erstrebenswert ist, in einem Personenfahrzeug in eine solche Fahrsituation zu geraten, so gibt die Arbeit doch guten Einblick in die dann massgeblichen Phänomene. Dies könnte zum Beispiel bei der Regelung eines ins Schleudern geratenen Fahrzeugs zu tragen kommen.

Das Projekt *Leichtbau im Automobil mit Hilfe von Bionik-Simulation* [2] der Georg Fischer AG, Schaffhausen, erfolgt in enger Zusammenarbeit mit der Firma Alcan, Neuhausen. Umweltfreundliche Fahrzeuge zu realisieren, bleibt eine der wichtigsten Verantwortungen und Herausforderungen von Automobilherstellern und Zulieferern. Ein wichtiger Baustein hierfür ist der Leichtbau. Weil weniger Masse beschleunigt werden muss, werden weniger Energieressourcen verbraucht und weniger Abgas erzeugt.

Eine aussergewöhnliche Strategie hierfür ist die Bionik. Dabei werden Baupläne der Natur in die Technik übertragen. Bäume und Skelette sind Tragwerke, die den Gesetzen des ultimativen Leichtbaus folgen. Damit lassen sich neue Wege erlernen, um auch technische Strukturen aus Menschenhand leichter zu gestalten. Die Designideen der Natur lassen sich dabei am einfachsten durch das Verfahren des Giessens in reale Strukturen umsetzen.

Im Rahmen des vom Bundesamt für Energie geförderten Projektes *Leichtbau im Automobil mit Hilfe von Bionik-Simulation* konnten im Jahr 2009 in unterschiedlichen Teilprojekten das Gewichtseinsparungspotezial für Gussteile aus Eisen- und Leichtmetallen untersucht und optimiert werden. Dies erlaubte es, Methodik und Know-how auf dem Gebiet der Strukturoptimierung auszubauen.

Bei den Arbeiten haben sich die parameterfreien Optimierungswerkzeuge der Topologie- und Shapeoptimierung bewährt. Sie haben sich mittlerweile bei der Entwicklung neuer Gussteile als Standard etabliert. In den ersten Quartalen wurden im Rahmen eines Re-Engineerings bereits in Serie laufende Komponenten untersucht. In einzelnen Projekten konnten so bestehende gewichtsbestimmende Grenzen des Lastenheftes aufgezeigt werden. Damit können mit dem Kunden eventuell überzogene Anforderungen und deren negative Auswirkungen auf das Bauteilgewicht fundiert aufgezeigt werden.

In einem weiteren Teilbereich des Projektes wurden regler- und sensitivitätsbasierte Topologie- und Shapeoptimierungen untersucht. Diese erlauben gleichzeitig mehrere Zielvorgaben und beliebige Nebenbedingungen bei der Optimierung zu berücksichtigen.

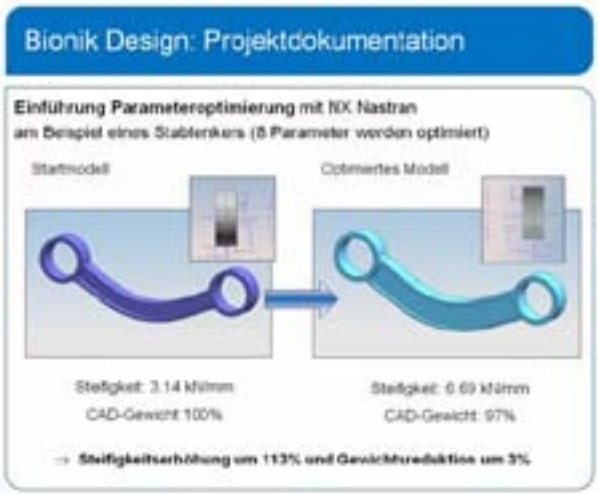


Bild 2: Bioniksimulation senkt die Masse und verbessert die Festigkeit. Quelle Georg Fischer AG

Durch interne Schulungen konnte die bereits erarbeitete Methodik an die Mitarbeiter der Abteilung Produktentwicklung weitergegeben werden. Sie

wird nun in breiter Anwendung in Entwicklungsprojekten eingesetzt.

In *Light-Tec-I* [3] der Esoro AG, Fällanden, wird ein Produktionsverfahren für Faserverbund-Materialien, der so genannte Schmelzprägeprozess, entwickelt, welches die produktive Herstellung von Leichtbau-Strukturbauteilen zum Ziel hat. Die dabei verwendeten hoch faserverstärkten Thermoplast-Materialien besitzen ein sehr gutes Festigkeits–Gewichts-Verhältnis und können effizient und umweltfreundlich verarbeitet werden. Das übergeordnete Ziel: Gewichtsreduktion im Fahrzeug, soll damit einen erheblichen Schritt weitergebracht werden.

Eine Versuchsanlage wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Anlage erlaubt es, mehrere Werkzeuge in Betrieb zu nehmen – von kleineren Versuchswerkzeugen bis zu grösseren Prototyp-Werkzeugen mit Abmessungen (L×B×H) von 1300 × 800 × 500 mm. Mit dem auch fertig gestellten Versuchswerkzeug konnten bereits erfolgreich erste Tests durchgeführt werden. Das Werkzeug besteht aus drei spezifischen Kavitäten, mit denen die diversen geplanten Bauteilversuche durchgeführt werden können. Werkzeug-Einsätze sind auch vorhanden, um lokale Geometrien zu kontrollieren.

Bild 3: Oberflächen-Versuch mit Lagenaufbau. Das Ziel ist es, Fasern zurückzuhalten. Quellle Esoro AG

Die ersten Versuche haben gute Ergebnisse ergeben. So konnten mit sehr einfachen Vorformlingen dreidimensionale Sandwich-Bauteile hergestellt werden, die bezüglich des Leichtbaus ein sehr grosses Potenzial aufweisen. Auch Sicht-Oberflächen-Bauteile konnten dank gezieltem Lagenaufbau mit guter Qualität fabriziert werden. Einige Problemstellen, wie z.B. die Randabschlüsse, sind allerdings noch zu lösen.

Die parallel laufenden konzeptionellen Arbeiten sind auch weit fortgeschritten und beinhalten nicht nur die Bauteilkonzepte für die Bauteil- und Musterversuche, sondern haben auch zum Ziel, die Serienproduktion besser abzusichern. So sind wir auch daran, die vor- und nachgelagerten Prozesse zu evaluieren und zu überprüfen. Zudem wird auch der eigentliche Schmelzprägeprozess optimiert, so dass eine spätere Serienproduktion prozesssicher und effizient durchgeführt werden kann.

Antriebe

Das Institut Mess- und Regeltechnik der ETH Zürich (IDSC) hat als Weltneuheit ein hybrides Antriebskonzept [4] entwickelt, das aus einem Verbrennungsmotor und einem pneumatischen Unterstützungssystem besteht. Die diesjährigen Anstrengungen der Forschungsgruppe lagen im experimentellen Nachweis der Kraftstoffersparnis gegenüber konventionellen Verbrennungsmotoren mit vergleichbarer Leistung.

Um eine vergleichbare Leistung mit dem sehr kleinen Verbrennungsmotor (0,75 Liter Hubraum) zu erreichen, wurde dieser mit einem Abgasturbolader ausgerüstet. Des Weiteren wurde der im vergangenen Jahr beschriebene Prüfstand mit einem externen Sicherheitssystem ergänzt.

Für einen experimentellen Verbrauchsvergleich muss mit dem Hybridmotor auf dem Prüfstand ein Fahrzyklus gefahren werden können. Die hoch dynamische Bremse (ein Elektromotor) wird so angesteuert, dass sie sich wie ein virtuelles Fahrzeug verhält. Nach der Optimierung der einzelnen Betriebsmodi (Pumpen, Pneumatikmotor und Verbrennungsmotor) wurden diese zu einem gesamten Regelsystem zusammengefügt. Damit in den Stop-Phasen der Verbrennungsmotor abgeschaltet werden kann, muss dieser innert kürzester Zeit (<350 ms) nach dem Startsignal wieder die Leerlaufdrehzahl erreichen. Der so genannte pneumatische Start wurde durch eine Optimierung von speziell entwickelten Modellen realisiert. Die Moduswahl ist das Resultat eines Optimierungsproblems (Dynamic Programming).

Nach erfolgreicher Implementierung konnten im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) Kraftstoffersparnisse von durchschnittlich 30 % erreicht werden (Basisfahrzeugtyp: VW Polo). Im Über-

landteil wurde eine Ersparnis von 20 % gemessen, während die Reduktion im Stadtteil 46 % beträgt. Im FTP (Federal Test Procedure) konnten durchschnittlich 30 % eingespart werden (Basisfahrzeug: Nissan Micra). Dabei war zusätzlich die Implementierung einer geeigneten Schaltstrategie nötig.

Nebst den ansprechenden Resultaten im Verbrauch konnte die Turbolochüberbrückung anhand des so genannten *Supercharged Modus* (SC-Modus), bei welchem während des Kompressionstakts Luft eingeblasen wird, erfolgreich gezeigt werden.

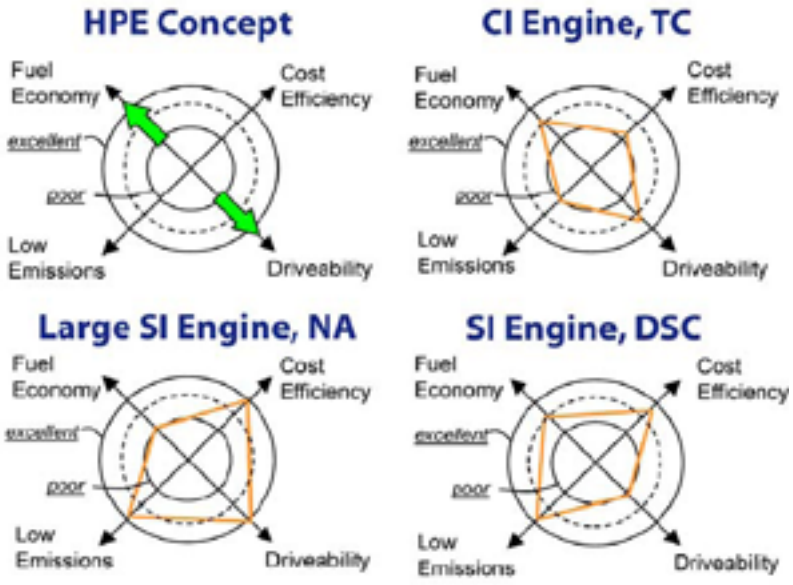


Bild 4: Auswirkung der pneumatischen Hybridisierung (HPE Concept) auf verschiedene Verbrennungsmotorarten. Grün: neue Eigenschaften durch pneumatische Hybridisierung. NA: Naturally Aspirated, DSC: Downsized and Supercharged

Der experimentelle Nachweis des durch Simulationen ermittelten Einsparpotentials liefert die Bestätigung, dass dieses kosteneffiziente Antriebskonzept effektiv auch kraftstoffeffizient ist. Zudem konnte gezeigt werden, dass das vom Fahrer gewünschte Ansprechverhalten anhand des Supercharged Modus erreicht wird.

Das Projekt *Optimierte Strategien für parallele Hybridfahrzeuge* [4] des IDSC der ETH Zürich verfolgt das Ziel, mit der Entwicklung einer modellbasierten Betriebsstrategie für parallele Hybridfahrzeuge den Treibstoffverbrauch zu minimieren. Die Strategie bestimmt anhand des vom Fahrer geforderten Drehmoments zu jedem Zeitpunkt die optimale Momentenaufteilung zwischen Elektro- und Verbrennungsmaschine. Zu berücksichtigende Beschränkungen sind sowohl die Limitierungen der Maschinen bei Drehmoment und Drehzahl, als auch die Limitierungen der Batterie bei Strom, Spannung und vor allem beim Ladestand. Des Weiteren soll die Strategie in Echtzeit auf einem Steuergerät in einem Fahrzeug einsetzbar sein. Dies bedingt, dass die Strategie kausal ist, das heisst, dass die Auswertung der Momentenaufteilung nur auf real verfügbaren Informationen basiert.

Um die Güte der Betriebsstrategie quantifizieren zu können, wird der aus der kausalen Betriebsstrategie resultierende Treibstoffverbrauch a posteriori mit dem theoretischen, mittels dynamischer Programmierung (DP) ermittelten Optimum für ein gegebenes Fahrmuster verglichen.

Es konnte gezeigt werden, dass eine in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH entwickelte kausale Strategie bezüglich des Treibstoffverbrauchs sehr nahe beim Optimum liegt. Diese Strategie basiert auf einem Äquivalenzfaktor, welcher elektrische Energie gegen Treibstoffenergie gewichtet. Dieser Faktor ist wesentlich für die Ladungserhaltung der Batterie und hängt vom Fahrmuster und vom Fahrzeug ab. Die Auswertung dieser Strategie gegenüber dem a posteriori ausgewerteten globalen Optimum mittels DP zeigt, dass sie sehr nahe ans Optimum führt. Die Untersuchung hat allerdings auch aufgezeigt, dass die Strategie – sobald der Ladestand der Batterie gegen seine Grenzen läuft – sich vom Optimum entfernt. Dies passiert meist, wenn relativ grosse Mengen an Energie im Verhältnis zur Speicherkapazität der Batterie rekuperiert werden. Die Rekuperationsenergie setzt sich aus kinetischer und potenzieller Energie zusammen. Aufgrund der guten Vorhersehbarkeit der zukünftigen Änderungen der potenziellen Energie mittels topographischer Karten und GPS wurde die bestehende Strategie so erweitert, dass zukünftige Rekuperati-

onsphasen aufgrund von Höhenänderungen berücksichtigt werden. Dazu werden aus dem geplanten zukünftigen topographischen Profil die Rekuperationsphasen identifiziert und im Äquivalenzfaktor berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die erweiterte, prädiktive Strategie im Gegensatz zur bisherigen Strategie auch in unebenem Gelände Verbrauchswerte nahe dem Optimum erreichen kann.

Im Projekt *Clever* [5] hat es sich das Projektteam bestehend aus Empa (Abteilung Verbrennungsmotoren) und ETH Zürich (Institut für Dynamische Systeme und Regelungstechnik sowie Labor für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme) zum Ziel gesetzt ein Antriebssystem für einen Personenwagen zu entwickeln, welcher einen Drittel weniger CO^2 ausstösst als ein konventionelles, modernes Benzinfahrzeug. Gleichzeitig sollen die aktuellen europäischen Emissionsgrenzwerte erfüllt werden. Das Projekt wird von der Volkswagen Forschung sowie der Robert Bosch GmbH technisch, personell und mit Lieferung von Prototypenbauteilen unterstützt. Finanzielle Unterstützung erfährt das Projekt vom BAFU, vom BFE und von Novatlantis sowie vom SVGW und DVGW. Die technischen Methoden zur Erreichung der Projektziele wurden in früheren Jahresberichten erläutert. Aufbauend auf Arbeiten am Basis-Saugmotor im Benzin- sowie Methanbetrieb wurde ein Ladekonzept unter Zuhilfenahme numerischer Simulationen erarbeitet. Es hat sich gezeigt, dass der ursprünglich verwendete Basismotor (Saugmotor, 1,6 Liter Hubraum) im aufgeladenen Betrieb für die Projektziele unnötig viel Leistung haben würde, sowie dass das anvisierte Brennverfahren zu Spitzendrücken führen würde, welche für die Dauerhaltbarkeit des Motorblocks kritisch sein könnten. Das Projektteam hat sich deshalb entschieden, den Basismotor für den weiteren Verlauf des Projektes zu wechseln. Volkswagen hat neu einen 1,4-Liter-Motor mit verstärktem Motorblock zur Verfügung gestellt, welcher aufgebaut und für das Projekt modifiziert wurde. Parallel dazu wurde 2009 für die neuen Randbedingungen ein Turbolader mit Hilfe numerischer Simulation evaluiert, beschafft und anschliessend am Prüfstand verbaut. Die Vermessung hat eine gute Übereinstimmung zur Simulation gezeigt, so dass der gewählte Lader für das Projekt verwendet wird. Neben dem Motorwechsel wurde entschieden, neuartige Einblasventile für das Projekt zu entwickeln, welche bis jetzt in ähnlicher Form nur für Motoren mit Wasserstoffeinblasung erprobt wurden. Diese neuen Ventile haben das Projekt um rund acht Monate verzögert (Konstruktion und Fertigung der Ventile, Konstruktion und Fertigung neuer Zylinderköpfe, Umbauarbeiten am Motor). Zudem hat die momentane Krise in der Automobilindustrie dazu geführt, dass seitens der Industriepartner zugesagte Termine für die Lieferung von elektrischen Komponenten zum Hybridantrieb um beinahe ein Jahr nach hinten geschoben werden mussten. Die numerischen Arbeiten wurden wie geplant durchgeführt, eine Dissertation konnte 2009 abgeschlossen werden. Das Projekt wird wie geplant zu Ende geführt, allerdings mit einer Verzögerung von rund einem Jahr auf der experimentellen Seite.

Im Projekt *HyCarPRO* [3] der Esoro AG, Fällanden, wird ein optimiertes Brennstoffzellensystem entwickelt und im Alltag erprobt. Als Basis dient das von Esoro eigenfinanzierte Konzeptfahrzeug HyCar, ein plug-in-fähiger Technologieträger mit Schweizer Zebra-Batterie. Eckwerte des optimierten Systems sind eine Effizienz im Teillastbereich von über 50 % und daraus resultierende Reichweiten von 250 km auf Autobahnen und 400 km im Pendelbetrieb, sowie ein Verbrauch ab Tank von weniger als 30 kWh/100km. Hauptziele des Projektes sind eine Optimierung des Systems und eine transparente Erprobung des Fahrzeugs im Alltag. Die Optimierung umfasst dabei neben Leistung und Effizienz auch die Robustheit und die Kosten. Als Nebeneffekt kann und soll das Fahrzeug auch zur Information und Demonstration der Technologie verwendet werden.

Bild 5: Der HyCarPRO bei einem Probefahren / Informationsanlass von EcoCar. Quelle Esoro AG

Anfang 2009 musste beim Lieferanten der Brennstoffzellen festgestellt werden, dass der Befeuchter

des einen Stacks tatsächlich ein grösseres Leck zwischen Wasser und Luft aufweist. Der Firma gelang es auch in mehreren Versuchen nicht, den Befeuchter dicht aufzubauen. Da aus Platzgründen der Einsatz eines industriellen Befeuchters nicht möglich ist, stellte sich für Esoro die Frage, ob das System mit einem Stack betrieben werden soll, oder ob der verbleibende Befeuchter auch für den zweiten Stack verwendet werden kann. In beiden Fällen muss mit der Reduktion der maximalen Leistung gerechnet werden, da entweder nur ein Stack oder nur die Befeuchtungsfläche für einen Stack zur Verfügung steht. Weil mit zwei Stacks ein höherer Wirkungsgrad zu erwarten ist (höhere Zellspannungen, geringerer Strom) und die Funktion von zwei zusammengeschalteten Stacks «erfahren» werden kann, wurde entschieden, das System für zwei Stacks mit einem Befeuchter umzubauen. Dieser Umbau – betroffen war insbesondere die Luftführung und die Kühlung – wurde abgeschlossen und das System konnte anschliessend mit beiden Stacks in Betrieb genommen werden. Dabei konnte ein konstanter Betrieb bei 8,4 kW gezeigt werden, was deutlich über dem nominalen Wert für einen Stack liegt und den Betrieb des HyCars gut ermöglichen sollte. Das System wurde ins Fahrzeug eingebaut und wird nun in Betrieb genommen. Derzeit wird ein elektrischer Isolationsfehler im DC/DC-Wandler behoben, um die Erprobung in der finalen Version fortzuführen. Trotz der Verzögerung konnten sowohl in den Bereichen Ausbildung (Besuch von Schülern einer Technikerschule), Öffentlichkeit (EcoCar-Expo) und Industrie (Jahrestagung SwissBat und Autogewerbe-Verband Schweiz) erste Informationsveranstaltungen durchgeführt werden.

Im Projekt *Wirkungsgradkette für PW-Antrieb* [6] des LAV der ETHZ werden unterschiedliche Fahrzeug-Antriebsarten in Bezug auf ihren Energiebedarf und ihre CO_2-Emissionen mit Berücksichtigung der Umwandlungsschritte auf der gesamten Energiekette untersucht.

Der Wirkungsgrad der Umwandlung im Fahrzeug wird gegenüber den heutigen konventionellen Verbrennungsmotoren angegeben. Im Falle von sekundären Energieträgern wird auch ein Wert für die Produktionseffizienz berechnet und daraus der spezifische Primärenergiebedarf bestimmt. Ähnliche Konversionsfaktoren werden ebenfalls für die CO_2-Emissionen gerechnet, sodass man schliesslich eine zweidimensionale Matrix zur Bewertung optionaler Antriebssysteme erhält.

Bei Plug-In-Hybriden sowie bei Elektrofahrzeugen kommen Batterien als Energiespeicher zum Einsatz. Für eine umfassende Bewertung wird auch die graue Energie für die entsprechende Herstellung und Entsorgung bestimmt. Ähnliches gilt für Brennstoffzellesysteme. Energieverbrauch und CO_2-Emissionen werden somit auf die einzelnen Lebensphasen des Fahrzeuges berechnet.

Um den Einfluss einer (Teil-)Elektrifizierung des Antriebsstranges auf die Stromnachfrage rechnen zu können, werden neben den technischen Daten über die verschiedenen Konfigurationsarten auch Informationen über die dynamische Entwicklung der Schweizer Flotte und Kenngrösse des Verkehrsverhaltens als Szenario-Optionen verwendet. Substitutionszeiten, Variationen des Mengengerüstes und Entwicklung der Kundenpräferenzen werden hier ebenfalls mitberücksichtigt und mit verschiedenen Varianten der untersuchten Methoden zur Produktion der Energieträger Elektrizität und Wasserstoff kombiniert. Auf dieser Basis lässt sich der gesamte zusätzliche Elektrizitätsbedarf in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen bestimmen.

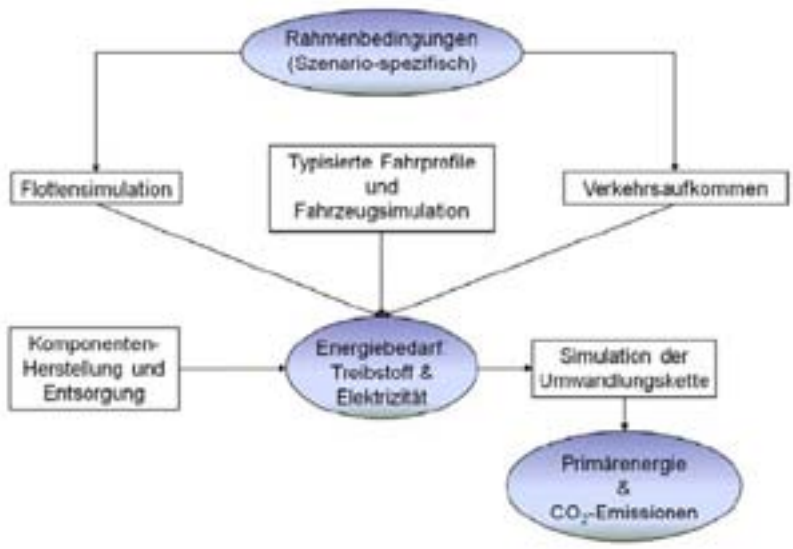


Bild 6: «Wheel to Tank»-Betrachtung des LAV der ETHZ. Quelle ETHZ

Gerade bei der Auslegung von Plug-in-Hybriden hat es viel Raum für die Optimierung des Zusammenwirkens der zwei Systeme (Elektro- und Verbrennung), sowohl auf der Ebene der Bestimmung des Verhältnisses der entsprechenden Leistungswerte, als auch bei der Definition der Fahrstrategie. Für eine optimale Auslegung werden ausgedehnte Simulationen der denkbaren Optionen für Brennverfahren und Abgasnachbehandlung mit der Software «GT-Power» ausgeführt. Dieser Prozess wird in die Gesamtoptimierung des Antriebsstrangs inkl. aller elektrischen Komponenten eingebettet sein. Die optimale Auslegung für verschiedene Zyklen und Fahrstrategien dient somit als Vorbereitung für die Umsetzung in einem Demonstrator.

Die Swissauto WENKO AG in Burgdorf entwickelt im Projekt *20 kW Range Extender für elektrisch angetriebene Automobile* [7] mit Unterstützung des BFE einen neuen, kleinvolumigen Einzylindermotor für den Antrieb eines effizienten, seriellen Hybridantriebs. Hierbei wird der Verbrennungsmotor mit einem Generator gekoppelt Durch eine neuartige Verbindung der beiden Komponenten entsteht ein kompaktes und leichtes Leistungsteil zur Stromerzeugung im Auto.

Die Leistung der Einheit beträgt 22 kW_{el}, was ausreicht, um bei einem Elektrofahrzeug die Batterie bis zur Hälfte reduzieren zu können und die begrenzte elektrische Reichweite auf über 700 km mit Hilfe des Motors zu erweitern. Zur Demonstration wird die Einheit in einen neuen VW Polo als Vertreter des unteren Fahrzeugssegments eingebaut.

Bild 7: Der in einem VW Polo eingebaute, elektrische Antrieb

Fahrzeuge

Der TwinTrak [3] ist ein Hybrid-Antrieb, der von Esoro im Rahmen eines BFE-Projektes vor über 10 Jahren entwickelt wurde und sich seit dann im Einsatz befindet. Der Antrieb ist in den Esoro *H301 Family* integriert, ein leichtes, vierplätziges Fahrzeug, das von einem Kunden als Erstfahrzeug fast täglich genutzt wird. Mit bereits über 75'000 gefahrenen Kilometern ist es wohl weltweit das Plug-In-Hybridfahrzeug mit der höchsten Kilometerleistung. Zudem ist es mit einem über das Jahr gemessenem Verbrauch von ca. 1,2 l/100 km und 10,7 kWh/km noch immer eines der sparsamsten, alltagstauglichen Fahrzeuge überhaupt. Nach ca. 70'000 km und sechsjährigem Betrieb war auch der zweite Satz NiCd-Batterien am Ende seiner Lebensdauer und musste ersetzt werden. Dies wurde genutzt, um eine neue Batterie-Technologie zu evaluieren und das Fahrzeug damit auszurüsten. Damit sollen die Fortschritte der Technologieentwicklung in Realität «erfahren» werden. Verschiedene Technologien wurden evaluiert, und die Wahl fiel schliesslich auf LiMn-Zellen. Gründe waren die breite industrielle Verwendung der Zellen, ihre hohe Robustheit und schliesslich auch die gute Erhältlichkeit – was bei Li-Zellen nicht immer selbstverständlich ist. Aus diesen Zellen wurde ein Batteriepack konfektioniert, das eine nutzbare Kapazität von 10 kWh aufweist, wobei die sicherheitsrelevanten Betriebslimiten, sowie eine tatsächliche Entladerate bereits eingerechnet sind. Mit einem Gewicht von ca. 110 kg kommt man auf eine System-Energiedichte von doch beachtlichen 90 Wh/kg. Die neue Batterie ist im Vergleich zur NiCd-Batterie rund 40 % leichter bei einer um 30 % höheren Kapazität. Dabei ist schon berücksichtigt, dass für die Li-Zellen ein neues Ladesystems eingebaut werden musste. Das Fahrzeug wurde somit rund 100 kg leichter, was Anpassungen am Fahrwerk notwendig machte – die Hinterachse befand sich im Zuganschlag. Für den *H301 Family* stellt die Batterie einen grossen Gewinn dar. Die höhere Kapazität erhöht die elektrische Reichweite nun auch im Alltagsbetrieb auf deutlich über 100 km – zumindest im Sommer. Das geringere Gewicht und die höhere, steifere Spannung führen zu einem agileren und sportlicherem Fahrverhalten. Der erwartete noch geringere Verbrauch konnte bisher noch nicht gemessen werden – teilweise wird er wohl durch die sportlichere Fahrweise kompensiert. Diese Weiterentwicklung wurde

ohne Unterstützung der öffentlichen Hand realisiert.

An der Hochschule für Technik Rapperswil HSR wurde das Elektroleichtfahrzeug *e'mo* [8] in Plattenbauweise entwickelt. Die Karosserie des Fahrzeuges ist aus ebenen Sandwichplatten aus Aluminiumdeckschichten mit PVC-Schaumkern aufgebaut, welche durch Steck- und Klebeverbindungen zueinender positioniert und verklebt werden. Dieses Verfahren ist geeignet, um Fahrzeuge in kleinen Stückzahlen kosteneffizient zu fertigen. An einem vereinfacht aufgebauten Kleinfahrzeug wurden Crashversuche durchgeführt, um das Potenzial der passiven Sicherheit zu überprüfen. Dabei wurde das Fahrzeug in einem ersten Versuch mit 60 % Überlappung gegen eine starre Barriere gefahren und in einem zweiten Versuch seitlich von einem konventionellen Fahrzeug angefahren. In beiden Fällen betrug die Kollisionsgeschwindigkeit 40 km/h. Das Resultat zeigt, dass mit dieser einfachen Bauweise und den kostengünstigen Materialien Sicherheitszellen mit extrem hoher Steifigkeit gebaut werden können, welche den Überlebensraum der Passagiere garantieren.

Für eine virtuelle Optimierung der Fahrzeugstruktur wurde der Crash numerisch modelliert. Schwierigkeiten bereiteten die Abbildung des Deformations- und Versagensverhaltens des Schaumkerns sowie die Modellierung der Verbindungsstellen. Trotzdem konnten partiell eine Übereinstimmung mit experimentellen Resultaten gefunden werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen direkt in die Entwicklung des Prototypenfahrzeuges *e'mo* ein, welches am Automobilsalon in Genf 2009 erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde.

2008 beschaffte die Feldschlösschen Getränke AG Rheinfelden, ein 7,5-Tonnen-Elektrotransportfahrzeug [9]. Dieses Fahrzeug wird im Betrieb ausgiebig erprobt. Bis anhin liegen folgende Resultate und Erkenntnisse vor:

Im Februar wurde in Bern ein Wintertest absolviert. Dies, nachdem die Originalheizung sich als zu wenig leistungsfähig erwiesen hatte und ausgewechselt werden musste. Die Fahrleistungen waren auch in winterlichen Verhältnissen zufrieden stellend. Selbst auf schneebedeckter Fahrbahn funktionierte der Modec problemlos. Der Energieverbrauch betrug durchschnittlich 90 kWh pro 100 km. Im Vergleich zum Sommertest reduzierte sich die Reichweite im Winter somit um 30–40 %.

Ende Oktober 2009 führte die Berner Fachhochschule in Biel eine weitere Normverbrauchsmessung durch. Dabei ergab sich überraschenderweise ein Mehrverbrauch von rund 30 % gegenüber früherer Normverbrauchsmessungen. Die Ursache ist noch Gegenstand weiterer Untersuchungen.

An der Auto Zürich Car Show vom 5. – 8. November 2009 zeigte der Verband e'mobile den Modec in der Sonderschau Elektromobilität. Eine Woche später wurde er an der VEL Expo Ticino in Lugano ausgestellt. Damit konnte die breite Öffentlichkeit für diese Fahrzeugtechnologie sensibilisiert werden.

Im Dezember 2009 beschloss die Geschäftsleitung der Feldschlösschen Getränke AG, 4 weitere Modecs zu bestellen. Die Auslieferung ist auf Frühling 2010 vorgesehen.

Swisscleandrive [10], ein Projekt der Arbeitsgemeinschaft SVFER, ist ein modulares System, mit dem herkömmliche Autos zu Plug-in-Hybrid-Elektroautos erweitert werden. Die Komponenten sind so dimensioniert, dass folgende Eigenschaften erreicht werden können:

- im Alltag emissionsfrei;
- tanken oder aufladen an der Steckdose oder Tankstelle;
- günstiger in Anschaffung und Unterhalt / Amortisation als ein rein elektrisches Auto;
- unbeschränkte Reichweite, Gesamtmotorleistung höher als im Ursprungsfahrzeug;
- Allradantrieb.

Swisscleandrive bietet daher die Möglichkeit, Autos mit unbestrittener Akzeptanz in Bezug auf den durchschnittlichen Alltagseinsatz als Elektroauto auszulegen. Der Verbrennungsmotor wird beibehalten, damit alle ursprünglich vorhandenen Qualitäten in Bezug auf Reichweite, Tanken, Komfort und Höchstgeschwindigkeit beibehalten werden. An den Konzepten und der Ausführung des Prototyps haben Firmen, Personen und Institutionen mitgearbeitet, welche über jahrzehntelange Erfahrung in Einsatz, Entwicklung, Produktion und Vermarktung von elektrischen Fahrzeugen verfügen. Nur so konnte ein Antrieb entwickelt werden, der über sämtliche Vorteile des Elektroantriebs verfügt (Komfort, Benzinunabhängigkeit, CO_2-neutral) ohne die bekannten Probleme von Elektroautos zu haben (beschränkte Reichweite, hohe Kosten für

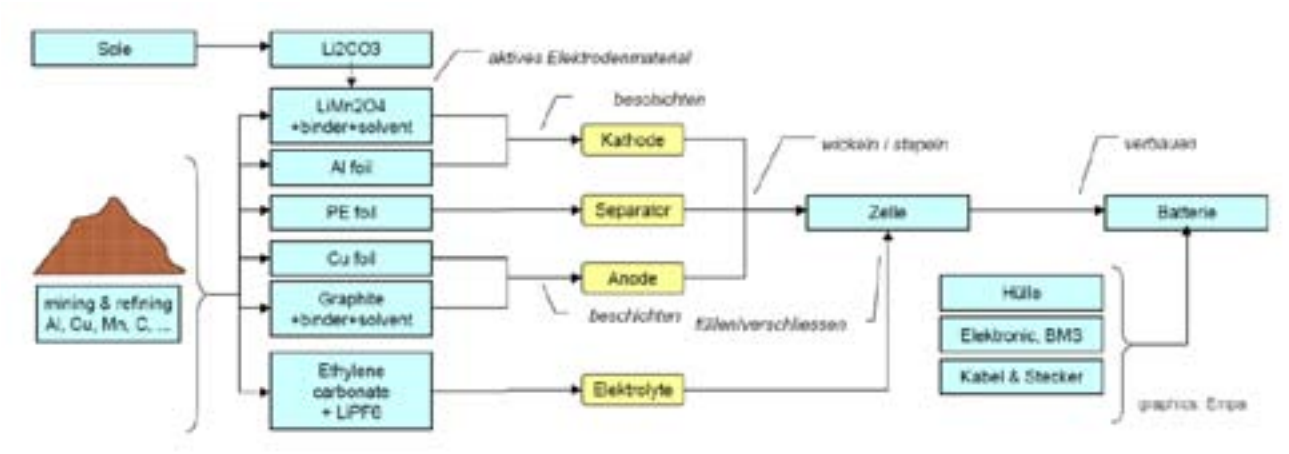


Bild 8: Die Entstehung eines Lithium-Akkus erfolgt in drei Schritten:
- *Zwei dünne Folien und ein Ionen durchlässiger Separator werden gefaltet, um eine grosse Fläche in ein kleines Volumen zu packen:*
- *Dieser Stapel wird in eine Tasche gesteckt, welche mit Li-Salz-Lösung gefüllt und verschlossen wird. Damit ist die Zelle fertig.*
- *Viele soclher Zellen werden zusammengeschaltet und mit einem Batterie-Managementsystem (BMS) und der Verdrahtung in ein Gehäuse gegeben. Damit ist die Batterie fertig.*

Quelle EMPA

Anschaffung und Amortisation der Batterien, ungewohnte Karosserieformen, Sub-Standard-Sicherheit). Das System besteht aus einem Motor, mechanischer Kraftübertragung auf die Antriebsachse, Umrichter, Ladegerät und einigen autotypischen Nebenaggregaten. Die Komponenten werden über die *Swisscleandrive Y-Box* angesteuert. Diese ist zwischen den Bedienungselementen des Autos und den zwei Antriebssystemen (Verbrennungsmotor, Elektroantrieb) positioniert und koordiniert die Systeme im Hybridantrieb. Das thermische System des Ursprungsautos wird im Originalzustand belassen. Das Management durch die *Y-Box* und die Dimensionierung des alternativen Abriebs sorgen dafür, dass der Benzinmotor nur zum Einsatz kommt, wenn es unbedingt notwendig ist. Ab dem 5. Juni 2009 wurde auf den bestehenden Konzepten der Prototyp des Antriebs auf einem *Fiat 500 1.2 Lounge* realisiert. In den Sommermonaten wurden am Auto die notwendigen Anpassungen vorgenommen und der elektrische Antriebsstrang implementiert. Die *Y-Box* wurde im Nachgang zum mechanischen System ab September 2009 entwickelt und am 4. Oktober erstmalig in Betrieb genommen.

E-Scooters

Das interdisziplinäre Forschungsprojekt *E-Scooter* [11] einer von der IKAÖ (Interfakultäre Koordinationsstelle Allg. Ökologie) der Uni Bern geleiteten Arbeitsgemeinschaft hat zum Ziel, einen Beitrag zur technischen Weiterentwicklung von Scootern mit elektrischem Antrieb (E-Scooter) zu leisten, die Markteinführung dieser neuen Fahrzeuge wissenschaftsseitig zu unterstützen und ihre Auswirkungen auf Energie, Umwelt und Mobilitätsverhalten zu analysieren. Die Arbeitsgemeinschaft hat im Herbst 2009 mit der Umsetzung der verschiedenen Arbeitspakte begonnen.

Die Analyse der Marktentwicklung in der Schweiz zeigt, dass das Marktangebot jedoch noch wenig bekannt ist. Ein möglicher Grund dafür liegt beim bisher zögerlichen Auftreten der Anbieter. Für das kommende Jahr zeichnen sich jedoch bedeutende Verbesserungen ab; so wird beispielsweise der Taiwanesische Hersteller PGO einen Scooter mit einer abnehmbaren Lithium-Batterie auf den Schweizer Markt bringen, und die beiden renommierten Schweizer Importeure Intercycle und Komenda werden neu E-Scooters anbieten.

Im Bereich «Ladestationen» konnten dieses Jahr bereits erste Erfolge verzeichnet werden: Mit der BKW FM Energie AG wurde ein detailliertes Vorgehenskonzept zur Erfassung und Behandlung von Interessensbekundungen sowie zur Realisierung der Lademöglichkeiten entwickelt, und die Berner Gemeinde Köniz erarbeitet ein Konzept für eine erste Serie von 20 Lademöglichkeiten.

Im Rahmen der Evaluation von Fördermassnahmen wurde eine umfassende Befragung von Besuchern, Ausstellern und Händlern an der *Swiss-Moto 2009* vorgenommen. Die Ergebnisse sind in einem gesonderten, ausführlichen Bericht zusammengefasst, die Empfehlungen sind bereits in die Vorbereitung der *Swiss-Moto 2010* eingeflossen.

Um Lebenszyklusinventar-Daten und Verbrauchsmessungen von E-Scootern erheben zu können, wurden erste Ergebnisse aus Vorprojekten zusammengefasst in der Fachwelt präsentiert und für die weitere Nutzung im Jahr 2010 auf- und vorbereitet. Zudem wurden Verbrauchsmessungen vorbereitet und begonnen, die eine von Rollenprüfständen unabhängige und dadurch kostengünstigere Datenerhebung erlauben.

Vehicle to Grid V2G

Enco AG, Bubendorf, koordiniert die Schweizer Aktivitäten *V2G* (Vehicle to Grid) [12]. Das Elektrizitätsnetz und die Elektrizitätsversorgung verändern sich schrittweise zum *Smart Grid*, bei welchem die Informationen über den Bezug und über die Rückspeisung von Elektrizität in viel feinerer zeitlicher Auflösung jederzeit verfügbar sein werden. Die Online-Steuerung von Verbrauchern bzw. von dezentral produzierenden Anlagen wird über einen sehr viel grösseren Leistungsbereich möglich sein und dadurch eine optimierte Regelung des Stromnetzes erlauben. Grossfirmen aus dem Bereich IKT (Informations- und Kommunikationstechnologien) wie IBM und Siemens entwickeln heute gemeinsam mit internationalen Energieversorgern wie RWE, EOn etc. die entsprechende Hard- und Software. Allgemein wird hier von einem Milliardenmarkt ausgegangen, Deutschland forscht aktuell mit 200 Mio €, die USA mit 8 Mrd. € und China soll auch mit 100 Mrd. € in diesen Bereich investieren. Smart Grid ist die Antwort auf volatile Produktion und auf die Marktöffnung; es ist die Verbindung der IKT-Branche mit der Energieversorgungsbranche. Es herrscht eine grosse Übereinstimmung, dass dezentrale neue erneuerbare Energien und die elektrische Mobilität wesentliche Bestandteile dieses «Internets der Energie» sein werden. Der – im Vergleich zu anderen Verbrauchern im Heimbereich – hohe Energiebedarf der Autos und die Möglichkeit, die Batterien als Zwischenspeicher einzusetzen, machen die Elektrofahrzeuge oder die Steckdosenhybride zu unverzichtbaren Bestandteilen des Smart Grids. Gleichzeitig ist die Abstimmung zwischen Produktion aus den erneuerbaren Energien und dem Demand Management eine wesentliche Aufgabe zur effizienten Organisation des Netzes. Rund 90 Personen aus dem Bereich der Energieversorgung, der Automobilbrache, der Forschung, von Behörden, NGO, Industrie und Investoren sind im Netzwerk *V2G* eingebunden und rund 30 davon (je nach Themenauswahl an den Arbeitsmeetings) treffen sich regelmässig um nationale und internationale Erfahrungen zu reflektieren und diese zu einer eigentlichen «Vehicle to Grid»-Strategie des Bundes zu verdichten.

Internationale Zusammenarbeit

Die EU fördert in vielen Fachgebieten mit Finanzbeiträgen die Zusammenarbeit nationaler Forschungsförderstellen und den Erfahrungsaustausch. Die entsprechenden Projekte tragen den Namen Era-Net (**E**uropean **R**esearch **A**rea **N**etwork). Ihr wichtigstes Ziel ist die Koordination und die gegenseitige Öffnung der nationalen Forschungsförderprogramme.

ERA-Net *Transport*

Era-Net *Transport* (ENT) [13] gehört zu diesem Era-Net-System und ist ein zeitlich befristetes Konsortium zur Förderung der Zusammenarbeit zwischen staatlichen Forschungsförderstellen im Bereich Verkehr. Mitglieder von ENT sind meistens Verkehrs- oder Forschungsministerien europäischer Länder, z.B. von Frankreich, Deutschland, Grossbritannien, Spanien, Österreich, Polen, Schweden, Norwegen, Dänemark, Finnland. Seit Anfang 2007 arbeitet das eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK in dieser Organisation mit. Die Bundesämter des UVEK mit eigenen Programmen zur Förderung von Forschung und technologischer Entwicklung sind Partner in Era-Net *Transport*:

- das ASTRA: Forschung im Strassen-, Brücken- und Tunnelwesen;

– das BFE: Energieforschung, Schwerpunkt «Effiziente Energienutzung» – Bereiche «Verkehr» sowie «Batterien, Supercaps».

Era-Net *Transport* wird ähnlich wie ein Forschungsprojekt eines internationalen Konsortiums aus Mitteln der Rahmenprogramme der Europäischen Gemeinschaft für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration finanziell unterstützt. Aus diesem Beitrag der EU werden unter anderem die Reisekosten der Mitarbeitenden des UVEK im Zusammenhang mit Era-Net *Transport* übernommen. Zurzeit läuft Era-Net *Transport* II (ENT II); es ist bis Ende 2010 befristet.

ENT Action Groups

Eine der Massnahmen zur Förderung der Zusammenarbeit der nationalen Forschungsförderstellen sind die Action Groups. Diese bestehen aus den Forschungsförderstellen mehrerer Länder, die eine Ausschreibung für Forschungsprojekte in einem definierten Bereich durchführen. Die Projekte müssen gemeinsam von Forschungsstellen aus mindestens zwei Partnerländern des Era-Net *Transport* eingereicht werden. Die Auswahl der zu unterstützenden Projekte erfolgt gemeinsam durch die Vertreter dieser Länder. Jedes Land finanziert den Konsortialpartner aus seinem Land.

Die Schweiz ist an der Action Group 16 *Intermodal Freight Transport* beteiligt. Aufgrund einer Ausschreibung wurden mehrere Projekte mit Schweizer Partnern eingereicht. Das Evaluationsgremium der Action Group 16 hat am 11. März 2008 alle eingereichten Gesuche geprüft und die Projekte bestimmt, die realisiert werden sollen. Folgende Projekte mit Partnern aus der Schweiz gehören dazu:

– *Intermodal Solutions for Trans-European Temperature Sensitive Shipments* (TESS), Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH-Zürich;

– *Model and decision support system for evaluation of Intermodal Terminal networks* (MINT), Rapp Trans AG, Verkehrs- und Transportberatung.

Das BFE hat mit den beiden schweizerischen Partnern Verträge für eine Mitfinanzierung abgeschlossen. An die Finanzierung des Projektes MINT leisten auch das ASTRA, das BAFU und das ARE Beiträge. Weitere Informationen unter www.transport-era.net.

Zudem wurde das von der Förderagentur für Technologie und Innovation (KTI) und dem ASTRA unterstützte Projekt *Spin*-Alp (Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors) nachträglich in die Action Group ENT 2b *Intelligent Logistics* einbezogen.

Pilot- und Demonstrationsprojekt

Unterstützt durch das BFE, entwickelte Protoscar SA, Rovio, das Elektrofahrzeug Lampo [14]. Bei einer Testfahrt über 220,5 km, von Sennwald via San Bernardino nach Riva San Vitale wurden alle relevanten Fahrparameter aufgezeichnet und der Energieverbrauch sowie die Effizienz der verschiedenen elektronischen Komponenten ausgemessen.

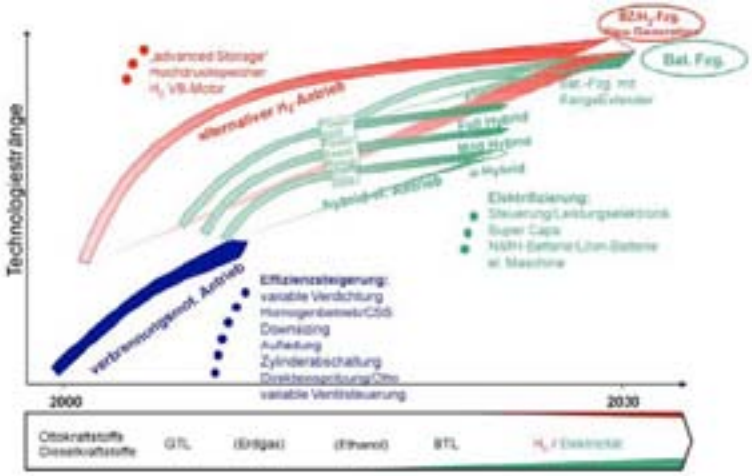


Bild 9: Mögliche Entwicklung der Antriebsstränge und Treibstoffe. Quelle Enco

Bild 10: Frontansicht des Lampo

Für die Ladegeräte wurde eine Moduleffizienz von 90,3 % registriert, während für die Batterien 94,6 % und für die Umrichter-Elektromotoren 80 % ermittelt wurden. Dies entspricht einem mittleren «Tank to Wheel (TtW)»-Wirkungsgrad inkl. Ladegerät, Baterie und Regeneration) von 68 %. Der mittlere TtW Energieverbrauch (ab Netz) betrug 17,3 kWh/100 km. 5 % (0,87 kWh) der Fahrenergie konnte durch die Rekuperation zurückgewonnen werden.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die herausragende Innovation erbrachte das Team von Prof. Lino Guzzella mit der Erfindung des pneumatischen Hybrids in den Vorjahren. Im Berichtsjahr bestätigte die ETH die prognostizierten Verbrauchsreduktionen und wurde verdientermassen mit dem Preis *Watt d'Or* des BFE ausgezeichnet.

Von 1992 bis 2009 investierte das BFE insgesamt CHF 5,3 Mio. in die Erforschung, Entwicklung und Förderung (NewRide) von E-Bikes. Nachdem das Programm NewRide bzw. die E-Bike-Branche im Zeitraum bis 2005 einen eher mässigen Erfolg verzeichnen konnte, ist der Absatz an E-Bikes in der Schweiz seit 2005 stetig stark gewachsen, so dass 2009 in der Schweiz insgesamt 27'000 E-Bikes abgesetzt werden konnten. Bei einem mittleren E-Bike-Preis von CHF 4'000.– generierte diese neue Branche einen Umsatz von ca. CHF 108 Mio. in der Schweiz. Der Schweizer Branchenleader BikeTec Flyer exportiert auch stark wachsend in den EU-Raum, insbesondere den Niederlande, Deutschland und Österreich. 2010 darf mit einer neuerlichen markanten Steigerung des Absatzes gerechnet werden. Dieses Beispiel illustriert aber auch, welchen langen Atem es in der Regel braucht, um eine gute, nutzbringende Innovationen im Markt zu etablieren und wesentliche Marktanteile zu gewinnen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden
(siehe www.recherche-energetique.ch unter der angegebenen Projektnummer). Unter der angegebenen Internet-Adresse sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] L. Guzzella (lguzzella@ethz.ch), R. Siegwart, ETH-Zürich, Y. Leterrier EPF-Lausanne: Mobility through Communication, Computation and Control (MC3), www.ethz.ch (JB)

[2] G. Rau (guido.rau@georgfischer.com), Georg Fischer, Schaffhausen: Leichtbau im Automobil mit Hilfe von Bionik-Simulation und Verbundwerkstoffen, www.automotive.georgfischer.com. (JB)

[3] [3] S. Camenzind (stefan.camenzind@esoro.ch), Esoro, Fällanden: Light-Tec-I, HyCarPRO (JB), TwinTrak; www.esoro.ch.

[4] [4] L. Guzzella, C. Onder, (lguzzella@ethz.ch), ETH-Zürich:, Hybrides Antriebskonzept, Kraftstoffsparende Antriebssysteme (JB) www.ethz.ch.

[5] [5] Ch. Bach, (christian.bach@empa.ch), P. Soltic, (patrick.soltic@empa.ch), EMPA Dübendorf: Clever (JB), www.empa.ch/abt137

[6] [6] F. Noembrini, K. Boulouchos (noembrini@lav.mavt.ethz.ch), ETH-Zürich, Antriebskette für PW-Antrieb (JB).

[7] [7] B.Kohler (b.kohler@swissauto.com), swissauto WENKO AG, Burgdorf, 20 kW Range Extender für elektrisch angetriebene Automobile (JB).

[8] [8] M. Henne (mhenne@hsr.ch), HSR, Rapperswil, *e'mo*, (SB)

[9] [9] U. Schwegler, L. Chapatte (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, Fischingen: Elektrotransportfahrzeug, www.e-mobile.ch; www.newride.ch.

[10] [10] M. Bolliger (mb@nextwave.ch), SVFER, Zuchwil, swisscleandrive (SB)

[11] [11] U. Schwegler, (ursschwegler@bluewin.ch), e'mobile, Fischingen: E-Scooter, www.e-mobile.ch; www.newride.ch (JB)

[12] [12] R. Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), ENCO, Bubendorf: Plug in Hybrid (JB), www.enco-ag.ch .

[13] [13] K. Hausmann (karl.hausmann@tcnet.ch), ERA-NET Trans, (JB)

[14] [14] M. Piffaretti, C. Alonso (c.alonso@protoscar.com), Protoscar SA, Rovio, Lampo, www.protoscar.com, (SB)

Referenzen

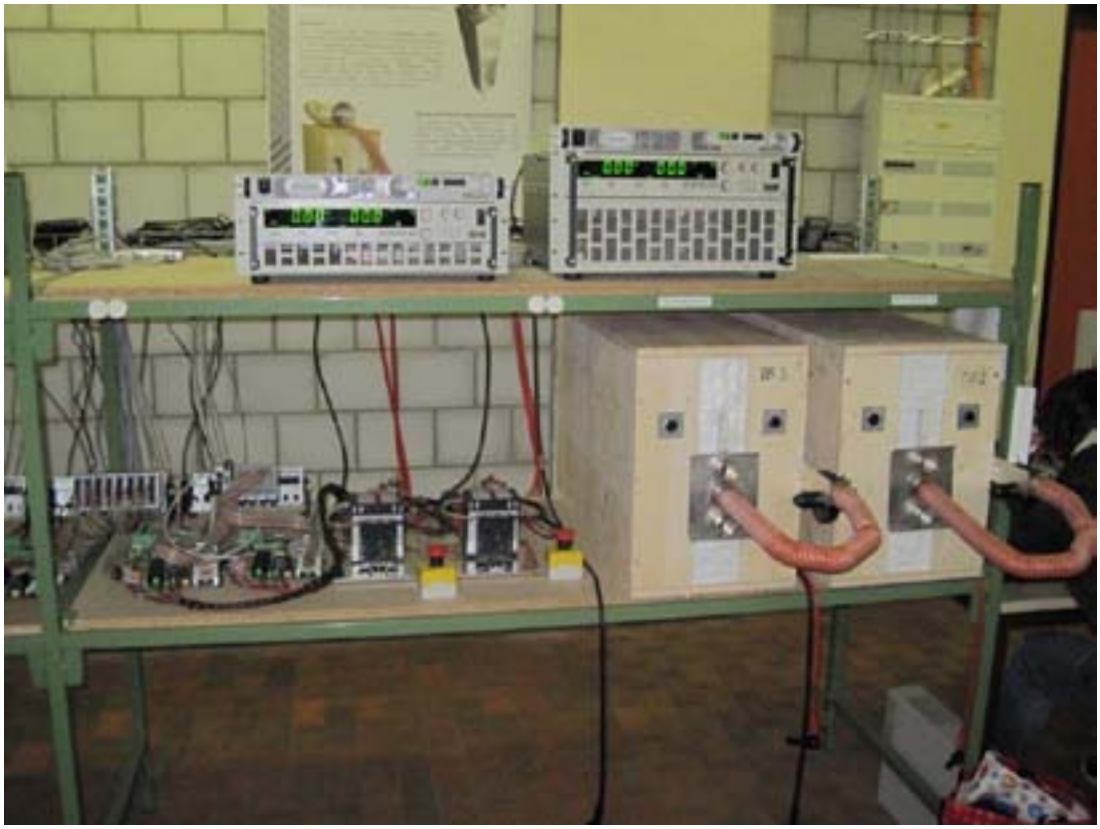
M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) ; BFE, *Bern*:
Forschungskonzept Verkehr 2008–2011

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Akkumulatoren

Martin Pulfer

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Prüfstände für Zebra-Zellen

Im Projekt ABLIM werden bei der KWO in Innertkirchen Zebra-Akkuzellen gezielt gestresst, ausgemessen und die Daten in ein mathematisches Modell überführt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die global stark zunehmende Verbreitung von elektronischen Geräten, aber vor allem der Umstand, dass die durch die stark wachsende Zahl volatiler erneuerbare Energie wie Wind und Photovoltaik nur im Ausnahmefall bedarfssynchron anfällt und somit zwischengespeichert werden muss, lässt künftig eine noch höhere Bedeutung von Akkumulatoren erwarten.

zeiten (hohe Leistung) aber den Nachteil geringer Energiedichte.

Die drei Forschungsschwerpunkte des Forschungsprogramms *Akkumulatoren* lauten:

- Akkus auf Lithiumbasis (Li-Ionen und Li-Polymer);
- Zebrabatterie (NaNiCl-Akku), eine Technologie auf der die Schweizer Firma MES DEA Weltleader ist und einen Jahresumsatz von geschätzt 80 Mio. CHF erzielt;
- Ultra-Kondensatoren (elektrostatische Energiespeicher).

Periode oder Schale	Zahl der Elemente je Periode	Gruppe I a b	Gruppe II a b	Gruppe III a b	Gruppe IV a b	Gruppe V a b	Gruppe VI a b	Gruppe VII a b	Gruppe VIII	Gruppe 0
K	$2 \cdot 1^2 = 2$	1 H								2 He
L	$2 \cdot 2^2 = 8$	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F		10 Ne
M	$2 \cdot 2^2 = 8$	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl		18 Ar
N	$2 \cdot 3^2 = 18$	19 K 29 Cu	20 Ca 30 Zn	21 Sc 31 Ga	22 Ti 32 Ge	23 V 33 As	24 Cr 34 Se	25 Mn 35 Br	26 Fe 27 Co 28 Ni	36 Kr
O	$2 \cdot 3^2 = 18$	37 Rb 47 Ag	38 Sr 48 Cd	39 Y 49 In	40 Zr 50 Sn	41 Nb 51 Sb	42 Mo 52 Te	43 Tc 53 J	44 Ru 45 Rh 46 Pd	54 Xe
P	$2 \cdot 4^2 = 32$	55 Cs 79 Au	56 Ba 80 Hg	57 La[1]) 81 Tl	72 Hf 82 Pb	73 Ta 83 Bi	74 W 84 Po	75 Re 85 At	76 Os 77 Ir 78 Pt	86 Rn
Q		87 Fr	88 Ra	89 Ac[2])	104					

Bild 1: Hauptgruppenelemente des Periodensystems: Vom spezifisch schweren Blei, hin zu kleinen, leichten Elementen wie H, Li und Na. Das Periodensystem selbst verunmöglicht eine Fortsetzung dieser Verbesserungsstrategie für Akkumulatoren. Quelle: KWO.

Die elektrochemische Spannungsreihe ergibt eine Vielzahl von Möglichkeiten für den Aufbau von Akkumulatoren. Um unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte eine möglichst hohe Energiedichte zu erreichen liegt der Fokus der Forschung auf Akkumulatoren, deren Elektrochemie auf kleinen, leichten Atomen wie Lithium oder Natrium mit einem hohen elektrochemischen Spannungspotenzial und einer hohen Ladungsdichte basiert. Hierbei hat speziell Natrium den Vorteil, dass es in der Erdkruste reichlich vorkommt und mit einem Preis von 1000.–CHF/t rund sechs Mal günstiger als Lithium ist. Die Herausforderung für Forschung und Entwicklung besteht darin, dass es bis anhin nur in Hochtemperaturbatterien (NaS und Zebra) angewendet werden konnte.

Zusätzlich zu den Akkumulatoren werden im vorliegenden Forschungsprogramm Ultrakondensatoren als elektrostatische Energiespeicher erforscht. Diese haben den Hauptvorteil einer sehr hohen Anzahl Ladezyklen bei kurzen Lade- und Entlade-

Konkret sollen folgende Eigenschaften verbessert werden:

- die Akku-Leistung;
- die spezifische Energie [Wh/kg] und die Energiedichte [Wh/m3];
- die kalendarische Lebensdauer der Akkus und deren Zyklenfestigkeit;
- der Wirkungsgrad der Akkus;
- die Handhabungssicherheit.

Gleichzeitig sollen die Arbeitstemperatur der Akkus, die Akkukosten und der Giftgehalt (giftfreie Akkus mit einer guten Recyclierbarkeit) gesenkt werden. Schliesslich soll die Kombination und Integration von Ultrakondensatoren mit Akkus und Brennstoffzellen zum Anfahren, zur Glättung der

Betriebsanforderungen usw. untersucht werden, was letztlich zur Erhöhung der Lebensdauer und Verfügbarkeit der Gesamtsysteme führt.

Diese Optimierungen sollen u.A. mit folgenden Ansätzen erschlossen werden:

- Anwendung der Nanotechnologie (Nanotubes als Speicher, Nanofasern und Vlies mit Nanofasern);
- Senkung der Innenwiderstände durch optimierte Elektrodenfeinstrukturen;
- Elektrochemie in lösungsmittelhaltigen Fluiden statt in Schmelzen;
- Erhöhung der Konzentration und der Menge Elektrodenmaterial.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Drivetek AG, Ipsach, erforscht im Projekt *HiBa* [1] eine Hochleistungsbatterie auf Basis einer Lithium-Nanophosphat-Zelle. Einsatzgebiet solcher Batterien sind Hybrid- (Strasse, Luftfahrt) und Elektrofahrzeuge mit kurzer Reichweite (Pendlerfahrzeuge) sowie Starterbatterien. Der Vorteil der Lithium-Nanophosphat-Technologie liegt in der Schnellladefähigkeit (4 C) und hohen Leistungsdichte (3000 W/kg). Weiter gilt diese Zellenchemie als relativ eigensicher, d.h. im Gegensatz zu Akkumulatoren auf Basis Lithium/Kobalt vermögen diese nicht zu explodieren.

Bei der Ausnutzung der Leistungskapazität einer solchen Einzelzelle stösst man mit bisherigen Integrationsansätzen an Grenzen. Um diese Zellentechnologie erfolgreich für die Applikationen am Markt nutzbar zu machen, sind komplette Batteriepacks notwendig, welche alle notwendigen sicherheits- und applikationsspezifischen Überlegungen beinhalten.

Damit die Vorteile der Einzelzelle auf das fertige Batteriepack übertragen werden können (Ströme bis 300 A), trägt Drivetek in diesem Bericht umfangreiche Betrachtungen in den Bereichen Packaging und elektrisches Verhalten des Batteriepacks zusammen. Besonderes Augenmerk wird auf die Verbindungstechnik gelegt. Möglichkeiten zum zellenschonenden Aufbringen (geringe Zellenerwärmung) von hochstromfähigen Zellenverbinder auf die Einzelzellen werden aufgezeigt, wobei sich ein Laserschweissverfahren als besonders geeignet erwies. Es ermöglicht eine grossflächige Verbindung zwischen Zelle und Verbinder bei geringer Erwärmung der Einzelzelle während des Schweissvorganges. Gleichzeitig können massive Zellenverbinder bis zu 1mm Dicke verarbeitet werden. Dies ermöglicht das Führen von grossen Strömen sowie die Abführung von Verlustwärme über die massiven Zellenverbinder in den Aussenbereich des Batteriegehäuses. Anhand einer relativ kleinen «12V/9,2Ah»-Batterie wird die Tauglichkeit der erarbeiteten Verfahren überprüft und durch Messungen werden Daten über das elektrische Verhalten der Batterie zusammengetragen. Daraus werden für oben genannte Szenarien neue Lösungen abgeleitet – insbesondere das Temperaturmanagement der Zellen –, die Machbarkeit aufgezeigt und so die Basistechnologie für Batterien höherer Kapazität erarbeitet.

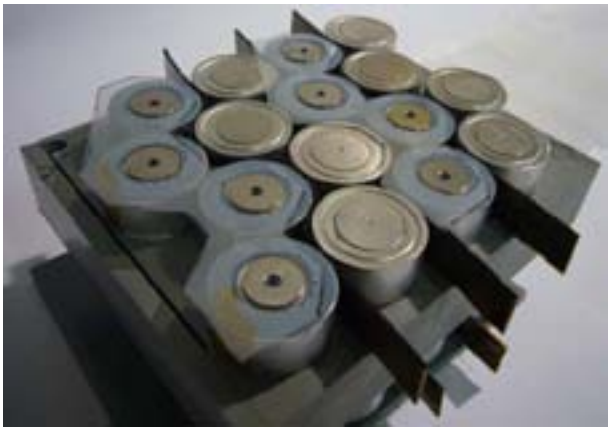


Bild 2: Batterie-Zellanordung in Montagelehre ohne Verbinder. Quelle: Drivetek

Ursprünglich hatte das Projekt auch zum Ziel, die Anforderungen an ein Antriebssystem einer strassentauglichen Variante des elektrischen Off-Road-Motorrads von Quantya (www.quantya.com) zu erarbeiten. Im Projekt ergaben sich aber Verzögerungen und Quantya hatte in der Zwischenzeit eine ebenfalls elektrische, homologierte strassentaugliche Variante entwickelt, die unter dem Namen «EVO1-Strada» erfolgreich verkauft wird. Bereits wird an einer optimierten Nachfolgeversion gearbeitet. Der aktuell verwendete Antrieb genügt aber von der Leistung, vom Wirkungsgrad und der Zu-

verlässigkeit den Anforderungen nicht. Wesentliche Ziele des Projektes wurden dadurch hinfällig – die Anforderungen an die Fahrleistung ergaben sich aus der Fahrpraxis und die Anforderungen für die Strassenzulassung wurden durch die TÜV-Homologierung erarbeitet.

Mit den beteiligten Projektpartnern wurde deshalb entschieden, im Rahmen des Projektes einen neunen, effizienten, zuverlässigen Antrieb, der sich kosteneffizient herstellen lässt, zu entwickeln, sowie Prototypen zu bauen und zu testen. Es wird eine schnell laufende, kompakte Interior-Permanentmagnet-Maschine (IPM) mit auf die Anwendung optimierter Kennlinie entworfen und Prototypen davon werden gebaut. Als Umrichter wird ein automotive-taugliches Standardprodukt der Firma Semikron zusammen mit der bewährten Motor Control Software von Drivetek verwendet. Drivetek übernimmt die Auslegung und Herstellung des Motors, sowie die Anpassung und Parametrierung der Motor Control Software für die Anwendung. Quantya stellt einen Versuchsträger zur Verfügung, verbaut den Antrieb und führt Testfahrten durch. Im Berichtsjahr erfolgte die elektromagnetische Auslegung der Maschine mittels FEM Tool. Parallel wurde die Systemintegration in das Motorrad abgeklärt.

Im Projekt *ABLIM* [2] der Arbeitsgemeinschaft KWO (Innertkirchen), Berner Fachhochschule HTI (Biel) und Battery Consult (Sagno) wird ein Lebensdauermodell für NaNiCl-Zellen (Zebra) entwickelt. Mit diesem Modell wird es möglich, die Lebensdauer von Zebra-Batterien in Elektroautos besser vorherzusagen und diese Zellen so weiter zu entwickeln, dass sie eine höhere Lebenserwartung erreichen. Dadurch werden die Zebra-Batterien wirtschaftlicher und zuverlässiger.

Das (noch nicht fertig entwickelte) Lebensdauermodell wird mit Messdaten aus 5 Zelltestständen gespeist und mit Daten aus dem Betrieb von Elektroautos kalibriert. Der erste Teststand wurde bereits an der HTI unter der Leitung von Battery Consult entwickelt und aufgestellt. Erste Versuche bestätigten die Funktionalität des Teststands, weshalb dieser bereits automatisiert betrieben wird. In einem weiteren Schritt wurden zur Beschleunigung der Tests ab September 2009 vier weitere Teststände bei der KWO in Innertkirchen aufgestellt. Das mathematische Modell für die Vorhersage der Lebensdauer liegt in einer ersten Version vor.

Konkret wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aufbau der Mess- und Steuerhardware;
- Erstellen der Software in LabView ohne automatischen Betrieb;
- Gestaltung einer benutzerfreundlichen Bedienoberfläche in LabView;
- Zusammenbau der Batteriebox mit 10 NaNiCl-Zellen. Die Box beinhaltet Anschlüsse zur Messung aller Zellspannungen und sieben Temperaturen, sowie Stecker für zwei Heizelemente und einen Lüfter.
- Verkabelung aller Elemente (Batteriebox, Mess- und Steuerhardware, Last, Speisung, PC);
- Erstes Laden der Zellen. Der Versuch zeigt, dass die Temperaturverteilung in der Box zu heterogen ist. Deshalb muss ein neues Heizkonzept entwickelt werden.
- Entwicklung des neues Heizkonzepts: Zusätzlich zu den bereits vorhandenen Heizflächen, die auf den Batterien und den Zuleitung platziert sind, werden zwei Heizflächen integriert, welche die Zellen auch von den Seiten heizen.
- Umbau der Batteriebox entsprechend dem neuen Heizkonzept. Darin enthalten ist auch ein neues Konzept zur Platzierung der Temperatursensoren.
- Einbau eines zusätzlichen Temperatursensors, um die Temperatur der Anschlusskabel in der Batterie zu erfassen;
- Für das neue Heizkonzept wird die Ansteuerung der Heizer komplett neu gestaltet, was den Bau eines Ansteuerprints mit MOSFETs zur Folge hat. Das Schalten der MOSFETs geschieht über Digitalausgänge.
- Test des neuen Heizkonzepts mit dem Resultat, dass sich die Temperaturverteilung innerhalb der Batteriebox stark verbessert hat und diese für die Zyklentests ausreichend homogen ist.
- Aufbau eines Relais-Prints, mit dem die Sensorleitungen der Spannungsmessung unterbrochen werden können. Dies ist nötig, weil bereits eine kleine Belastung die Zellen im festen Zustand (T< ca. 150°C) beschädigen kann. Das Relais unterbricht die Leitungen bei einer zu tiefen Batterietemperatur. So sind die Zellen nicht mehr mit dem Messmodul verbunden und un-

belastet, wodurch ein Selbstschutz der Zellen erzielt wird.

- Programmierung des automatischen (unbewachten) Betriebs. Dies beinhaltet im Wesentlichen drei verschiedene Zyklen:
  - Konditionierungszyklus, der nur ganz zu Beginn zehnmal durchgearbeitet wird;
  - Beschleunigter Zyklus: Mit diesem Zyklus werden die Zellen bis zu ihrem Lebensende betrieben;
  - Charakterisierungszyklus, um den aktuellen Zustand der Zellen zu eruieren. Durchführung jeweils nach hundert beschleunigten Zyklen.
- Anpassung der Bedienoberfläche in LabView zur sauberen Bedienung des automatischen Betriebs;
- Beginn des automatischen Betriebs mit paralleler Kontrolle und Anpassung der drei verschiedenen Zyklentypen.

Bisher sind hundert beschleunigte Zyklen erfolgt. Die Auswertung der Tests zeigt, dass der Prüfstand wie gewünscht funktioniert. Nur geringfügige Softwareänderungen sind nötig.

Bild 3: 10 in Serie geschaltete Zebrazellen vor dem Einbau in den Prüfstand. Foto KWO

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Nachdem das mit relativ geringen Mittel dotierte Forschungsprogramm Anfang 2009 ins Leben gerufen war, liegen nun naturgemäss noch keine konkreten und bewertbaren Resultate vor. Erste Resultate können für 2010 erwartet werden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden

(siehe www.recherche-energetique.ch unter der angegebenen Projektnummer). Unter der angegebenen Internet-Adresse sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] D. Giezendanner, (daniel.giezendanner@drivetek.ch), Drivetek AG, Ipsach, HiBa, (JB)

[2] M. Ursin, (Max.Ursin@kwo.ch), KWO, Innertkirchen, ABLIM, (JB)

Referenzen

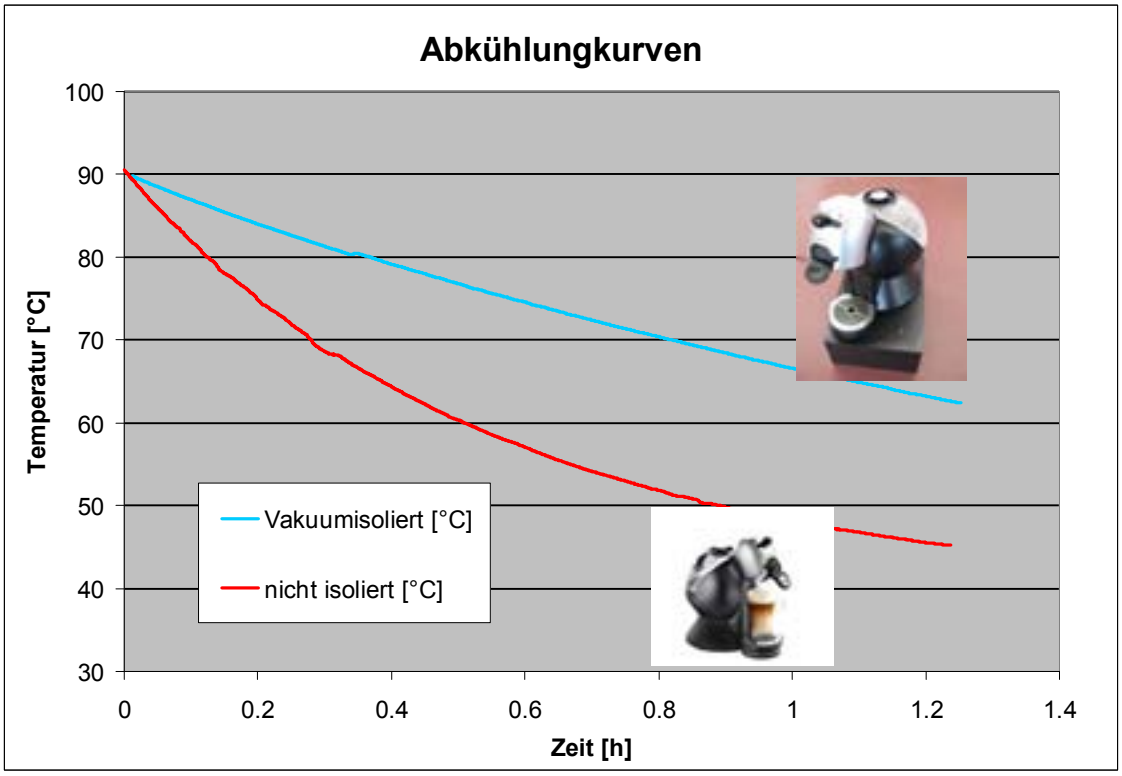
[3] M. Pulfer (martin.pulfer@bfe.admin.ch) ; BFE, *Bern*: *Forschungskonzept Akkumulatoren 2008–2011*

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien und -anwendungen

Roland Brüniger

roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch



Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte (Vakuumisolation)

Die Messresultate zeigen eine deutliche Verbesserung des Abkühlverhaltens der thermisch relevanten Teile im Vergleich zu einer konventionell isolierten Kaffeemaschine, womit die Strategie «Null-Standby-Energie» technisch machbar scheint (Quelle: Helbling Technik AG).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Jahr 2010 treten verschiedene Verbrauchsvorschriften für Elektrogeräte in Kraft. Dieser regulative Schritt geht weitgehend mit den EU-Vorschriften einher. Trotzdem waren dazu diverse Grundlagenerkenntnisse erforderlich, die teilweise im Rahmen von Forschungsprojekten erarbeitet wurden. Das Forschungsprogramm **Elektrizitätstechnologien und -anwendungen** hat als primäres Ziel die Schaffung von Grundlagen für eine effiziente Elektrizitätsnutzung. Das Programm gliedert sich in die beiden Hauptbereiche **Technologien** und **effiziente Anwendungen**.

Im Bereich der **Technologien** bestand die Zielsetzung bei der *thermoelektrischen Energiekonversion* darin, neben der Verbesserung der Effizienz im Materialbereich (ausgedrückt durch die *Figure of Merit*), ein P+D-Projekt zur Erarbeitung von applikatorischem Fachwissen zu initiieren. Im Bereich des *magnetokalorischen Effekts* galt es, die praktischen Grenzen dieser Technologie in einer Machbarkeitsstudie auszuloten. Bei der *Hochtemperatursupraleitung* sind die internationalen Aktivitäten aufmerksam zu verfolgen und die Industrie zum Start eines Projekts zu ermuntern. Die Zielsetzung der *Druckluftspeicherung* bestand unverändert darin, die bisher erarbeiteten fachtechnischen Grundlagen in einem Industrieprojekt fortzusetzen.

Trotz ersten regulatorischen Vorschriften sind noch grosse Einsparungen im Bereich der **effizienten Anwendungen** möglich. Da Haushaltsgeräte einen grossen Verbrauchsanteil aufweisen, bestand eine der Zielsetzungen in der Erforschung neuartiger und hocheffizienter Technologien für verschiedene Haushaltsgeräte. Ebenfalls galt es, durch Fortführung der internationalen Aktivitäten im Rahmen des Programms *Energy Efficient End use Equipment (4E)* der IEA neues und bestehendes Wissen zur Energieeffizienz aufzubereiten und zu verbreiten. Bei den *elektrischen Antrieben* lag das Ziel in der Aufarbeitung technischer Grundlagen zur Umsetzung des grossen, bestehenden Effizienzpotenzials. Im Bereich der *Informations- und Kommunikationstechnik* bestand die Zielsetzung darin, Grundlagen und Erkenntnisse bezüglich dem Thema *Smart Metering* und *Smart Home* auszuarbeiten. Schliesslich bestand im Bereich *Licht* das Bedürfnis, Fakten und Erkenntnisse zum aktuellen Stand der LED-Technologie zu erarbeiten. Auch galt es, Hemmnissen zur Verbreitung von Energiesparlampen mit Grundlagenerkenntnissen zu begegnen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Technologien

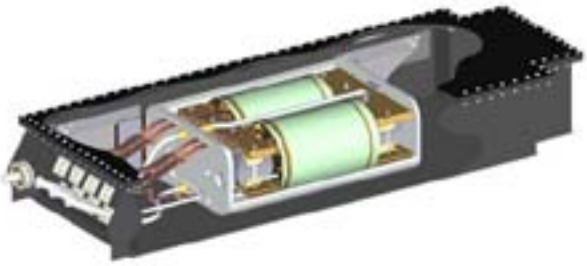
Speicherung

Durch die Förderung erneuerbarer Energien und der damit verbundenen Zunahme stochastischer Stromeinspeisungen nimmt die Energiespeicherung eine zunehmend wichtige Stellung ein. Nach diversen Abklärungen und Industriekontakten konnte nach mehreren Jahren ein Industriepartner gefunden werden, der im Projekt *Réalisation d'un Prototype de Système de Stockage hydropneumatique d'Energie* [1] die in diversen vorangegangenen Projekten gewonnenen Erkenntnisse mit einem Prototypenbau prüft. Das Ziel dabei ist, mit dem Bau einer Anlage zu beweisen, dass Energie mit einer isothermen Verdichtung von Luft auf 250 bar effizient gespeichert und ebenfalls mit der isothermen Entspannung wieder zur Verfügung gestellt werden kann. Während die gesamte Steuereinheit im Jahr 2009 fertig gestellt werden konnte, verzögerte sich der Bau des Wärmetauschers. Anfang 2010 sollte aber auch dieser Teil fertig gestellt sein, so dass dann ein funktionsfähiger Prototyp verfügbar ist.

Energiekonversion

Im Projekt *Zentrale magnetische Kühl- und Kältemaschinen und ihre Bewertung* [2] wurde im Jahr 2009 anhand eines mathematisch-physikalischen Modells mit numerischen Simulationen beurteilt, welche konventionellen Kühlanlagen sich am besten eignen, um durch magnetische Kältemaschinen ersetzt zu werden. Dabei wurde festgestellt, dass aufgrund der verfügbaren Materialien magnetische Chiller mit Permanentmagneten bis ungefähr 100 kW Kühlleistung eingesetzt werden kön-

nen. Zudem besteht eine technische Beschränkung bezüglich der erreichbaren Kühltemperatur, was die möglichen Anwendungsgebiete einschränkt. Diverse Kontakte mit der interessierten Industrie wurden geknüpft, was dazu führen soll, dass im Jahr 2010 nach Abschluss der Auslegung und dem Vorliegen des Designs für eine zentrale magnetische Kühl- und Kältemaschine ein Prototyp mit Industrie-Beteiligung gebaut werden kann.



Figur 1: HTSL-Bahntransformator mit einer Wirkungsgradverbesserung von 92 % auf über 99 % (Quelle: Siemens).

Unter Ausnützung des thermoelektrischen Effekts kann Wärme direkt in Elektrizität gewandelt werden. Die derzeit verfügbaren thermoelektrischen Materialen weisen aber noch einen schlechten Wirkungsgrad auf, so dass deren Anwendungen deshalb bis anhin eher in Nischenbereichen liegen. Mit den Projekten *Erstellen und Modellierung eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator* [3a] und *Layered Thermoelectric Converters (LTEC)* [3b] werden die bisherigen Anstrengungen zur Effizienzsteigerung von thermoelektrischen Materialien mit geschichteten Strukturen fortgesetzt. Mit dem Bau eines Demonstrators soll in einem P&D-Projekt an der ETH Zürich die Nutzung von Abwärme mit thermoelektrischen Elementen gezeigt werden.

Hochtemperatursupraleitung (HTSL)

Mit der Teilnahme am *IEA Programme for Assessing the Impact of High Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector* [4] wird ein umfassender Überblick über die internationalen Aktivitäten auf dem HTSL-Gebiet geschaffen. Obwohl weltweit immer wieder verschiedene HTSL-Anwendungen wie Strombegrenzer, Transformator (Fig. 1), Kabel und Motoren (Fig. 2) gebaut werden, bleibt der Marktdurchbruch, primär aufgrund der noch hohen Leiterkosten und der fehlenden Leiterqualität, aus. Die industriellen Entwicklungen von Supraleitermaterialien mit hohen Stromdichten und niedrigen Wechselstromverlusten werden deshalb besonders aufmerksam verfolgt und stellten einen Schwerpunkt im Jahr 2009 dar. Nach 2010 wird angestrebt, die Schweizer Beteiligung bei den IEA-Aktivitäten fortzuführen und das IEA-Programm um eine weitere Periode bis 2013 zu verlängern.

Effiziente Anwendungen

Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Eine kürzlich publizierte Schätzung geht davon aus, dass der jährliche Energiebedarf alleine in Rechenzentren in Europa bis 2012 von etwa 37 TWh (Stand 2006) auf ca. 77 TWh steigen wird, sofern keine Effizienzmassnahmen getroffen werden. Diese Tendenz zeichnet sich in allen Bereichen der IKT ab. Weltweit werden deshalb viele Untersuchungen für einen effizienten Elektrizitätseinsatz bei Büro- und Unterhaltungselektronikgeräten durchgeführt und umfangreiche Massnahmen ergriffen, um die Effizienz im IKT-Bereich zu erhöhen. Die Schweiz spielt dabei international eine massgebende Rolle und hat Einfluss auf die Ausgestaltung internationaler und globaler Energiedeklarationen, freiwillige Vereinbarungen und Labels genommen.

Figur 2: Rotor eines neuartigen 4000-kW-HTSL-Schiffsmotors (Quelle: Siemens).

Das *Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik* [5] leistet einen wichtigen Beitrag zu einem effizienten Energieeinsatz bei der Informationstechnik/Unterhaltungselektronik. Dazu werden relevante Informationen im In- und Ausland gesammelt, aufbereitet und verbreitet. Verstärkt lag das Schwergewicht der Aktivitäten im Jahre 2009 bei Arbeiten zur Förderung der Energieeffizienz in Rechenzentren. Neu wurde vom Kompetenzzent-

rum verstärkt der Bereich «Energiesparen mit IT» beobachtet und bearbeitet.

Im Rahmen des EU-Programms *Intelligent Energy Europe (IEE)* konnte die Schweiz im Projekt *Development of the Market for Energy efficient Servers* [6a] aktiv mitarbeiten. Dieses zielte darauf ab, die beträchtlichen Potenziale für Energieeinsparungen und Kostensenkungen bei Servern in der Praxis zu demonstrieren und die Marktentwicklung für energieeffiziente Server zu unterstützen. Von 2007 bis 2009 arbeiteten Energieexperten und IT-Fachleute aus der Industrie und Forschung von verschiedenen europäischen Ländern zusammen und publizierten Empfehlungen für eine verbesserte Energieeffizienz bei der Nutzung von Servern. Mehrere durchgeführte Fallbeispiele demonstrieren, dass – in erster Linie durch Konsolidierung und Virtualisierung von Server-Farmen – der Energieverbrauch von Servern um 50 % bis 80 % gesenkt werden kann.

In einschlägigen Fachkreisen hat sich in letzter Zeit das Wort «smart» etabliert und zu einem Modewort entwickelt. «Smart Grid», «Smart Metering» und «Smart Home» suggerieren das Vorhandensein von uneingeschränkten, intelligenten Technologien. Aber sind diese «Smart Technologies» selber auch effizient und/oder unterstützen sie auch die Energieeffizienz? Diesem Thema und der objektiven Einschätzung der verschiedenen «Smart Technologies» stehen verschiedene Forschungsprojekte Pate.

So wird im Projekt *Effizienzsteigerung im Haushalt durch Digitalstrom* [6b] untersucht, welchen Beitrag digitalStrom-Komponenten zur Reduktion des Haushaltsstromverbrauchs leisten könnten. Von Interesse sind insbesondere der zusätzliche Strombezug der Komponenten und das Sparpotenzial durch intelligente Steuerungsfunktionen. Drei Wohnobjekte wurden für eine Versuchsinstallation identifiziert, mit 15-Minuten-Lastgangmessungen ausgerüstet und die Installationsplanung abgeschlossen. Messungen an den digitalStrom-Komponenten und Installationen bei den Wohnobjekten konnten leider nicht durchgeführt werden, weil noch keine entsprechenden digitalStrom-Komponenten geliefert wurden. Im Herbst 2009 wurde daher beschlossen, das Projekt wegen der andauernden Lieferschwierigkeiten zu sistieren. Sobald die Komponenten in der notwendigen Anzahl zur Verfügung stehen, wird das Projekt wieder aufgenommen. Mit der Kleinstudie *Vergleich verschiedener Effizienzlösungen mit Einzelverbrauchsmessungen für Haushalte* [7a] werden zwischenzeitlich Abklärungen bezüglich der Verfügbarkeit von alternativen Komponenten durchgeführt.

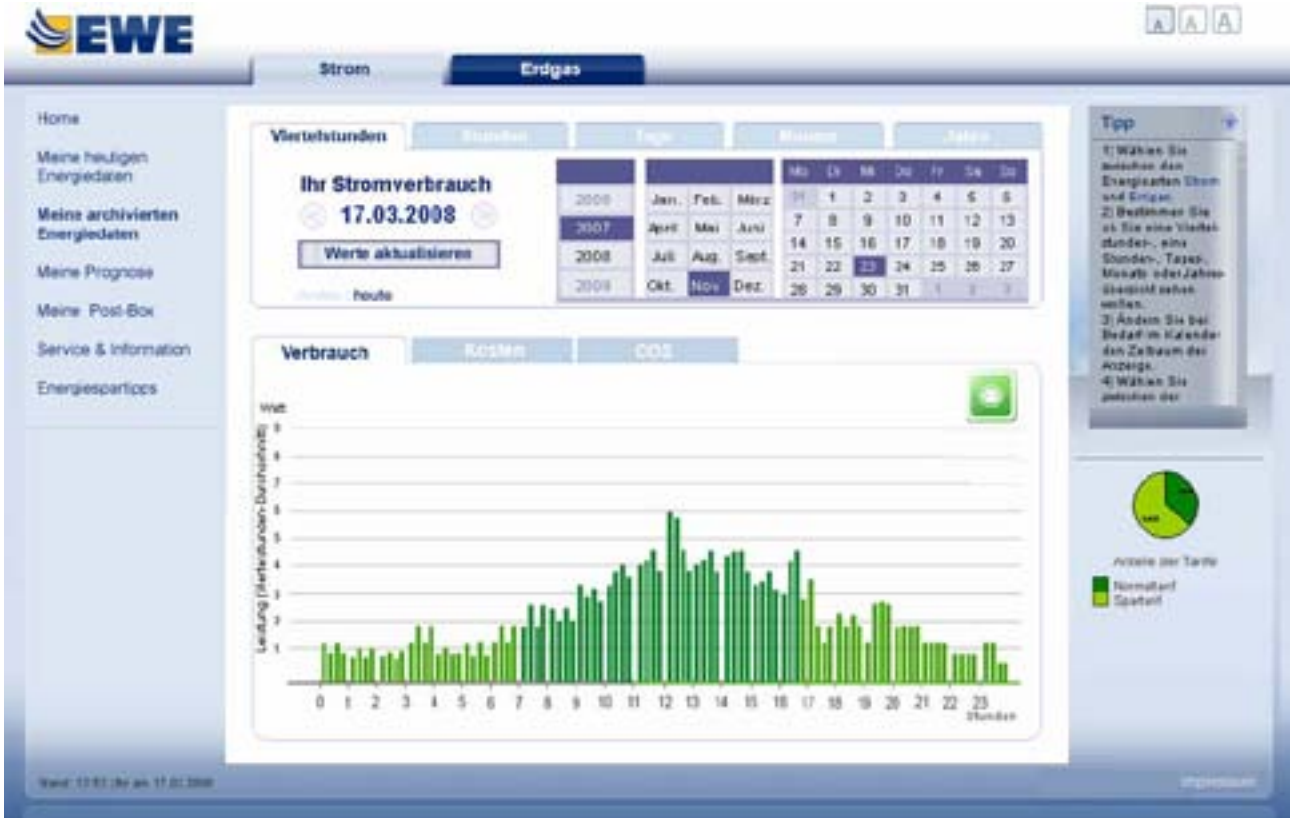
Der *Überblick internationaler Forschungsaktivitäten im Bereich Home Automation* [8] zeigt auf, in welchen Bereichen zu diesem Thema primär im deutschsprachigen Raum geforscht wird, inwiefern sich diese Ergebnisse auf die Schweiz übertragen lassen und wo noch Forschungsbedarf besteht. Die recherchierten Tendenzen und Entwicklungen werden 2010 analysiert und je nachdem werden entsprechende nationale Forschungsprojekte initiiert.

Mit dem Projekt *MEGA (Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformation)* [7b] soll die Energieeffizienz in privaten Haushalten gesteigert werden, indem den Bewohnern ihr Energieverbrauch geeignet visualisiert wird. Im Jahr 2009 wurde die begonnene Recherche vertieft. Die Liste der bereits zum Thema Energieeffizienz in Privathaushalten und Feedbacksystemen durchgeführten Projekte und Studien ist damit substantiell gewachsen. Zudem ist eine umfangreiche Liste an existierenden Technologien, Produkten und Systemen entstanden, die zur Problemlösung beitragen können. Es wurden ferner weitere Grundlagen zum Thema «Energie und Motivation» erarbeitet. Dabei ging es in erster Linie darum, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie man die Zielgruppe der Bewohner eines Haushalts nachhaltig dazu bewegen kann, Energie zu sparen. Die Erkenntnisse sind in die Konzeptionsphase eingeflossen, in der verschiedene Architekturen für ein Feedback-System erarbeitet, evaluiert und ein ansprechendes Visualisierungskonzept erstellt wurde. Schliesslich wurden vier verschiedene Umsetzungsszenarien entwickelt, von denen eines nun im *iHomeLab* umgesetzt wird. 2010 dürfte ein entsprechender Prototyp fertig gestellt werden.

Das Projekt *Smart Metering für die Schweiz – Potenziale, Erfolgsfaktoren und Massnahmen für die Steigerung der Energieeffizienz* [9] untersucht, welche Steigerung der Stromeffizienz mit Smart Metering bei einer breiten Einführung dieser Technologie in der Schweiz zu erwarten ist. Es werden hierfür die Wirkungen von Feedback-Anwendungen (Fig. 3) und von variablen Tarifen betrachtet, welche mit der Smart Meter-Technologie ermög-

licht werden. Das energetische Einsparpotenzial durch Feedback schwankt gemäss den internationalen Erfahrungen stark. Für die Schweizer Haushalte kann von einem Einsparpotenzial in der Grössenordnung von 5 % bis 6 % (oder rund 1000 GWh/a) gemessen am Stromverbrauch der Schweizer Haushalte ausgegangen werden. Damit verbunden sind zusätzliche Nutzen im Abrechnungswesen und bei der Netzbewirtschaftung, die aber noch unbetrachtet blieben. Aufbauend auf einem Überblick aktueller Systemkonzepte und Technologien sowie einer Literaturrecherche über weltweite Erfahrungen mit Feedback und variablen Tarifen, werden Massnahmen zu Handen von Zählerherstellern, Energielieferanten, Verteilnetzbetreibern sowie Bund und Kantonen formuliert. Damit soll das mit der Smart Meter-Technologie verbundene Stromeffizienzpotenzial in der Schweiz optimal erschlossen werden.

Im Ende 2009 gestarteten Projekt *Smart Metering pour éco-cités* [10] ist vorgesehen, mit mehreren Versorgungsunternehmungen im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten einer Smart Metering-Installation Erfahrungen und wissenschaftliche Grundlagen für eine energetisch optimale Einführungsstrategie zu gewinnen.



Figur 3: Internetportal zur Darstellung des Stromverbrauchs dank Smart Metering (Quelle: Econcept/EWE).

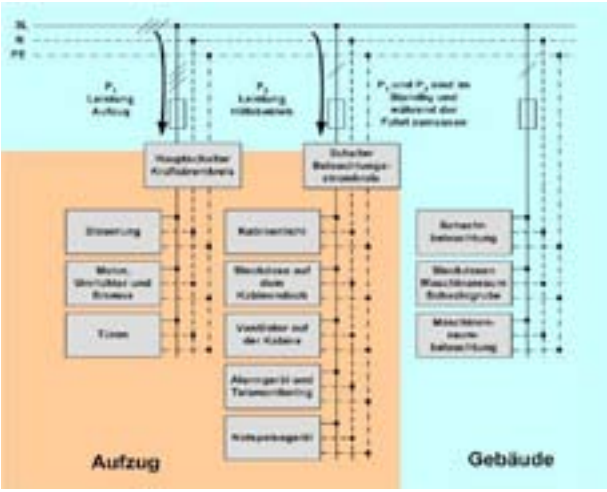
Motoren / elektrische Antriebe

Der Anteil der motorischen Antriebe und Antriebssysteme am gesamtschweizerischen Stromverbrauch beträgt ca. 45 %, was ungefähr 26´000 GWh/Jahr entspricht. Das geschätzte Einsparpotenzial beträgt über 20 %, was einer Grössenordnung von 5000 GWh/a gleichkommt. Dieses Potenzial gilt es zu erschliessen.

Der BFE-Forschungsbericht *Elektrizitätsverbrauch und Einsparpotential bei Aufzügen* [33] hat aufgezeigt, dass die etwa 180'000 Aufzüge in der Schweiz jährlich knapp 300 GWh verbrauchen, also etwa 0,5 % des schweizerischen Strombedarfs. Überraschend war, dass davon etwa 60 % Standby-Verluste sind. Diese Schweizer Studie wurde damals zur Grundlage der Richtlinienarbeit des Vereins Deutscher Ingenieure VDI 4707 [34], welcher ein Energielabel für Aufzüge definierte. Dadurch wurde dem Aufzugsmarkt eine Messlatte zur Verfügung gestellt, die den nötigen Marktdruck und Transparenz erzeugt.

Es ist deshalb anzunehmen, dass sich die neuen Aufzugsanlagen stetig verbessern. Der bestehende Aufzugspark besitzt aber nach wie vor hohe Standby-Verluste. Die Zielsetzung im Projekt

Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen [11] besteht in der Verbesserung der Energieeffizienz von bestehenden Aufzügen und Förderanlagen durch ein Standby-Reduktionsgerät als sog. «Modernisierungs-Kit». Damit soll unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien die Aufzugsanlage aus- und wieder eingeschaltet werden, um den Standby-Verbrauch zu minimieren. Der Knackpunkt dabei ist, dass alle Sicherheitsmechanismen stets verfügbar bleiben. Nachdem 2009 die Standby-Verluste analysiert worden sind (Fig. 4), wurde ein entsprechendes technisches Konzept entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen. Im Jahr 2010 ist der Einbau in einer Kundenanlage (Fig. 5) mit anschliessendem Testbetrieb geplant.



Figur 4: Schematische Darstellung der Energiezufuhr und Schnittstelle zum Gebäude bei einem Aufzug (Quelle: Schindler).

Vermehrt werden Frequenzumrichter zur Effizienzsteigerung von elektrischen Antrieben eingesetzt. Eine Eigenheit dieser Umrichter ist, dass sie Oberwellen und damit Blindleistungen generieren und somit im Netz zusätzliche Verluste verursachen. Im Projekt *Verluste von Frequenzumformern im Motorenbereich* [12] soll eine Potenzialabschätzung durchgeführt werden, um die Rückwirkungen der Umrichter auf die Effizienz der Energieübertragung im Verteilnetz zu ermitteln. Leider konnten die Arbeiten wegen des fehlenden ETH-Diplomanden nur beschränkt durchgeführt werden, aber 2010 sollten alle Vorarbeiten soweit abgeschlossen sein, dass sowohl die theoretischen Grundlagen wie auch die praktischen Messungen zur Verifizierung der Theorie angegangen werden können.

Um die durch die Umrichter generierten Oberwellen zu vermeiden, wird im Projekt *Novel Low Harmonics 3-Phase Rectifier for efficient Motor Systems* [13] eine Konzeptstudie durchgeführt, welche ein neuartiges Umformer-Konzept im Hochstrombereich prüft.

Ein wesentlicher Aspekt für den effizienten Einsatz von elektrischen Antrieben stellt deren korrekte Dimensionierung und das rasche Erkennen von Einsparpotenzialen dar. Die folgenden Projekte stellen dazu dem Umsetzungsprogramm EnergieSchweiz entsprechende Tools zur Verfügung. Mit *Sotea – ein Software-Tool zur Ermittlung des Effizienzpotenzials bei elektrischen Antrieben* [14] wurde ein Software-Tool für Manager entwickelt und getestet. Damit kann eine Fachperson bei einem ersten Kontaktgespräch aufgrund weniger und einfacher Schlüsseldaten des Betriebes den elektrischen Energieaufwand abschätzen und ein Effizienzpotenzial samt Pay-back der Zusatzinvestitionen abschätzen. Anhand von insgesamt 11 Anlagen mit einem Stromverbrauch von 77,6 GWh/a wurde die Software getestet und optimiert. Das ermittelte Einsparpotenzial belief sich dabei auf 6,9 GWh/a. Mit dem Projekt *Analyse und Vorgehen zur energetischen Optimierung von Pumpen bei Wasserversorgungsanlagen* [15] wird gemeinsam mit der Industrie Fachwissen erarbeitet, um bei Wasserversorgungen rasch das Effizienzpotenzial eruieren zu können. Die Entwicklung des Grobchecks ist weitgehend abgeschlossen worden und der darauf aufbauende Feincheck, der eine detaillierte Analyse umfasst, steht noch im Test.

Figur 5: Liftantriebseinheit, die ausgemessen und mit dem Prototypen ausgestattet wird (Quelle: Schindler).

Die *IEC Norm 60034-30* legt neu internationale Standards zur Effizienz von Elektromotoren fest. IE1 entspricht der Standard Efficiency, IE2 entspricht der High Efficiency und IE3 ist die Premiumklasse. Mit einer *Effizienzsteigerung eines hocheffizienten IEC 3 kW-Permanentmagnet-Mo-*

tors inklusiv energetischer Messung als Pumpenanwendung [16] sollte die Effizienz von über 90 % und damit die Erreichung der IE3-Klasse mit einem Prototypen nachgewiesen und als Anwendung an einem Pumpenstand ausgemessen werden. Dies deshalb, weil davon ausgegangen wird, dass Wirkungsgrade im Bereich der Premiumklasse bei Leistungen kleiner 22 kW besser mit Permanentmagnet-Motoren zu erreichen sind als mit Asynchronmotoren. Die Wirkungsgradmessungen haben nun leider schlechtere Leistungsdaten ergeben als erwartet und zwar sowohl für den Umformer als auch für den Motor. Der Grund liegt beim grösseren Eisenverlust im Motor, welcher durch die Hochfrequenz-Ströme des Wechselrichters erzeugt wird, sowie beim grösseren ohmschen Kupferwiderstand der Motorenwicklung, der durch die gewählte Fertigungsmethode hervorgerufen wird.

Figur 6: Installierter drehzahlvariabler Kompressor (Quelle: awtec).

Dank den gewonnenen Erkenntnissen im Bereich der Zusatzverluste ist es jedoch möglich, den Wirkungsgrad in einem Folgeprojekt zu erhöhen.

Mit dem im Herbst 2009 gestarteten Projekt *Effizienter Betrieb von Asynchronmotoren* [17] wird untersucht, inwiefern beim Betrieb eines Motors mit einem Umrichter durch optimale Reduktion des Magnetisierungsstroms bei Teillast eine weitere Erhöhung des Wirkungsgrades realisierbar ist.

Geräte

Obwohl für diverse Geräte ab 2010 neue Mindestanforderungen gelten, bestehen nach wie vor grosse technische Einsparpotenziale. Diese zu identifizieren stellt eine grosse Herausforderung dar und ist eine relevante Stossrichtung in diesem Forschungsprogramm.

So wurde im Projekt *Modifizierter A++-Standard-Kühlschrank mit halbem Energieverbrauch* [18] die Verdichter-Technologie auf Effizienzverbesserungen untersucht. Ein Kühlschrank wurde mit einem drehzahlvariablen Kompressor (Fig. 6) sowie einem Leistungs- und Temperaturmesssystem ausgerüstet. Die Messungen und Optimierungen sind noch nicht abgeschlossen; bisher wurden aber bereits Energieeinsparungen von 20–25 % im Vergleich zum Standardmodell (Fig. 7) erreicht. Im Jahr 2010 wird der Kühlschrank nach Abschluss weiterer Optimierungen an einem unabhängigen Prüfinstitut ausgemessen.

Figur 7: Aufbau mit modifiziertem und zu Vergleichszwecken belassenen A++-Kühlschrank (Quelle: awtec).

Eine Erfolg versprechende, hoch effiziente Technologie für verschiedenste Isolationsprobleme stellt die Vakuumisolation dar. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie *Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte* [19] werden Ansätze für eine hocheffiziente thermische Isolation von Hausgeräten untersucht. Dies geschieht an den beiden Beispielen «Kaffeemaschine» und «Kühlschrank», wobei davon ausgegangen wird, dass die untersuchten Ansätze auf weitere Hausgeräte übertragbar sind. Da eine derartige Isolation nur thermisch wirksam ist, wenn ein dauerhafter Innendruck von $< 10^{-3}$ mbar eingehalten wird, kommen als Wandmaterialien nur Metalle, Glas oder metallbeschichtete Kunststoffe in Frage. Im Jahr 2009 wurden

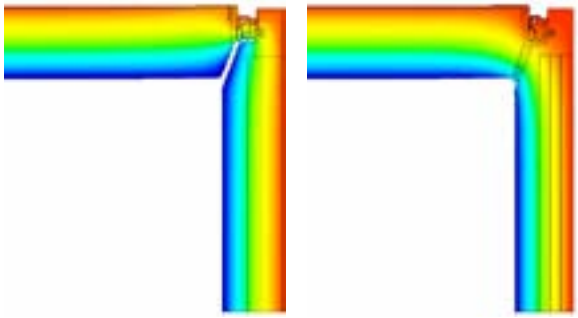
zwei mit Vakuumisolation ausgestattete, vollständige Funktionsmuster einer Kaffeemaschine (Fig. 8) sowie drei Testbaugruppen mit den thermisch relevanten Teilen dieser Kaffeemaschine erstellt.

Erste Messresultate bestätigen, dass die angestrebte Zielsetzung «Null-Standby-Energie» gekoppelt mit einem Komfortgewinn durch kürzere Aufheizzeiten technisch machbar ist (siehe dazu die Abkühlkurve auf der Titelseite). Für den Kühlschrank werden zwei unterschiedliche Ansätze untersucht. Bei beiden Ansätzen wird davon ausgegangen, dass damit – bezogen auf einen A++ Kühlschrank – technisch eine Reduktion der Verluste von ca. 80 % realisiert werden kann. Beim ersten Ansatz werden zwei konzentrisch umeinander rotierbare doppelwandige zylindrische Teile untersucht, welche so gestaltet sind, dass sie sich in einem relativ breiten Winkelbereich überlagern und bei entsprechender Rotationslage einen Zugang zum Innern freigeben (Fig. 9). Ein derartiges Funktionsmuster wurde strukturmechanisch ausgelegt sowie durchkonstruiert und befindet sich momentan in Fertigung. Erste Messungen mit diesem Funktionsmuster werden voraussichtlich im Januar 2010 stattfinden. Beim zweiten Ansatz wird versucht, eine potenziell kostengünstige Lösung zu finden, bei welcher die übliche kubische Form eines Kühlschranks beibehalten wird. Dies verlangt für die Realisierung eines Vakuumspalts ohne Kernmaterial vor allem die Lösung der beiden Problemstellungen «Distanzhalter zur Beibehaltung eines minimalen Vakuumspaltes» und «Randbereich mit minimiertem Wärmetransport».

Figur 8: Funktionsmuster einer Kaffeemaschine mit Vakuuminsolation (Quelle: Helbling Technik AG).

Figur 9: Skizze eines zylindrischen, vakuumisolierten Kühlschranks (Quelle: Helbling Technik AG).

Ferner wurden mit der Unterstützung eines namhaften schweizerischen Herstellers im Projekt *Energieverbrauchsminimierung von Kühlschränken durch thermische Optimierung* [20] die thermischen Verluste unter Verwendung neuartiger Wärmedämmungen untersucht und minimiert. Dabei wurden an einem typischen Kühl-/Gefrier-Kombigerät kalorimetrische Messungen und die numerische Modellierung von Wärmeübergängen dazu verwendet, Schwachstellen aufzuzeigen. Vergleichsmessungen mit vier verschiedenen PU-Materialien geschäumten Schränken zeigen nur einen geringen Einfluss des Schaums auf den Gesamtenergieverbrauch. Zudem wurde ein 3D-Modell des Kühlgeräts erstellt, mit dessen Hilfe diverse Details untersucht werden konnten. Es wurde unter anderem gezeigt, dass der Einsatz von Vakuumisolation besonders im Türbereich des Kühlraums sinnvoll ist. Als wirtschaftlich meistversprechende Massnahme profilierte sich eindeutig der Einsatz einer doppelten Türdichtung im Tiefkühlbereich (Fig. 10).



Figur 10: Isothermenbilder der 2D-Berechnungen von einfach (links) und doppelter Gefrierfachdichtung (rechts) unter typischen Betriebsbedingungen. Deutlich wird die Aufhebung der Schwachstelle durch die zweite Dichtung (Quelle: EMPA).

Da im Markt verschiedentlich festgestellt wurde, dass bei der Selbstdeklaration von Kleinkühlschränken nicht alle Anbieter vergleichbare Angaben machen, wurden im Projekt *Messreihe Kleinkühlschränke* [21] verschiedene Produkte nach den gleichen Messgrundlagen ausgemessen und miteinander verglichen. Leider zeigten sich grosse Abweichungen, die zu verzerrenden Aussagen führen. Die Ergebnisse wurden in einem Merkblatt publiziert und durch *EnergieSchweiz* und der Energieplattform *Hotelpower* umgesetzt.

Der Anteil der Elektroheizungen am Schweizer Stromverbrauch liegt je nach Quelle zwischen 6 % und 12 %. Das Effizienz- und Substitutionspotenzial ist gross. Im Projekt *Elektroheizungen – Massnahmen und Vorgehensoptionen zur Reduktion des Stromverbrauchs* [22] wurden neben der Recherche zu früheren Aktivitäten und statistischen Daten Befragungen bei Elektroheizungs-Betreibern und Energieversorgern durchgeführt. Recherchen und Umfragen zeigen, dass der grosse Investitionsbedarf für ein neues Heizsystem in Verbindung mit den meist sinnvollen Gebäudehüllen-Massnahmen das grösste Hindernis für den Ersatz darstellen. Auf der Basis der erarbeiteten Grundlagen wurde ein Massnahmenkatalog inkl. Finanzierungsaspekte und Rahmenbedingungen zusammengestellt. Als Folgeprojekt wurde aufgrund des grossen Einsparpotenzials von geschätzten 315 GWh/a für Ferienwohnungen das Projekt *Fernsteuerungen für Raumheizungen* [23] gestartet.

Als Alternative zu statischen USV-Anlagen (unterbrechungsfreie Stromversorgung) können ab Leistungen von etwa 400 kVA rotierende USV-Anlagen eingesetzt werden. Im Projekt *Rotierende USV-Anlagen und dynamische Energiespeicherung* [24] werden die Unterschiede zwischen den rotierenden und den statischen USV-Anlagen bezüglich Effizienz und Einsatz aufgezeigt.

USV-Anlagen erzeugen Verlustwärme, die mit Kühlaggregaten abgeführt wird. Im Projekt *Wärmerückgewinnung in USV-Anlagen* [25] wurde eine 2001 entwickelte USV-Anlage mit integrierter Wärmerückgewinnung (WRG) ausgemessen. Daraus wurde ersichtlich, dass die Anlage während der Heizperiode praktisch die gesamte Verlustwärme von etwa 20 MWh/a ans Heizsystem abgegeben hat. Da die energieoptimierte Kälteanlage des Gebäudes eine eigene WRG-Anlage besitzt, beziffert sich die reale jährliche Energieeinsparung nur mit ca. 4 MWh/a elektrischer Energie. Basierend auf dieser USV-WRG-Entwicklung, früheren BFE-Projekten und einer Marktrecherche wurden Szenarien für die Kühlung und Wärmerückgewinnung von USV-Anlagen erarbeitet.

Licht / Leuchten

Durch das «Glühlampenverbot» kommen vermehrt Energiesparlampen mit elektronischen Vorschaltgeräten zum Einsatz. Aufgrund verschiedentlich geäusserter Bedenken wurde im Projekt *Netzrückwirkungen von Energiesparlampen* [26] untersucht, in welchem Ausmass sich aufgrund einer vermehrten Verwendung von Sparlampen Rückwirkungen auf das Netz ergeben. Ausführliche Messungen sowie theoretische Überlegungen zeigten, dass auch bei flächendeckendem Einsatz von Sparlampen nicht zu erwarten ist, dass es zu relevanten Netzrückwirkungen kommen wird.

Mit der Entwicklung der weissen LED (Licht emittierende Diode) steht eine neue Technologie zur effizienten Raumbeleuchtung zur Verfügung. Doch Markt und Entwicklung sind sehr unübersichtlich und verbindliche Qualitätsstandards, welche eine LED beschreiben, sind kaum vorhanden. Mit dem Projekt *Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung* [27] wurden alle Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung identifiziert und die drei Schlüsselmerkmale Effizienz, Lichtqualität und Lebensdauer ausführlich bewertet. Bezüglich Einsatz ist die LED-Beleuchtung dort attraktiv und wirtschaftlich, wo sie ihre einzigartigen Vorteile ausspielen kann: gerichtetes Licht, sehr lange Lebensdauer, keine Wärme im Lichtstrom, ultraviolett-freies Licht, Farbmodulation und verlustarme Dimmung.

Diverses

Werden Eisenbahnzüge während ihrer Fahrt durch andere Züge in ihrer Fahrweise beeinflusst, so resultiert aus den zusätzlichen Abbrems- und Wiederbeschleunigungsvorgängen ein erhöhter Energieverbrauch. Dieser lässt sich reduzieren, wenn durch ein geeignetes System die Anzahl Beeinflussungen vermindert wird, oder bei nicht vermeidbaren Beeinflussungen die Disposition den Energieaspekt mitberücksichtigt. Das Projekt *Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugsmanagement* [28] zeigt, wie die Architektur eines solchen Systems aussehen könnte und

schlägt Migrationsschritte zur Einführung vor. Das Einsparpotenzial wurde mittels Simulationen, Messungen und Befragungen des betroffenen Personals abgeschätzt und beträgt ca. 5 % von 1800 GWh/a, also rund 90 GWh/a. Die SBB erarbeiten derzeit ein entsprechendes Umsetzungsprojekt, um die vorgeschlagenen Konzepte in den nächsten Jahren umzusetzen.

Nationale Zusammenarbeit

Durch die Programmleitung werden periodische Treffen im Rahmen der etablierten *BFE-Trendwatching-Gruppen* zu den Themen *Informatik und Kommunikation (IKT), elektrische Antriebe, Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)* und *Hochtemperatursupraleitung (HTSL)* organisiert. Damit stehen fachkompetente, nationale Diskussionsplattformen für Fachleute aus Industrie, Hochschule und Forschungsstätten zur Verfügung, die sich bewährt haben und gegenseitig fruchtbare Inputs ermöglichen. Aufgrund mangelnden Interesses der Industrie wurden die Aktivitäten der USV-Gruppe Ende 2009 vorerst sistiert.

Ein durch die Programmleitung initiiertes Ausbildungs-Netzwerk zum Thema Motoreneffizienz hat sich etabliert und soll dazu beitragen, das entsprechend verfügbare Wissen an Schulen jungen Technikern und angehenden Ingenieuren zu vermitteln.

Beide Eidg. Technische Hochschulen (Zürich, Lausanne) sowie verschiedene Fachhochschulen werden soweit zweckmässig in die Forschungsaktivitäten miteinbezogen. So haben die Fachhochschulen Westschweiz (Sion), Nordwestschweiz (Brugg), Ostschweiz (Chur) und Zentralschweiz (Horw/Luzern) im Motoren-/ Leistungselektronikbereich sowie die Fachhochschule Westschweiz (Yverdon) im Bereich der magnetokalorischen Energiekonversion Projektarbeiten geleistet.

Das etablierte *Kompetenzzentrum Energie- und Informationstechnik* an der ETH Zürich leistet weiterhin einen wichtigen Beitrag zur nationalen (wie auch internationalen) Zusammenarbeit. Das *iHomeLab* mit dem *Swiss Research Center for Smart Living (CEESAR)* der Hochschule Luzern wird von über 30 Partnern aus Industrie und Forschung unterstützt und ist in mehreren BFE-Projekten involviert.

Der dritte 4-Jahreszyklus des Projekts *Materials with Novel Electronic Properties* (MANEP) des schweizerischen Nationalfonds hat im Juli 2009 begonnen und wird 2013 enden. 19 Institute und 6 Industriepartner sind einbezogene und befassen sich mit der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien. Davon beschäftigen sich 8 Teilnehmer theoretisch oder experimentell mit HTSL-Supraleitern.

Die Zusammenarbeit mit der Industrie wird in verschiedenen Bereichen (z.B. SBB, Motorenindustrie, Telecom-Unternehmungen, Detailhandel) weitergeführt. Es wird bei neuen Projekten soweit möglich darauf geachtet, dass ein Industriepartner im Projekt involviert ist.

Generell wird ein enger Kontakt mit dem Programm *EnergieSchweiz* [35] gepflegt, was wesentlich zur nationalen Umsetzung des generierten Wissens beiträgt.

Durch die gemeinsame Finanzierung von Forschungsprojekten konnten bestehende Kontakte zu weiteren Förderinstitutionen wie dem *Energiesparfonds der Stadt Zürich*, dem *Stromsparfonds Baselstadt* und der *KTI* gepflegt werden. Zudem bestehen gute Kontakte zu mehreren Elektrizitätswerken und zu *Swisselectric Research*.

In diversen Projekten wird ein enger Kontakt zu den schweizerischen Energieagenturen *EnAW*, *eae* und *S.A.F.E* [36] gepflegt und es sind – soweit zweckmässig – Branchenverbände wie z.B. *swissT.net, Swissmem, Swico, FEA* eingebunden. So wurde kürzlich eine Zusammenarbeit mit dem *FEA* (Fachverband Elektroapparate für Haushalt und Gewerbe Schweiz) vereinbart, um die erforderlichen Marktdaten für die internationalen Mapping und Benchmarking-Arbeiten der IEA zu aggregieren.

Internationale Zusammenarbeit

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. Ebenfalls erfolgt ein internationaler Informationsaustausch über die *ESAS (European Society for Applied Superconductivity)*.

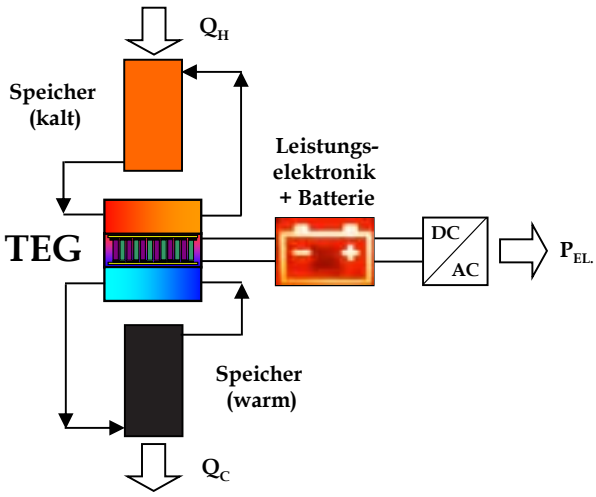
Die Schweiz engagiert sich im IEA-Programm *4E (Efficient Electrical End Use Equipment)* und hat mit der Leitung des Motoren-Annexes auch fachliche Verantwortung übernommen. Auch am EU-Programm *Intelligent Energy Europe IEE* hat sich die Schweiz beteiligt. So engagierte sie sich an den Arbeiten des Projekts *Development of the Market for Energy Efficient Servers* [37] und begleitet als assoziiertes Teammitglied das kürzlich gestartete Projekt *SELINA* [38] (*Standby Energy Losses in new Appliances measured in Shops).*

Ende 2009 haben die drei Länder Deutschland, Österreich und Schweiz ein *Memorandum of Understanding (MoU) zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Erforschung und Entwicklung von IKT-basierten Energiesystemen der Zukunft* unterzeichnet. Damit soll eine enge Zusammenarbeit in diesem Bereich im deutschsprachigen Europa etabliert werden.

Persönliche Kontakte zu verschiedenen Energieagenturen (insbesondere Dänemark, Niederlande, Österreich) sowie zu Schlüsselpersonen internationaler Programme wie z.B. dem UK Market Transformation Programme, ermöglichen immer wieder inspirierende Anregungen. Ferner werden die Kontakte mit der Europäischen Kommission, der *IEA, der EPA (Environmental Protection Agency)* und dem *LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory)* weiter gepflegt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte / Umsetzungsaktivitäten

Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten sind mit geeigneten Massnahmen möglichst effizient umzusetzen. Dazu sind oftmals vorbereitende, marktnahe Forschungsarbeiten erforderlich.



Figur 11: Systemkonfiguration des thermoelektrischen Generators TEG (Quelle: ETHZ).

Energiekonversion

Mit dem Projekt *Realisierung eines thermoelektrischen Generators für die Stromerzeugung aus Niedertemperatur* [29] soll ein thermoelektrisches System als Demonstrator gebaut und realisiert werden. Damit sollen die Vorteile der Thermoelektrizität hervorgehoben und die grundsätzliche Realisierung der Stromerzeugung aus Niedertemperaturwärme aufgezeigt werden. Zudem will man damit auf die Verfügbarkeit effizienterer und billigerer Materialien und Module vorbereitet sein.

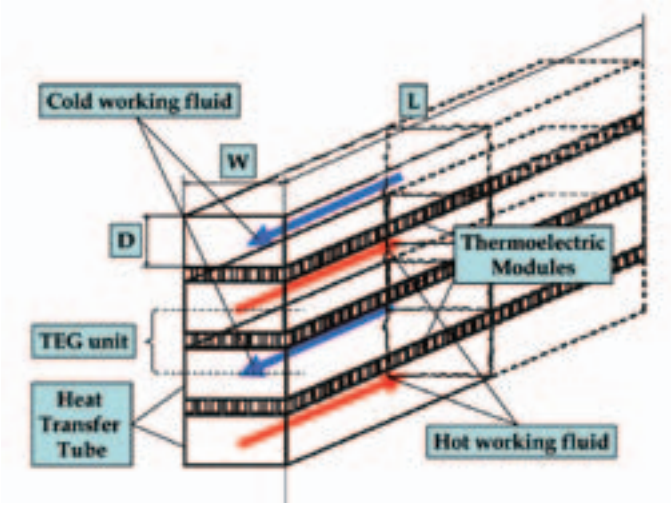
Mit dem Demonstrator soll insbesondere geprüft werden, ob die Abwärmenutzung von Rechenzentren und die Nutzung der Wärme von Geothermieanlagen mit Thermoelektrik möglich sind. Die Konfiguration (Fig. 11) wurde entwickelt und das Prinzip eines Stack-Aufbaus (Fig. 12) wurde ins Auge gefasst.

Motoren / elektrische Antriebe

Mit der *IEA-ExCo-Vertretung des Implementing Agreements 4E* [30] nimmt die Schweiz an den Arbeiten des IEA-Programms *4E* (*Efficient Electrical End Use Equipment*) teil. Die Schweiz leitet zudem den *Electric Motor Systems Annex (EMSA)* [31] als Operating Agent.

Um das erarbeitete Fachwissen im Bereich Permanentmagnet-Motoren international einzubringen, wurde die BFE-Studie *Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Perma-*

nentmagnet-Motoren [32] aktualisiert, zusammengefasst und ins Englische übersetzt. Damit kann das zusammengetragene Fachwissen international genutzt und in den neuen Task «New Technology» des EMSA eingebracht werden.



Figur 12: Prinzip des Stack-Aufbaus des thermoelektrischen Generators (Quelle: ETHZ).

Geräte

Im *Implementing Agreement 4E* erfolgen neben dem bereits erwähnten Thema Motoren diverse Untersuchungen über verschiedene Haushaltsgeräte in den Annexes *Mapping & Benchmarking* und *Standby*. Ferner arbeitet Frankreich an der Vorbereitung eines neuen Annexes zum Thema *LED*.

Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Im Bereich **Technologie** konnten weitere Materialfortschritte bei der *thermoelektrischen Energiekonversion* verzeichnet werden und die involvierte Forschergruppe an der *EMPA* nimmt international eine führende Position ein. Auch die Initiierung eines thermoelektrischen Demonstrationsprojekts konnte erfolgreich umgesetzt werden. Speziell interessant ist dabei, dass der Demonstrator die Möglichkeiten der Nutzung von Abwärme – wie sie zum Beispiel in Rechenzentren anfällt – verfolgt. Die Anwendungsmöglichkeiten des magnetokalorischen Effekts als zentrales Kühlgerät konnten noch nicht abschliessend dargelegt werden. Es ist aber geplant, diese Ergebnisse definitiv 2010 zur Verfügung zu haben. Im Bereich der *Hochtemperatursupraleitung (HTSL)* waren die kontaktierten Industriepartner aufgrund der aktuellen HTSL-Leiterpreise und Leiterqualitäten nach wie vor zurückhaltend. Immerhin gelang es, im Gespräch mit einer grossen Unternehmung mögliche Stossrichtungen zu diskutieren. Speziell wäre ein Projekt mit einem HTSL-Bahntransformator interessant, könnte damit doch die Steigerung des Wirkungsgrads von ca. 92 % auf über 99 % erreicht werden. Sehr positiv war ferner, dass nach mehrjähriger Pause und diversen erfolglosen Gesprächen mit der Industrie und Interessierten ein Projekt gestartet werden konnte, welches an die bisherigen Arbeiten im Bereich *Druckluftspeicherung* anknüpft und die Entwicklung eines lauffähigen Prototyps anvisiert.

Bei den **effizienten Anwendungen** ist es erfreulich, dass mehrere Industrieprojekte gestartet werden konnten, die eine substantielle *Effizienzsteigerung von Haushaltsgeräten* zur Zielsetzung haben. Speziell die untersuchte Vakuum-Isolationstechnik, die in diversen Geräten Verwendung finden kann, könnte zu einem eigentlichen Durchbruch führen, falls die erwarteten Ergebnisse bestätigt werden und die Gestehungskosten für die Marktumsetzung ebenfalls vernünftig gestaltet werden können. Sicher sind dazu aber noch weitere Arbeiten erforderlich, die 2010 fortzusetzen sind. Die IEA-Arbeiten des 4E-Programms haben sich ebenfalls positiv entwickelt und werden im Jahr 2010 weitergeführt. Die abgeschlossene Studie zum aktuellen Thema *Smart Metering* führte zu diversen positiven Reaktionen und stellt eine gute Basis sowohl für die Industrie als auch für den Bund dar. Die Unterzeichnung des länderübergreifenden *Memorandum of Understanding zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Erforschung und Entwicklung von IKT-basierten Energiesystemen der Zukunft* fordert

massive Initiativen auf der Forschungsseite und dürfte das vorliegende Programm nicht nur im kommenden Jahr, sondern auch in den kommenden Jahren merklich mitprägen. Sehr erfreulich ist auch, dass die SBB die Ergebnisse eines *effizienten Zugmanagements* in den kommenden Jahren umsetzen und damit einen wesentlichen Einspareffekt erzielen werden. Die Projektarbeiten zum Thema *LED* wurden von der Industrie positiv unterstützt und die erarbeiteten Grundlagen dürften richtungsweisend beim zukünftigen Einsatz der *LED-Technologie* sein. Entscheidend dabei ist, dass diese Erkenntnisse nun von der Industrie verwertet werden. Schliesslich war es positiv, dass nachgewiesen werden konnte, dass Energiesparlampen keine negativen Auswirkungen aufs Netz haben.

Liste der F+E-Projekte

[1] S. Lemofouet (sylvain.lemofouet@enairys.com), Enairys Powertec SA, Ecublens: Réalisation **d'un Prototype de Système de Stockage hydropneumatique d'Energie** (JB Projekt 103082)

[2] P. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari (peter.egolf@heig-vd.ch), HEIG-VD, Yverdon: **Zentrale magnetische Kühl- und Kältemaschinen und ihre Bewertung** (JB Projekt 102873)

[3] A. Weidenkaff (anke.weidenkaff@empa.ch), EMPA, Dübendorf: a) **Erstellen und Modellierung eines thermoelektrischen oxidischen Moduls (TOM) als Demonstrator** (JB Projekt 101356) ● b) **Layered Thermoelectric Converters (LTEC)** (JB Projekt 101356)

[4] 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 Projekt 101533)

[5] B. Aebischer (baebischer@ethz.ch), CEPE, ETH, Zürich: **Kompetenzzentrum Energie und Informationstechnik** (JB Projekt 30963) www.biblioite.ethz.ch

[6] A. Huser, (alois.huser@encontrol.ch), Encontrol GnbH, Niederrohrdorf: a) **Development of the Market for energy efficient Servers** (SB Projekt 101967) www.efficient-server.eu ● b) **Effizienzsteigerung im Haushalt durch Digitalstrom** (JB Projekt 102468) www.digitalstrom.org

[7] R. Kistler, M. Fercu, A. Egli (alexander.klapproth@hslu.ch), Hochschule Luzern, Technik + Architektur, Horw: a) **Vergleich verschiedener Effizienzlösungen mit Einzelverbrauchsmessungen für Haushalte** (SB Projekt 103316) ● b) **MEGA, Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformation** (JB Projekt 102668)

[8] R. Staub (richard.staub@bus-house.ch) BUS-HOUSE, Zürich: **Überblick internationaler Forschungsaktivitäten im Bereich Home Automation** (SB Projekt 103269)

[9] R. Dettli, D. Philippen, H. Schäffler (reto.dettli@econcept.ch), Econcept AG / ENCT GMBH, Zürich und Freiburg (D): **Smart Metering für die Schweiz – Potenziale, Erfolgsfaktoren und Massnahmen für die Steigerung der Energieeffizienz** (SB Projekt 102966)

[10] D. Gabioud (dominique.gabioud@hevs.ch), Institut Systèmes Industriels, HES-SO, Sion : **Smart Metering pour éco-cités** (JB Projekt 103376)

[11] U. Lindegger, R. Bettschen (urs.lindegger@ch.schindler.com), Inventio AG, Hergiswil: **Standby-Optimierung bestehender Aufzugsanlagen** (JB Projekt 103193)

[12] G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), Schnyder Ingenieure AG, Hünenberg: **Verluste von Frequenzumformern im Motorenbereich** (JB Projekt 103066)

[13] N. Häberle (norbert.haeberle@schaffner.com), Schaffner EMV AG, Luterbach: **Novel Low Harmonics 3-Phase Rectifier for efficient Motor Systems** (JB Projekt 103369)

[14] C. U. Brunner (cub@cub.ch), S.A.F.E., Zürich: **Sotea - Software-Tool zur Ermittlung des Effizienzpotenzials bei elektrischen Antrieben** (SB Projekt 102545)

[15] B. Kobel, Y. Roth (yann.roth@rysering.ch), Ryser Ingenieure AG, Bern: **Analyse und Vorgehen zur energetischen Optimierung von Pumpen bei Wasserversorgungsanlagen** (JB Projekt 102686)

[16] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), Circle Motor AG, Gümligen: **Effizienzsteigerung eines hocheffizienten IEC-3kW-Permanentmagnetmotors inklusiv energetischer Messung als Pumpenanwendung** (SB Projekt 100915)

[17] F. Jenni (felix.jenni@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Windisch: **Effizienter Betrieb von Asynchronmotoren** (JB Projekt 103210)

[18] S. Stahl (stefan.stahl@awtec.ch), AWTEC AG für Technologie und Innovation, Zürich: **Modifizierter A++-Standard-Kühlschrank mit halbem Energieverbrauch** (JB Projekt 102923)

[19] H. Tischhauser (hans.tischhauser@helbling.ch), Helbling Technik AG, Wil: **Hocheffiziente Isolation für Haushaltsgeräte** (JB Projekt 103290)

[20] M. Koebel (matthias.koebel@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Energieverbrauchsminimierung von Kühlschränken durch thermische Optimierung** (SB Projekt 102855)

[21] A. Burri (adrian.burri@awtec.ch), AWTEC AG für Technologie und Innovation, Zürich: **Messreihe Kleinkühlschränke** (Merkblatt Projekt 102672)

[22] J. Nipkow (juerg.nipkow@arena-energie.ch), Arena, Zürich: **Elektroheizungen – Massnahmen und Vorgehensoptionen zur Reduktion des Stromverbrauchs** (SB Projekt 102648)

[23] E. Bush (eric.bush@bush-energie.ch), Bush Energie GmbH, Felsberg; **Fernsteuerungen für Raumheizungen** (JB Projekt 103392)

[24] P. Mauchle, (peter.mauchle@sing.ch), Schnyder Ingenieure AG, Hünenberg: **Rotierende USV-Anlagen und dynamische Energiespeicherung** (SB Projekt 102828)

[25] G. Dürrenberger (gregor@mobile-research.ethz.ch), ETH, Zürich und G. Klaus (klaus@maxwave.ch), Maxwave AG, Zürich: **Netzrückwirkungen von Energiesparlampen** (SB Projekt 102644)

[26] S. Gasser (stefan.gasser@eteam.ch) eTeam, Zürich: **Qualitätsmerkmale der LED-Beleuchtung** (SB Projekt 102901)

[27] M. Meyer, S. Menth (markus.meyer@emkamatik.com), Emkamatic GmbH, Wettingen: **Verifizierung der Stromeinsparung durch energieeffizientes Zugsmanagement** (SB Projekt 102645)

Liste der Umsetzungsprojekte / P+D-Projekte

[28] K. Fröhlich, A. Bitsch, (froehlich@eeh.ee.ethz.ch), ETH Zürich: **Realisierung eines thermoelektrischen Generators für die Stromerzeugung aus Niedertemperatur** (JB Projekt 103274)

[29] R. Brüniger (roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch) R. Brüeniger AG, Ottenbach: **IEA-EXCO-Vertretung des Implementing Agreements 4E** (JB Projekt 102435)

[30] C. U. Brunner (cub@cub.ch), A+B International, Zürich: **Motor Systems Annex for 4E** (JB Projekt 102221)

[31] J. Lindegger (info@circlemotor.ch), Circle Motor AG, Gümligen: **Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanentmagnet-Motoren** (SB Projekt 101347)

[32] S. Stahl (stefan.stahl@awtec.ch), AWTEC AG für Technologie und Innovation, Zürich: **Wärmerückgewinnung in USV-Anlagen** (SB Projekt 103016)

Referenzen

[33] **Elektrizitätsverbrauch und Einsparpotential bei Aufzügen (Nov. 2005)** http://www.bfe.admin.ch/forschungelektrizitaet

[34] **Verein Deutscher Ingenieure (Energielabel für Aufzüge VDI 4707)** http://www.vdi.de

[35] **Internetseite von EnergieSchweiz und dem BFE** www.energie-schweiz.ch

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

[37] **Internetseite für IEE-Projekt *Development of the Market for Energy Efficient Servers*** www.efficient-server.eu

[38] **Internetseite für IEE-Projekt *Selina*** www.selina-project.eu

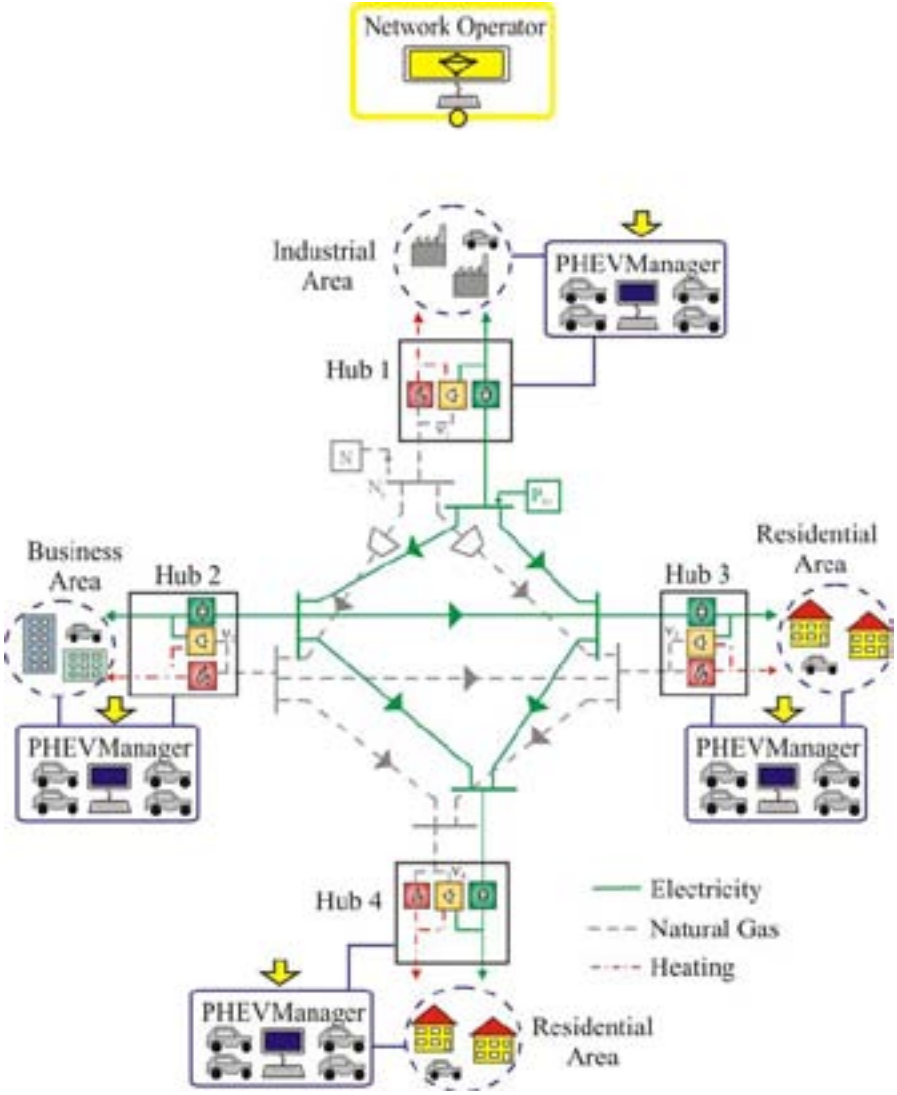
[39] **Internetseite des Forschungsprogramms** www.electricity-research.ch. Download von Zusammenfassungen, Jahres- und Schlussberichten durchgeführter Forschungsarbeiten

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Netze

Michael Moser

michael.moser@bfe.admin.ch



Vision of Future Energy Networks (VoFEN)

Die Integration der Elektromobilität in ein Multienergieträgernetz erweitert die Möglichkeiten zur Energiespeicherung und zur Bewirtschaftung der *Energy Hubs* wesentlich (Quelle: ETHZ).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Elektrizität ist das Rückgrat von Wirtschaft und Gesellschaft. Steigende Nachfrage, die Rohstoffverknappung und der Klimawandel stellen das Energiesystem vor grosse Herausforderungen. Sie verlangen neue Weichenstellungen. Beschleunigt müssen neue Lösungen gefunden werden, die den Anforderungen des Wandels zu liberalisierten Märkten und dezentralen Erzeugungsstrukturen sowie zu volatilen erneuerbaren Energien und der Elektromobilität Rechnung tragen und ausserdem ein Höchstmass an Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit sicherstellen.

Das Forschungsprogramm *Netze* [14] gliedert sich in die drei Hauptbereiche **Elektrizitätsnetze**, **gekoppelte Energienetze** sowie **Technologien**, ergänzt durch **internationale Aktivitäten**.

Im Bereich **Elektrizitätsnetze** bestand die Zielsetzung für das Jahr 2009 darin, verschiedene Grundlagen und Konzepte für die erfolgreiche Systemintegration dezentraler Erzeugungsanlagen (z.B. Anschlussbedingungen, Prognose, Betrieb) und Speichertechnologien (z.B. im Zusammenhang mit der Elektromobilität) zu erarbeiten, zu evaluieren und in der Praxis anzuwenden.

Der Bereich **gekoppelte Netze** oder **Multienergieträgernetze** umfasste auch 2009 die Weiterentwicklung von entsprechenden Konzepten und langfristigen Überführungsstrategien, deren Anwendbarkeit in zwei konkreten Fallstudien getestet wurde. Ausserdem konnte der Einfluss der Elektromobilität auf die Netze und die Energieträger untersucht werden.

Die Entwicklung einer Netz-stabilisierenden intelligenten Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge konnte im Bereich **Technologie** initiiert, aber noch nicht gestartet werden.

Die **internationalen Aktivitäten** haben die drei Schwerpunkte massgeblich ergänzt und die Koordination der Forschungsaktivitäten, v.a. im Bereich der intelligenten Netze – der «Smart Grids» – wesentlich vorangetrieben.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

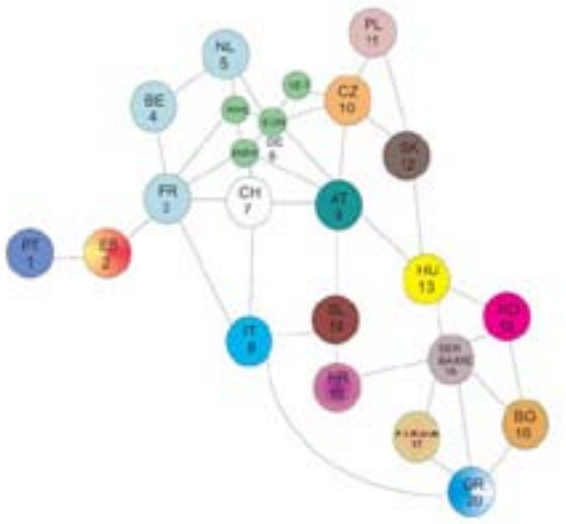
Elektrizitätsnetze

Im Rahmen des Projekts *Interaktion von Kommunikations- und Stromnetz der Schweiz bei grossflächigen Schadensereignissen* [1] wurde unter Anwendung probabilistischer Methoden die Analyse der Sicherheit und Verletzbarkeit des Übertragungsnetzes der Schweiz in Wechselwirkung mit dem Telekommunikationsnetz beim Auftreten grossräumiger Schadensereignisse wie Sturm und Erdbeben fortgesetzt. Die Modelle zur Beschreibung der Gefährdung durch Erdbeben konnten weitgehend fertig gestellt werden; Gefährdungsmodelle und Versagensfunktionen für Sturm befinden sich dagegen noch im Aufbau. Damit konnten die Erdbebenrisiken für das schweizerische Übertragungsnetz sowie für ein modelliertes Telekommunikationsnetz abgeschätzt werden. Für die Zusammenführung der Einzelbetrachtungen zu einer Gesamtanalyse steht das Modell der Wechselwirkung der beiden Typen von Infrastrukturnetzen noch aus.

Das Projekt *Towards Future Electricity Networks* [2] ist 2009 in die zweite Phase gestartet. Aufgrund öffentlich verfügbarer Daten konnte das europäische Verbundnetz vereinfacht modelliert (Fig. 1) und der zuvor entwickelte «Sustainability Based Optimal Power Flow» (SOPF)-Algorithmus erfolgreich implementiert werden; weitere Verfeinerungen folgen 2010. Es wurden anschliessend verschiedene Szenarien der Internalisierung externer Kosten von Produktionsanlagen und deren Auswirkungen auf die Ableitung von Investitionsplänen untersucht und bewertet. Die Zusammenarbeit mit der «Chalmers University of Technology» konnte zudem zielführend weiterentwickelt werden.

Das bereits im Vorjahr erarbeitete *VPS White Book* wurde im Projekt *AlpEnergy – Virtual Power System (VPS) as an Instrument to Promote Transnational Cooperation and Sustainable Energy Supply in the Alpine Space* [3] weiterentwickelt. Die Rolle von VPS im Energiesystem und insbesondere im Rahmen von Smart Grids wurde beschrieben. Ausserdem wurde für die Pilotumsetzung ein VPS,

bestehend aus Überwachungs- und Kontrollstruktur, Kommunikationsprotokollen und Leitsystem definiert.

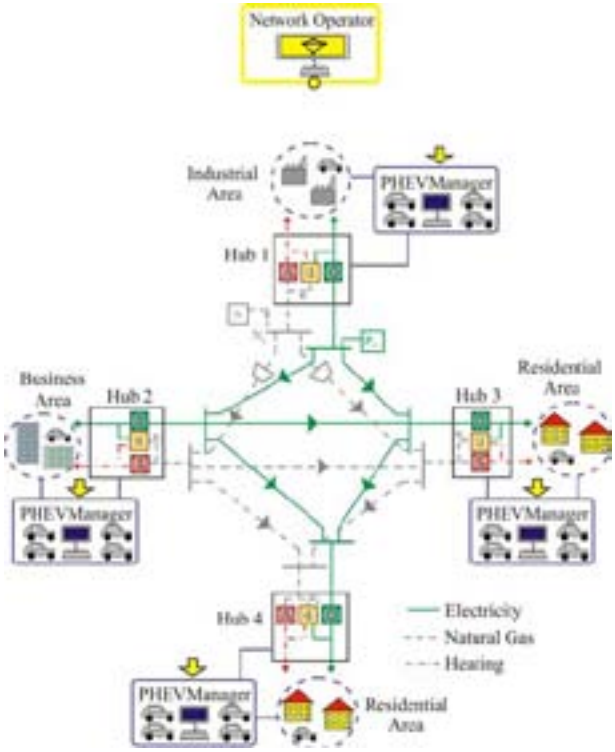


Figur 1: Vereinfachtes europäisches Verbundnetzmodell (Quelle: ETHZ).

Eine umfassende Analyse von Last- und Klimadaten hat im Projekt *ELBE-Prognosekompetenz* [4] die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Netzlast identifizieren und quantifizieren lassen. Um wirtschaftliche und klimatische Besonderheiten besser zu identifizieren zu können, wurden regionalen Daten eines grösseren Verteilnetzgebietes um lokale Daten erweitert. Die starke Korrelation zwischen Temperatur und Elektrizitätsnachfrage und wirtschaftlicher Aktivität wurde empirisch nachgewiesen; der Einfluss weiterer Einflussfaktoren erschien demgegenüber nur schwach. Auf dieser Datengrundlage wurden zwei einfach anzuwendende Verfahren zur Prognose der Tagesnetzlast entwickelt (Transferfunktion, neuronales Netz), deren hohe Prognosegüte in der anschliessenden Testphase verifiziert werden konnte.

Gekoppelte Netze

Das Projekt *Vision of Future Energy Networks (VoFEN)* [5] beschäftigt sich weiterhin mit dem Entwurf, der Modellierung und der Analyse zukünftiger Infrastrukturen zur Energieübertragung und -verteilung in derzeit sechs Arbeitspakten. Bearbeitet werden Fragen hinsichtlich Risikomanagement und Investitionsstrategien für nachhaltige Energiesysteme, dezentraler Regelung in Verteilnetzen, optimalem Netzdesign als auch der Netzintegration von Plug-In-Hybrids (Fig. 2). Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis möglicher zukünftiger Energienetze zu erarbeiten, wobei der Fokus nicht nur auf der Elektrizität liegt. Zentral für das Projekt sind zwei Fallstudien zur praktischen Verifizierung der theoretischen Ansätze in Anwendung auf die Energienetze in Baden-Dättwil und Bern. Im Jahr 2009 sind weitere Forschungsbeiträge aus dem Projekt auf wichtigen internationalen Konferenzen präsentiert worden und sind auch direkt in verschiedene CIGRE-Arbeitsgruppen [15] eingeflossen. Das Projekt stellt zudem eine wichtige Basis für thematisch verwandte Forschung am Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik der ETH Zürich dar, wie z.B. das aus FP7 [16] finanzierte Projekt *Infrastructure Roadmap for Energy Networks in Europe (IRENE-40)*. 2010 sollen drei Arbeitspakete abgeschlossen werden und es ist geplant, in Zusammenarbeit mit den Hauptprojektträgern weiterführende Forschungsziele zu definieren.



Figur 2: Multienergieträgernetz unter Einbezug von Plug-In-Hybrids (Quelle: ETHZ).

Im Projekt *Auswirkung der Markteinführung von Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybrids auf die Energieträger und das Elektrizitätsnetz* [6] wurden die für den Erfolg von Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybrids wesentlichen energetischen Auswirkungen des Vehicle-to-Grid-Konzepts (V2G) analysiert und bewertet. Je nach Herkunftsart der eingesetz-

ten Elektrizität können Elektrofahrzeuge verglichen mit rein fossil betriebenen Fahrzeugen in Bezug auf den Energiebedarf und die CO_2-Emissionen Vorteile oder Nachteile aufweisen. Stammt die eingesetzte Elektrizität aus erneuerbaren Energien, so ergeben sich auf allen Ebenen sehr grosse Vorteile. Mit Strom aus Kernkraftwerken können zwar die CO_2-Emissionen stark reduziert werden, aber es ergeben sich deutliche Nachteile bezüglich Primärenergie. Während sich bei der fossilen Stromerzeugung aus GuD-Anlagen (Gas- und Dampfanlagen) nur geringe Unterschiede gegenüber konventionellen Fahrzeugen ergeben, sieht die Bilanz für Kohle- oder Ölkraftwerke global gesehen negativ aus. Ob ein verstärkter Einsatz von Plug-In-Hybrids und reinen Elektrofahrzeugen aus energie- und klimapolitischer Sicht forciert werden soll und entsprechend förderungswürdig ist, hängt entscheidend von der Herkunft des Stromes bzw. der Produktionsart ab. Während durch die Einführung von Elektrofahrzeugen der Elektrizitätsbedarf etwas steigt (3 % bei Ersatz eines Viertels der Flotte), sinkt der Benzinbedarf massiv (25 %).

Nationale Zusammenarbeit

In Zusammenarbeit mit Electrosuisse und dem *SmartGrids ERA-Net* [17] wurde am 15. September 2009 in Bern das *2. Schweizer Energietechnikforum* [18] zum Thema «Smart Grids – Vision oder Netztechnologie der Zukunft?» organisiert. Es wurde ein breiter Überblick über die Schweizer Aktivitäten auf dem Gebiet vermittelt sowie anhand ausgewählter Präsentationen aus den am *SmartGrids ERA-Net* teilnehmenden Ländern der internationale Bezug hergestellt. Die erfreulich grosse Teilnehmerzahl widerspiegelt das steigende Bewusstsein der Branche, dass eine nachhaltige Energieversorgung wichtige Veränderungen in der (Netz-)Infrastruktur mit sich bringt.

In zwei weiteren Workshops der *Interessensgemeinschaft Vehicle-to-Grid (V2G)* [7] (ehemals *Trendwatching Group Smart Grid / Plug-In-Fahrzeuge*) konnten wesentliche Aspekte einer Implementierungsstrategie, unter aktiver Mitwirkung zahlreicher Vertreter von Energieversorgern, Behörden, NGOs, Investoren, Dienstleistern und Forschungsinstitutionen, erarbeitet werden.

Im Zusammenhang mit dem Elektrizitätsmarktliberalisierung und der wachsenden Zahl dezentraler Erzeugungsanlagen und Speichersystemen stellen sich künftig viele Fragen nicht nur rein technischer sondern auch ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Natur. Das Bundesamt für Energie und die ETH Zürich haben sich deshalb über die Schaffung eines «Kompetenzzentrums Energienetze» verständigt, das – finanziell mitgetragen durch Bund, EVU, Industriefirmen und Verbänden – für die Branche und die breite Bevölkerung unabhängige Kommentare und Antworten zu den wichtigsten interdisziplinären Fragestellungen im Bereich der elektrischen Netze erarbeiten wird. Ein inhaltliches und organisatorisches Konzept wurde unter Einbezug der interessierten Stakeholder erarbeitet, so dass die Gründung des Zentrums zu Beginn des Jahres 2010 stattfinden kann.

Im Rahmen verschiedener Veranstaltungen und zahlreicher direkter Kontakte und Besuche wurde das Forschungsprogramm *Netze* vorgestellt und versucht, die verschiedenen Forschungsinstitutionen weiter zu vernetzen, z.B. im Rahmen des anlaufenden Pilotprojekts *Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze (VEiN)* (siehe unten) oder im Rahmen der von *Swisselectric Research* und dem *Competence Center for Energy and Mobility (CCEM)* durchgeführten Ausschreibung zum Thema *Pathways Towards the Electrification of Individual Transportation*.

Internationale Zusammenarbeit

Die langjährigen Aktivitäten der Schweiz im Rahmen des IEA Implementing Agreements *Electricity Networks, Analysis, Research and Development (Enard)* [8,19] wurden weitergeführt. Im Rahmen von zwei Workshops innerhalb des Annex I *Information Collation and Dissemination* wurde auf die Themen *Communications & Control* sowie *Balancing the Variability in Renewable Electricity Supp-*

lies vertieft eingegangen. Trotz breiter internationaler Beteiligung konnten – einmal mehr – leider keine Schweizer Akteure zur Teilnahme gewonnen werden. Um einen Überblick über die aktuellen technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen zur Integration dezentraler Erzeugungsanlagen zu erhalten, wurde im Annex II *Distributed Generation – System Integration in Distribution Networks* [9] eine entsprechende europaweite Analyse gestartet, die 2010 ausgewertet wird und die Formulierung von Handlungsoptionen erlaubt. Zur Erarbeitung einer langfristigen Vision für die Entwicklung der Übertragungsnetze hat Annex IV *Transmission Systems* [10] die Arbeit mit Fokus auf Netzausbau und -erneuerung, Integration erneuerbarer Energien und Ausfallsicherheit aufgenommen.

Die Europäische Technologie Plattform *ETP SmartGrids* [11, 20] wurde in der Berichtsperiode umstrukturiert. Insbesondere wurde der *Advisory Council* abgelöst und nicht aktive Arbeitsgruppen aufgelöst, wobei das im Vorjahr präsentierte *Strategic Deployment Document (SDD)* nach wie vor fertig gestellt werden soll. Die neue Technologieplattform hat sich zum Ziel gesetzt, die anstehenden europäischen Prozesse des Strukturwandels hin zu intelligenten Energiesystemen zu koordinieren und die Schnittstellen zu den verschiedenen Akteuren sicherzustellen. Deren Rolle innerhalb des SET-Plans und in Bezug auf die neu formierte *European Electricity Grid Initiative (EEGI)* resp. die nachfolgende *European Industrial Initiative (EII) Grids* bleibt abzuwarten.

Das *SmartGrids ERA-Net* [17] konnte aufgrund der 2009 erhobenen Informationen über das Forschungsumfeld in den verschiedenen Partnerländern im Rahmen von vier Workshops und des *2. Schweizer Energietechnikforums* (siehe oben) eine erste gemeinsame Ausschreibung für angewandte Forschungsprojekte im Bereich der Smart Grids formulieren. Die Ausschreibung wird unter Teilnahme von 11 Forschungsförderungseinrichtungen zu Beginn des Jahres 2010 mit dem Ziel lanciert, Projekte – jeweils mit einer Beteiligung aus mindestens drei Teilnahmestaaten und in einem zweistufigen Prozess evaluiert – im Herbst 2010 zu starten. In Ergänzung zu den Arbeiten des ERA-Nets wurde im Projekt *Analyse des Forschungsumfelds «Smart Grids» in der Schweiz und in Europa* [12] damit begonnen, die Grundlagen für eine systematische Erfassung und Aufbereitung der entsprechenden europäischen Forschungsaktivitäten zu erfassen und zu verbreiten.

Aufgrund der Tatsache, dass Deutschland bei den oben genannten internationalen Aktivitäten bisher nicht beteiligt ist, wurde im Nachgang zur *Smart Grids Week 2009 Salzburg* die Intensivierung der trilateralen Zusammenarbeit D-A-CH beschlossen. In der Folge entstand das *Memorandum of Understanding zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Erforschung und Entwicklung von IKT-basierten Energiesystemen der Zukunft in Deutschland, Österreich und der Schweiz*, das u.a. die Koordination der Forschungsförderung, den Wissens- und Informationsaustausch sowie die gemeinsame Bearbeitung wichtiger Querschnittsfragen ermöglicht. Im Beisein einer Reihe Schweizer Akteure wurde das *Memorandum of Understanding* am 27. November 2009 anlässlich des *E-Energy Jahreskongresses 2009* [21] von hochrangigen Vertretern der drei Länder feierlich unterzeichnet (Fig. 3). Die Umsetzung des Abkommens wird 2010 zügig in Angriff genommen werden.

Figur 3: Christian Blickenstorfer (Schweizer Botschafter in Deutschland), Hans-Joachim Otto (Staatssekretär, BMWi), Ingolf Schädler (Sektionsleiter-Stv., bmvit) nach der Unterzeichnung des MoU (Quelle: BMWi).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Zur Klärung der Auswirkungen vermehrter verteilter Einspeisungen auf den Netzbetrieb im Normal- und im Störfall, der Planung und Dimensionierung der Netzanlagen sowie zur Identifizierung allfällig notwendiger Anpassungen in den Normen wurden in der Vergangenheit die Grundlagen für ein entsprechendes Pilotprojekt *Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze (VEiN)* [13] erarbeitet. Die Akquisition der Finanzen konnte erfolgreich abgeschlossen und die Projektorganisation aufgebaut werden, so dass die vorgesehenen Erzeugungsanlagen 2010 im Rahmen eines Contractings gebaut und ins Verteilnetz integriert werden können. Durch die ebenfalls aufgebaute wissenschaftliche Begleitung werden die Erreichung der wissenschaftlichen Ziele sowie die Integration von Drittprojekten in die Pilotumgebung in Rheinfelden sichergestellt sein.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Projekte und Aktivitäten im Forschungsprogramm *Netze* haben auch im Jahr 2009 dazu beigetragen, verschiedene Konzepte für Energiesysteme der Zukunft weiter voranzutreiben und entsprechende Kompetenzen in der Schweiz aufzubauen.

Durch die Einführung der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) zur Förderung dezentraler erneuerbarer Energieträger beginnt sich nun die Erzeugungssituation auch in der Praxis zu verändern, was bereits heute zum Teil schwerwiegende Auswirkungen auf die Verteilnetze hat. Dies veranlasst das Forschungsprogramm *Netze*, vermehrt auch kurz- und mittelfristige Problemstellungen mit direktem Praxisbezug zu betrachten. Entsprechende Forschungsaktivitäten in direktem Bezug zu Pilot- und Demonstrationsprojekten wurden deshalb 2009 initiiert und zum Teil schon gestartet. Damit wird künftig auch der Programmschwerpunkt Technologie gestärkt.

Die Komplexität der Thematik erfordert im Grunde die Realisierung grösserer Pilot- oder Modellregionen, in denen verschiedenste Problemstellungen der dezentralen Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Verwendung elektrischer Energie untersucht und entsprechende Lösungsansätze entwickelt und demonstriert werden können. Aufgrund der knappen finanziellen Mittel des Forschungsprogramms können derzeit nur Teilaspekte im Rahmen von kleineren Projekten betrachtet werden, was der Entwicklung und Verbreitung gesamtheitlicher Konzepte für Smart Grids nicht förderlich ist. Es ist deshalb umso wichtiger, die internationalen Beziehungen, zum Beispiel im Rahmen der 2009 geschlossenen D-A-CH-Kollaboration, weiter auszubauen, um den Wissens- und Erkenntnistransfer von und zu relevanten Akteuren sicherzustellen und die Effizienz der Forschung zu steigern. Eine internationale Ausschreibung im Rahmen des *SmartGrids ERA-Nets* soll ausserdem konkrete länderübergreifende Projekte fördern.

Der Aufbau und die Förderung dringend benötigter Forschungsressourcen und -kompetenzen gestalten sich aus verschiedenen Gründen weiterhin sehr schwierig. Durch die Schaffung des Kompetenzzentrums Energienetze soll nun 2010 ein wichtiger Beitrag dazu geleistet werden.

Liste der F+E-Projekte

[1] M. Raschke (raschke@mavt.ethz.ch), ETH Zürich: **Interaktion von Kommunikations- und Stromnetz der Schweiz bei grossflächigen Schadensereignissen** (JB Projekt 102556)

[2] A. Papaemmanouil (papaemmanouil@eeh.ee.ethz.ch), G. Andersson, ETH Zürich: **Towards Future Electricity Networks, Phase 2** (JB Projekt 102292)

[3] S. Lukovic (lukovics@alari.ch), M. Mura, Università della Svizzera italiana: **AlpEnergy – Virtual Power System (VPS) as an Instrument to Promote Transnational Cooperation and Sustainable Energy Supply in the Alpine Space** (JB Projekt 102848)

[4] P. Kronig (patrick.kronig@bkw-fmb.ch), M. Höckel, Berner Fachhochschule; U. Wälchli, S. Zürcher, BKW FMB Energie AG: **ELBE – Validierung und Verbesserung von Lastprognosen** (SB Projekt 102771)

[5] K. Fröhlich (froehlich@eeh.ee.ethz.ch), G. Andersson, ETH Zürich: **Vision of Future Energy Networks, Phase 2** (JB Projekt 100669)

[6] R. Rigassi (reto.rigassi@enco-ag.ch), P. Strub, S. Huber, ENCO Energie-Consulting AG: **Auswirkungen der Markteinführung von Elektrofahrzeugen und Plug-In-Hybrids auf die Energieträger und das Elektrizitätsnetz** (SB Projekt 102774)

[7] R. Horbaty (robert.horbaty@enco-ag.ch), P. Strub, ENCO Energie-Consulting AG: **Trendwatching Group Smart Grid / Plug-In-Fahrzeuge** (JB Projekt 103037)

[8] R. Bacher (rainer.bacher@bacherenergie.ch), Bacher Energie AG: **Implementing Agreement of the International Energy Agency (IEA): Electricity Networks Analysis Research & Development (Enard Annex I)** (SB Projekt 102474)

[9] W. Rohr, R. Bacher (rainer.bacher@bacherenergie.ch), Bacher Energie AG: **Integration Distributed Generation - System Integration in Distribution Networks (IEA IA ENARD Annex II)** (JB Projekt 102832)

[10] C. Duthaler (christof.duthaler@swissgrid.ch), Swissgrid AG: **IEA ENARD Annex IV: Transmission Systems** (JB Projekt 103026)

[11] R. Bacher (rainer.bacher@bacherenergie.ch), Bacher Energie AG: **Europäische Technologieplattform (ETP) SmartGrids** (SB Projekt 102474)

[12] W. Rohr (willi.rohr@bacherenergie.ch), R. Bacher (rainer.bacher@bacherenergie.ch), Bacher Energie AG: **Analyse des Forschungsumfelds «Smart Grids» in der Schweiz und in Europa** (JB Projekt 103167)

Liste der P+D-Projekte

[13] G. Schnyder (gilbert.schnyder@sing.ch), Schnyder Ingenieure AG: **Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze (VEiN)** (JB Projekt 102875)

Referenzen

[14] BFE-Forschungsprogramm *Netze*: www.bfe.admin.ch/forschung/netze/

[15] International Council on Large Electric Systems (CIGRE): www.cigre.org/

[16] 7. EU-Rahmenforschungsprogramm FP7: http://cordis.europa.eu/fp7/

[17] SmartGrids ERA-Net: www.eranet-smartgrids.eu/

[18] 2. Schweizer Energietechnikforum 2009: www.electrosuisse.ch/g3.cms/s_page/89280

[19] IEA Implementing Agreement Enard: www.iea-enard.org/

[20] Europäische Technologieplattform (ETP) SmartGrids: www.smartgrids.eu/

[21] E-Energy Jahreskongress 2009: www.e-energy.de/de/jahreskongress.php

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte

Thomas Kopp

thomas.kopp@hsr.ch

Funktionsmuster der inversen Gasturbine Aactor im Labortest

Die inverse Gasturbine Aactor !GT kann Schwachgas oder Solarwärme in Elektrizität umwandeln. Das Ökozentrum Langenbruck entwickelt eine Anlage mit einer elektrischen Leistung von 9 kW. Die Verbrennung oder Wärmezufuhr erfolgt bei Umgebungsdruck.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte fördert gemäss dem *Energieforschungskonzept des Bundes* [21] und dem dazu gehörenden *Detailkonzept* [22] die Entwicklung von modernen Heiz- und Kühlsystemen. Eine kurzfristige Reduktion des CO_2-Ausstosses um 50 % im Bereich Gebäudeheizung ist möglich, indem der von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen produzierte Strom in Wärmepumpen eingesetzt wird, die dann in den Gebäuden Niedertemperaturheizwärme erzeugen. Mittelfristig soll keine fossile Energie mehr für Heizzwecke eingesetzt werden. Heute wird im Sektor Haushalte gemäss der schweizerischen Gesamtenergiestatistik 2008 [23] immer noch 62 % fossile Energie eingesetzt, die vor allem für Heizzwecke dient. Erst 13 % des Energieverbrauches der Haushalte stammt aus erneuerbarer Energie. In der Kälteerzeugung und -anwendung sind heute schon Energieeinsparungen von 25 % möglich [24]. Diese Ziele können über eine **verbesserte Effizienz der Komponenten und eine optimierte Systemintegration** erreicht werden. Kostenreduktionen sind Voraussetzung um eine rasche Marktpenetration zu erreichen. Diese können durch Standardisierung der Systeme erreicht werden.

Die Forschungsschwerpunkte 2008 – 2011 des Programmes sind:

- Verbesserung der Komponenten und der thermodynamischen Kreisprozesse bei Wärmepumpen und bei Kälteanlagen;
- Effizienzverbesserungen bei WKK-Anlagen und Reduktion der Schadstoffemissionen;
- Ganzheitliche Systemoptimierung von Wärmepumpen – WKK – Kälte – Speicherung;
- Hoch effiziente Systeme für die Warmwasseraufbereitung;
- Miniaturisierung und neue Wege für den Einbau von Heiz- und Kühlsystemen mit Wärmepumpen (plug and play);
- Umweltverträgliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen und Kältemaschinen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Wärmepumpen

Verbesserung der Komponenten und der thermodynamischen Kreisprozesse bei Wärmepumpen und Kältemaschinen

Wärmepumpen werden stetig verbessert. Die vom Wärmepumpentestzentrum WPZ in Buchs gemessenen Werte zeigen heute COP-Werte (COP = Coefficient of Performance) von durchschnittlich 3,5 für Luft/Wasser-Wärmepumpen bei A2/W35 und von 4,5 für Sole/Wasser-Wärmepumpen bei B0/W35 [25]. Die COP-Werte sind aus physikalischen Gründen abhängig von den Temperaturen der Wärmequelle und der geforderten Heiztemperatur (Wärmesenke). Der bestmöglich erreichbare Wert für den COP kann theoretisch aus den beiden Temperaturen der Wärmezufuhr und der Wärmeabfuhr berechnet werden, er wird auch als COP_{Carnot} bezeichnet.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{Wärmeabgabe}[°K]}{T_{Wärmeabgabe}[°K] - T_{Wärmequelle}[°K]}$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass zwischen den externen Stellen im Heizungssystem und der Wärmepumpe (Kondensator), und zwischen der Wärmequelle und der Wärmepumpe (Verdampfer) keine Temperaturdifferenzen bestehen. Theoretisch hätte also eine Wärmepumpe, die eine Raumtemperatur von 20 °C produziert und dafür Umgebungsluft von 0 °C verwendet, eine Leistungszahl von COP_{Carnot} = 14,65. Vergleicht man nun aber die gemessenen COP von realen Wärmepumpen muss leider ein deutlich tieferer Wert konstatiert werden. Das Verhältnis von gemessenem COP_{real} und theoretischem COP_{Carnot} wird Gütegrad ζ genannt.

$$\zeta = \frac{COP_{real}}{COP_{Carnot}}$$

Heutige Wärmepumpen weisen Gütegrade im Bereich zwischen 0,45 und 0,6 auf; es ist also noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial vorhanden. Hier muss aber betont werden, dass die Wärmepumpe immer in einem Gesamtsystem inte-

griert ist: Es ist das Gesamtsystem, das optimiert werden muss, und nicht nur die Wärmepumpe selbst.

Figur 1: Prüfstand und Wärmepumpen-Prototyp im Labor der HSLU T&A [1]

Zur Verbesserung der Leistungswerte der Wärmepumpe wurden vom BFE im Berichtsjahr drei Projekte unterstützt. Das Projekt *Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung* [1] setzt die Erkenntnisse der abgeschlossenen Projekte *Loref* [26, 27] und *Wexa* [28] nun in eine konkrete Wärmepumpe um. Dabei werden sowohl der Kompressor als auch der Ventilator für die Aussenluftzirkulation mit einer Drehzahl variierenden Frequenzregelung ausgeführt und in einem Prüfstand (Fig. 1) getestet. Damit kann die Wärmepumpe immer gerade soviel Heizleistung erzeugen, wie das Gebäude gemäss seiner Heizkurve benötigt. Die Wärmepumpe produziert also keine momentan zu grossen Wärmeströme, die in den Wärmetauschern die notwendige Temperaturdifferenz erhöhen und dadurch zu kleineren Leistungszahlen führen. Die erwartete Verbesserung der Leistungszahlen liegt bei einer Quellentemperatur von 0 °C im Bereich von 33 %, bei höheren Temperaturen sogar noch höher. Auch die Industrie arbeitet in der Richtung von leistungsvariierenden Systemen, es werden allerdings zum Teil auch nicht-optimale Systeme vorgeschlagen. Die geplanten Versuchsergebnisse sollen mit schon im Markt befindlichen Produkten verglichen werden und diesen ihr weiteres Verbesserungspotenzial aufzeigen. Im Projektumfang sollen auch die bisher erarbeiteten Kenntnisse zur Abtauregelung in der Versuchsanlage umgesetzt und ausgemessen werden.

Im Projekt *Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 3 und 4* [2] soll die Leistungsminderung von taktenden Wärmepumpen im EIN/AUS-Betrieb gegenüber stetig betriebenen Wärmepumpen erhärtet werden. Damit können auch die Prüfstandmessungen im Vollbetrieb und die Ergebnisse aus Feldtests besser verglichen werden. Bisherige Vergleiche berichten von Leistungseinbussen bis 30 % beim taktenden Betrieb. Das Projektteam erarbeitet ein Wärmepumpen-Simulationsprogramm, das aus den vier Teilgebieten Kompressor, Kondensator, Verdampfer und Expansionsventil besteht und alle wesentlichen dynamischen Einflüsse integriert. Das Modell wird an den beiden Typen Luft/Wasser-Wärmepumpe und Sole/Wasser-Wärmepumpe angewendet und kann später auch zur Optimierung von Einzelteilen der Wärmepumpe verwendet werden.

Wärmepumpen können durch mechanische oder elektrische Energie angetrieben werden. Beide Formen sind hochwertig. Eine andere Antriebsstrategie besteht darin, thermische Energie als Antrieb zu nutzen, um mit einer kleineren Menge von Wärme von hoher Temperatur einen grösseren Betrag an Nutzwärme zu erzeugen. Dieses Prinzip wird in den Absorptions-Wärmepumpen oder den Diffusions-Absorptions-Wärmepumpen (DAWP) angewendet. Im Projekt *Pompe à chaleur thermique à double cycle de rankine* [3] wird Antriebswärme in einem mittleren Temperaturbereich eingesetzt, die aus erneuerbaren Energiequellen oder aus Abwärme stammen könnte. Diese Antriebswärme wird in einem ORC-Kreislauf (Organic Rankine Cycle) mithilfe einer Turbine (Fig. 2) in Antriebsenergie umgesetzt, die ihrerseits in einem zweiten ORC-Kreislauf mit einem Turbokompressor die Quellenwärme auf das nutzbare Temperaturniveau anhebt. Erste Berechnungen zeigen, dass mit diesem zweistufigen Rankine-Zyklus ein Gesamtwirkungsgrad von grösser als 1,6 möglich wird. Die Berechnungen werden mit Messungen an einem Teststand mit etwa 20 kW Heizleistung verglichen, wo mit dem Arbeitsmedium R-134a eine gasgelagerte Turbinen-Verdichterwelle mit Drehzahlen bis zu 250'000 rpm gefahren wird. Die Auslegung aller

Komponenten wurde mit speziellen Software-Paketen unterstützt.

Figur 2: Bestandteile der Kompressor–Turbinen-Einheit mit maximaler Drehzahl von 250'000 rpm, EPFL-LENI [3]

Ganzheitliche Systemoptimierung von Wärmepumpen–WKK–Kälte-Speicherung

Dieser Abschnitt beleuchtet Projekte, die nicht nur den Aspekt Wärmepumpe, sondern ein grösseres System umfassen. Beim Betrieb von Wärmepumpen oder Kältemaschinen müssen immer auch die Wärmequelle und die Wärmesenke mitbetrachtet werden. Im Gebäudesektor muss im Winter Wärme zugeführt, im Sommer jedoch mit dem Kühlbedarf Wärme abgeführt werden. Damit könnte natürlich der Einsatz von Energiespeichern diskutiert werden. Die Saisonspeicher würden im Sommer Wärme einspeichern und im Winter aus dem Speicher den Heizbedarf decken, auch das Umgekehrte wäre für die Sommerkühlung möglich. Damit wäre das Energieproblem im Sektor Gebäude gelöst. Leider werden die Speicher insbesondere für bestehende, noch nicht maximal gedämmte Gebäude gross und teuer. Es sei daran erinnert, dass dieser Ansatz schon 1989 von J. Jenni im Jenni-Sonnenhaus in Oberburg bei Burgdorf in die Realität umgesetzt wurde [29].

Momentan ist im Markt eine verstärkte Nachfrage nach Kühlung festzustellen. Dieser zusätzliche Energiebedarf soll ebenfalls optimiert werden. Das Projekt *SEK – Standardlösungen zum energie-effizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen [4]* untersucht Optionen zum Kühlen, wenn im Gebäude schon eine Wärmepumpe mit Erdwärmesonde integriert ist. Das Ziel ist die Definition von Standardsystemen für unterschiedliche Gebäudetypen inklusive Minergie- und Minergie-P-Gebäuden und die Ableitung von entsprechenden Auslegungsrichtlinien. Dazu wird nach Systemanalysen und verschiedenen Optimierungsberechnungen auch eine Feldmessung an einem Minergie-Einfamilienhaus durchgeführt. Die gewünschte sommerliche Behaglichkeit kann bei geschickter Systemwahl mit einem geringen Aufwand realisiert werden. Der Energieerzeugungsgrad der passiven Kühlung lag im Zeitraum Mai bis September 2009 bei 7,2. Es hat sich gezeigt, dass auch die Umschaltung vom sommerlichen Kühlbetrieb zum Heizbetrieb sorgfältig abgestimmt werden muss, damit sich die Systeme nicht gegenseitig konkurrenzieren. Die Projektergebnisse sollen in einem Leitfaden dokumentiert werden. Das Projekt liefert auch den nationalen Beitrag der Schweiz zum Annex 32 *Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses* des Implementing Agreements *Heat Pumping Technologies* der Internationalen Energieagentur (IEA).

Im Berichtsjahr konnte das Projekt *Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2* [5] abgeschlossen werden. In diesem sehr interessanten Projekt wurden 14 Grosswärmepumpen mit Wärmeleistungen zwischen 125 kW und 1,7 MW während einer längeren Betriebsperiode untersucht. Die über das Jahr ermittelten Leistungswerte JAZ (Jahresarbeitszahl) lagen zwischen 1,88 und 4,33 für das Bilanzgebiet der ganzen Anlagen und zwischen 2,33 und 4,83 für das Bilanzgebiet nur um die Wärmepumpe. Es gibt also enorme Unterschiede, und leider auch nicht-optimale Lösungen! Letztere können mit dem gewählten Konzept und der planerischen Qualität erklärt werden. Die Hauptproblematik liegt im Engineering der Wärmezuführung aus verschiedenen Wärmequellen und der Wärmeverteilung inklusive der Warmwasser-Bereitung. Zu erwähnen sind allgemeine Wärmeverluste, Auskühlverluste, Konstant-Pumpenbetrieb bei variabler Wärmeabgabeleistung, zentrale und dezentrale Warmwasser-Versorgung und Pumpenleistungen bei offenen Wärmequellen-Kreisläufen. Die Autoren planen, die Erkenntnisse

neben Fachartikeln auch in Seminarien zu verbreiten. Im Bereich Grosswärmepumpen sind effiziente Lösungen möglich, aber sie benötigen ein entsprechendes Know-how, und Planungsfehler führen zu erheblichen Einbussen.

Das Projekt *Beurteilungstool für Grosswärmepumpen – Phase 2* [6] erstellt ein einfach bedienbares Computerprogramm, das die energetische und wirtschaftliche Betriebsweise einer neuen Grosswärmepumpenanlage aufzeigen soll. Das Projekt wird co-finanziert vom Stromsparfonds des ewz, dem Awel (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft) des Kantons Zürich und dem Amt für Energie und Umwelt des Kantons Basel-Stadt. Wegen etwas zögerlicher Lieferung von Daten ist dieses Projekt zeitlich im Rückstand und wird 2010 abgeschlossen. Es wird dann der Öffentlichkeit und den interessierten Organisationen, zum Beispiel dem Städteverband, zur Verfügung stehen.

Im Projekt *Utilisation de géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec pompes à chaleur à très hautes performances* [7] werden die Technologien und die Kosten beziehungsweise die Rentabilität von Erdsonden von 300 bis 800 m Tiefe für grössere Leistungen über 100 kW untersucht. Vor allem wird verglichen, wo die Vorteile liegen im Vergleich zu konventionellen Erdsondefeldern mit Sondentiefen von 100 bis 200 m. Man rechnet damit, dass bei den tieferen Sonden nur noch Wasser als Wärmetransportmedium verwendet werden muss, und keine viskosere Glykol-Lösung mehr, da die Temperaturen 20 bis 30 °C erreichen werden. Damit wird dann natürlich auch die Leistungsziffer der Wärmepumpe massiv erhöht. Dieses Projekt wird zusammen mit dem BFE-Forschungsprogramm *Geothermie* durchgeführt.

Hocheffiziente Systeme für die Warmwasseraufbereitung

Das Projekt *Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Anlage in Uttwil* [8] untersuchte, wie energieeffizient und störungsfrei Warmwasser mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern, Schulhäusern, Schwimmbädern oder Hotels erzeugt werden kann. In einem Vorprojekt *Warmwasserbereitung mit Wärmepumpen* [30] wurden mit einem aussen liegenden Wärmetauscher und Stufenladung Warmwassertemperaturen zwischen 54 und 57 °C erreicht, und damit ohne elektrische Zusatzheizung Arbeitszahlen von 3,15 bis 3,33 realisiert. Im neuen Projekt stand eine Wärmepumpe mit Scroll-Verdichter und Dampf-Zwischeneinspritzung zur Verfügung, die eine maximale Verflüssiger-Austrittstemperatur von 65 °C ermöglichte. Es wurde nun eine Antilegionellenschaltung mit sekundärseitiger Laderegelung messtechnisch untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass mit einer Wärmepumpe mit sekundärseitiger Laderegelung alle drei Antilegionellenempfehlungen des Bundesamts für Gesundheit BAG erfüllt werden können. Die sicherste Lösung ist ein Antilegionellenbetrieb in Kombination mit einer Schichtladung im Normalbetrieb auf über 60 °C. Für Warmwasserbereitung im grösseren Leistungsbereich wurde ein neues Projekt gestartet, das im Abschnitt «Umweltfreundliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen» beschrieben wird.

Miniaturisierung und neue Wege für den Einbau von Heiz- und Kühlsystemen mit Wärmepumpen (plug and play)

Im Berichtsjahr konnten in diesem Segment keine neuen Projekte gestartet werden, obwohl in der Branche Aktivitäten zur Entwicklung von Heizkörper-Wärmepumpen immer wieder diskutiert werden. Die zentrale ungelöste Frage ist hier, inwiefern es sich energetisch und ökonomisch lohnt, viele Einzelraumgeräte gegenüber einer zentralen Heizungs- und Klimatisierungseinheit mit entsprechender Energieverteilung zu den Räumen einzusetzen. Es ist aber zu erwarten, dass 2010 Forschungsprojekte in diesem Sektor gestartet werden können.

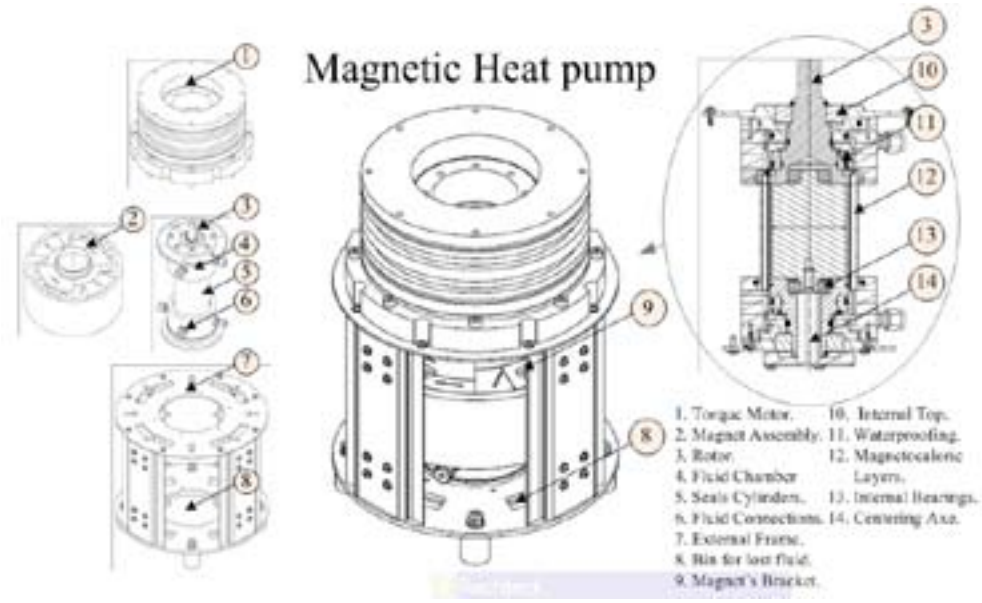
Umweltverträgliche Arbeitsmedien für Wärmepumpen und Kältemaschinen

Die Frage der Arbeitsmedien oder Kältemittel ist nach wie vor aktuell. Die technische Situation hat sich aber nicht stark verändert. Bei grösseren Anlagen, bei welchen ein spezielles Engineering notwendig ist, kann ein vermehrter Trend zu Ammoniak und CO_2 beobachtet werden. Bei kleineren Wärmepumpen können die Propan-Wärmepumpen stetig Marktanteile gewinnen. Die Auflagen der Behörden sind allerdings sehr inhomogen und stark kantonal verschieden. In unserem Programm konnte das Forschungsprojekt *CO_2-Erdwärmesonde, Phase 2* [9] abgeschlossen werden. Durch Modellierung der mehrphasigen Vorgänge im Fall-

film und beim Wärmeaustauschprozess an die Sondenwand konnte bewiesen werden, dass auch Sondenlängen von 300 m möglich sind. Innerhalb eines Toleranzbereiches bezüglich der Füllmenge an CO_2 verhalten sich die Sonden selbst stabilisierend und können auch im Zustand, wenn keine Wärme abgenommen wird, das vertikale Temperaturprofil im Erdreich ausgleichen und sich damit schneller regenerieren. Die ursprünglich verfolgte Idee der mehrfachen CO_2-Flüssig-Einspritzung stellte sich als zu kompliziert und zu wenig effektiv heraus. Durch den Einsatz dieser pumpenlosen Erdwärmesonden, die zudem weniger treibendes Temperaturgefälle beim Wärmeaustausch an den Verdampfer erfordern, kann eine COP-Erhöhung an der Wärmepumpe von 15 % erwartet werden. Ein weiterer Vorteil der pumpenlosen Erdwärmesonde tritt auf, wenn das CO_2 auch das Arbeitsmedium der Wärmepumpe ist. Dann entfällt der Wärmetauscher am Sondenkopf und das gasförmige CO_2 wird direkt vom Kompressor angesaugt. Aus Gewässerschutzgründen muss dann aber das System ölfrei arbeiten. Die pumpenlose Erdwärmesonde hat gegenüber der Sole-Erdwärmesonde aber den Nachteil, dass sie für Kühlung aus physikalischen Gründen nicht funktionieren kann.

200 kW eingesetzt werden soll. Alleine in der Schweiz müssen jährlich in Hotels, Schulhäusern und Spitälern 700 Grossanlagen zur Warmwassererzeugung ersetzt werden, sodass sich weltweit ein riesiges Potenzial ergibt. Wiederum ist zu bemerken, dass die Ölfreiheit im Wärmepumpenkreislauf noch weitere energetische und apparative Vorteile bietet. Mitte 2010 soll ein erstes Funktionsmuster des neuen Kompressors in Betrieb genommen werden.

Seit Oktober 2007 läuft das Projekt *Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle – Optimierter Prototyp* [11]. Ein energetischer und kommerzieller Erfolg der magneto-kalorischen Wärmepumpe würde natürlich die ganze Kältemitteldiskussion erübrigen und deshalb wird weltweit an diesem Prinzip intensiv geforscht. Das Projektteam versucht in dieser Projektphase, einen effizienten Prototypen (Fig. 3) mit einer Wärmeleistung von 8 kW zu bauen und auszumessen, der zwischen 5 und 35 °C arbeitet. Es waren mannigfaltige Probleme im Bereich Wärmeaustausch, Strömungsführung und Konstruktion zu lösen, wobei aufgrund des limitierten Temperaturhubes der magnetischen Materialien ein mehrstufiges Konzept gewählt werden musste. Da die Materialentwicklung auf Seite der magnetischen Eigenschaften stetig fortschreitet, ist die definitive Wahl der Magnetmaterialien nicht einfach. Es zeigte sich auch, dass der Wirkungsgrad stark von der konstruktiven Genauigkeit abhängt, sodass das Projekt auch im Berichtsjahr verzögert wurde und der Prototyp und die Betriebsresultate im Herbst 2010 erwartet werden.



Figur 3: Übersichtsbild der 8-kW-Wärmepumpe nach dem magneto-kalorischen Prinzip [11]

Im neu gestarteten Projekt *Ölfreier CO_2-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung* [10a] wird ein Turbokompressor für CO_2 entwickelt, der vor allem für Warmwassererzeugung im Leistungsbereich zwischen 40 und

Wärme-Kraft-Kopplung

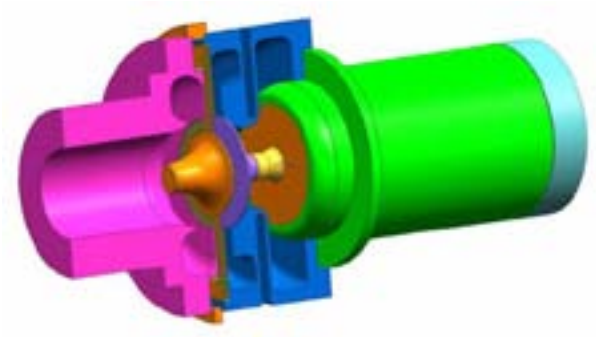
Im Bereich Wärme-Kraft-Kopplung konnte im Berichtsjahr ein verstärktes Interesse an Umwandlung von Abwärme in hochwertige mechanische

und elektrische Energie festgestellt werden. Es gibt kleinere KMU als Anbieter aber auch Grosskonzerne kündigten neue Produkte an [32]. Als Wärme-Kraft-Kopplung wird aber immer noch die gleichzeitige Umwandlung von chemischer Energie in Brennstoffen in mechanische Wellenenergie und nutzbare Abwärme verstanden. Für die Verminderung des CO_2-Ausstosses und der Erhöhung der Effizienz soll weiterhin die Kombination von Wärme-Kraft-Kopplung und Wärmepumpen gestärkt werden. Damit lässt sich der CO_2-Ausstoss um 50 % und mehr reduzieren. Die Schwierigkeit der verbreiteten Einführung dieses Konzeptes liegt in der Umsetzung, indem die Motoren aus ökonomischen Gründen eine Grösse von über 100 kW haben sollten und deshalb nicht jedes kleinere Gebäude mit einer eigenen Wärme-Kraft-Kopplungs-Einheit ausgerüstet werden kann. Absprachen unter verschiedenen Gebäudebesitzern scheinen aber schwierig zu sein.

Systemoptimierung von WKK-Anlagen

Das Projekt *HTScroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température* [12] konnte abgeschlossen werden. Es wurde auch durch den Axpo Naturstromfonds unterstützt. Der für Wasserdampf, natürliche oder klassische Kältemittel konzipierte Prototyp wurde nach grösseren konstruktiven und fertigungstechnischen Problemen schliesslich mit Luft mit einer Temperatur bis 190 °C bei Drehzahlen bis 6000 rpm getestet. Die Hochdruckturbine in Scroll-Design erreichte im monovalenten Betrieb einen Wirkungsgrad von 60 % bei elektrischen Leistungen zwischen 0,5 und 2,5 kW. Tests mit zweistufiger Expansion ergaben einen Wirkungsgrad von 30 % bei einem Eintrittsdruck von 15 bar. Der erreichte Wirkungsgrad ist stark abhängig von der Drehzahl, vom Druckverhältnis und von der Schmierölkonzentration. Um Marktfähigkeit zu erreichen, müssen der Versuchsstand messtechnisch erweitert und die Versuche in weiteren Entwicklungsschritten mit Wasserdampf und mit Kältemitteln weitergeführt werden.

Das Projekt *MEU – Instruments innovants de planification et de management de systèmes energétiques en zones urbaines* [13] untersucht die Planung von Energieversorgungssystemen in urbanen Zonen. Das Projekt geht über die reine Wärme-Kraft-Kopplung hinaus. Es wird versucht, ein computerbasiertes Tool zu entwickeln, mit welchem die energetische Planung von Quartieren und Stadtteilen optimiert werden kann. Dabei wird das elektrische Netz, die Gasversorgung, die Fernwärme und die Fernkälte einbezogen. Ausgehend vom Gebäudezustand sollen die optimalen Massnahmen dargestellt werden. Im bisherigen Projektverlauf wurden internationale Referenzprojekte beurteilt und in jeder Partnerstadt ein Teilprojekt lanciert. Als nächster Schritt wird das Tool entwickelt. Das Projekt wird auch vom Forschungsfonds der Gaswirtschaft (Foga) unterstützt und erhält auch von den Partnerstädten finanzielle und personelle Unterstützung.



Figur 4: Rotoreinheit der inversen Gasturbine am Ökozentrum Langenbruck [14, Graphik Fischer AG]

Effizienzverbesserung von WKK-Anlagen und Reduktion von Schadstoffemissionen

Wie eingangs erwähnt, ist eine intensive Tätigkeit auf dem Gebiet der Abwärme-Verstromung zu beobachten. Im nun abgeschlossenen Projekt *Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine «Aactor» zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme, Phase 2* [14] wurde die Entwicklung einer Mikrogasturbine mit atmosphärischer Brennkammer für Schwachgas und Solarenergie bis zum Design des Funktionsmusters mit einer elektrischen Leistung von 2,4 kW weitergeführt. Dazu musste eine bestehende Hochgeschwindigkeitsspindel angepasst und eine thermische und eine FEM-Analyse der Turbinen/Generator-Einheit durchgeführt werden (Fig. 4). Der Rekuperator wurde evaluiert, gebaut und in die Versuchsanlage integriert. Der Testbetrieb über 50 Stunden zeigte eine gute Übereinstimmung mit Berechnungen der ZHAW Winterthur. In der nächsten Projektphase soll eine Schwachgas-Mikroturbine mit 9 kW elektrischer Leistung entstehen. Die Turbine soll gemäss der Projektplanung später auch mit Holzpellets oder mit konzentrierter Solarstrah-

lung gefahren werden können. Dieses Projekt wird von der Zürcher Fachhochschule und den beteiligten Firmen namhaft unterstützt.

Kälte

In der Schweiz benötigen die Erzeugung und Anwendungen von Kälte etwa 12 – 15 % der elektrischen Energie [33]. Kälte ist für unsere heutige Lebenssituation vor allem in der Lebensmittelkette unabdingbar. Aber auch die Gebäude benötigen mehr und mehr Kälte für die Klimatisierung im Sommer. Die Erzeugung und Verteilung von Kälte soll ebenfalls energetisch optimal erfolgen.

Systemoptimierung von Kälteanlagen

Im jetzt abgeschlossenen Projekt *Abwärmenutzung in der gewerblichen Kälte – Energetische Analyse von zwei Verkaufsstellen* [15] wurde an zwei konkreten Verkaufsstellen von Migros und Coop bewiesen, dass sich Abwärmenutzung in beiden Fällen lohnt. Der ETV (elektrothermische Verstärkungsfaktor) gibt an, welche nutzbare Wärmemenge pro wie viel Strommehrverbrauch erzeugt werden kann. In einer Verkaufsstelle ergab sich für die Gesamtanlage (Minus- und Pluskälte) ein ETV von 24 und in der anderen Verkaufsstelle ein ETV von 8 für die Pluskälte. Auch in diesem Projekt hat sich gezeigt, dass schon bei der Planung der ETV beeinflusst werden kann: das Wärmeabgabesystem soll auf die tiefstmögliche Temperatur ausgelegt werden, die Wärme der Kälteanlage soll vollständig genutzt werden und zu häufiges Umschalten von Abwärmenutzungsbetrieb zu Rückkühlbetrieb soll vermieden werden.

Wie schon im Abschnitt Wärmepumpen erwähnt, ist die Frage der eingesetzten Arbeitsmedien immer noch aktuell. Auch in der Kälteerzeugung wäre das magnetokalorische Prinzip eine Option. Dieses Prinzip wird im Projekt *Réfrigération magnétique – Force magnétique* [16] intensiv untersucht. Das Projekt soll ermöglichen, die instationären mechanischen Kräfte zu berechnen, die an magnetischen Materialien (para- und ferro-magnetisch) angreifen, wenn sie in ein Magnetfeld ein- bzw ausgeschoben werden. Diese transienten Vorgänge treten beim magneto-kalorischen Prinzip zwingend auf und müssen für die (Voraus-)Berechnung des Wirkungsgrades berechenbar sein. Die Schwierigkeit liegt darin, dass bei den instationären Vorgängen die Änderungen im Magnetfeld und die dadurch induzierten Änderungen analytisch zu trennen sind. Es wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der die Vorgänge an einer linearen Einheit untersucht. Später sollen die Resultate auch auf Drehbewegungen für rotierende magneto-kalorische Konzepte abgeleitet werden.

Figur 5: Einzelteile der Expansions-Kompressions-Einheit für eine CO_2-Kälteanlage, TU Dresden [17]

Verbesserung der thermodynamischen Kreisprozesse bei Kälteanlagen

Kälteprozesse sind wie Wärmepumpen-Prozesse so genannte links-laufende Kreisprozesse, die zwingend zwischen zwei Druckniveaus arbeiten müssen. Im Kompressor wird das Arbeitsmedium vom Verdampferdruck auf den höheren Kondensatordruck komprimiert, im Expansionsventil wird diese Druckdifferenz wieder abgebaut. In klassischen Kälteanlagen läuft diese Expansion ohne mechanische Energie-Rückgewinnung in Drosseln ab, da die mechanische Energie-Rückgewinnung bisher zu kompliziert und kostspielig war. Im Fall von CO_2-Kälteanlagen könnte aber bei Nutzung der Expansionsenergie der Wirkungsgrad theoretisch um 66 % verbessert werden [33]. Im Projekt *Effiziente Kälteerzeugung – Integration einer Expansionsmaschine in ein CO_2-Kältesystem* [17] wird jetzt erstmals eine Expansionseineit in einer kommerziellen Plus-Kälteanlage integriert. In diesem Projekt wird eine von der TU Dresden entwickelte Kompressions-Expansions-Einheit (Fig. 5) in Form von oszillierenden Hubkolben in die 80-kW-Anlage eingebaut. Die messtechnische Untersuchung erfordert zusätzliche Sicherheits-, Absperr- und Regelkomponenten, Messgeräte sowie erweiterte Regelalgorithmen. Die Anlage wird 2010 in Betrieb genommen. Es wird eine reale Wirkungsgrad-Verbesserung von mindestens 10 % erwartet.

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 Beisteuerung erheblicher finanzieller Beiträge. Da die Projektleiter häufig in einer Hochschule- beziehungsweise in einer Fachhochschule tätig sind, besteht zu diesen Institutionen eine besonders intensive Beziehung. Die Projektthemen wirken sich dabei auch auf den Unterricht aus, denn innerhalb den Projekten können auch kostengünstige Studienarbeiten integriert 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.

Bei der Auflistung der Projekte wurde schon erwähnt, dass die vom BFE im Bereich *Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte* geförderten Projekte häufig auch von anderen Organisationen unterstützt werden. So engagieren sich neben vielen Firmen auch der Foga (www.ergas.ch), der Axpo Naturstromfonds (www.axpo.ch), der Kanton Waadt, das Awel des Kantons Zürich, das Hochbauamt der Stadt Zürich und das Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt in verschiedenen Forschungsprojekten.

Mit den Branchenverbänden besteht ein institutionalisierter Informationsfluss, denn alle wesentlichen Verbände haben ein Mitglied in der Begleitgruppe unseres Forschungsprogramms. Vertreten sind die FWS (Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz), der WKK-Fachverband, der SVK (Schweizerischer Verein für Kältetechnik) und der SWKI (Schweizerischer Verein der Gebäudetechnik-Ingenieure).

Zu den anderen BFE-Forschungsprogrammen besteht ein intensiver Kontakt. Ein Forschungsprojekt wird gemeinsam mit dem Forschungsprogramm *Geothermie* unterstützt. Mit dem Programm *Solarwärme und Wärmespeicherung* besteht eine enge Zusammenarbeit im Bereich des gemeinsamen Annex *Wärmepumpe und Solar* innerhalb der IEA. Dadurch, dass die Programme *Energie in Gebäuden*, *Wärmepumpen, WKK, Kälte* und *Solarwärme und Wärmespeicherung* vom gleichen Bereichsleiter des BFE (Andreas Eckmanns) betreut werden, besteht eine besonders intensive Zusammenarbeit. Bei Projekten im Bereich WKK existiert ein regelmässiger Informationsaustausch mit dem Programm *Biomasse (ohne Holz)* und *Holzenergie* und im Bereich der magneto-kalorischen Kälteerzeugung und der elektrothermischen Energiewandlung mit dem Programm *Elektrizitätstechnologien und -anwendungen*.

Internationale Zusammenarbeit

Die internationale Zusammenarbeit erfolgt vor allem durch eine aktive Mitarbeit im internationalen Normenwesen und im *Heat Pump Programme HPP* (www.heatpumpcentre.org) der IEA. Im Gemeinschaftsprojekt des *IEA-HPP-Annex 32: Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses* [18] stellt die Fachhochschule Nordwest-Schweiz (FHNW) den Operating Agent. In diesem Projekt bearbeiten Forscherteams aus 10 Ländern die Entwicklung von multifunktionalen Wärmepumpen mit einer Leistung zwischen 3 und 5 kW, den dazu gehörenden Feldtests und der Ableitung von Empfehlungen für die Praxis. Die Aktivitäten können auf der Webseite www.annex32.net verfolgt werden. Der Annex soll Mitte 2010 abgeschlossen werden.

Das IEA *Heat Pump Programme* organisiert verschiedene internationale gemeinsame Aktivitäten im Rahmen von Annexen. Im Moment sind Aktivitäten im Bereich *Field Measurements* und *Calculation of Seasonal Performance Factors* kurz vor dem Projektstart. Die Schweiz konnte aber bisher aus Budgetgründen noch keine aktive Teilnahme zusichern, obwohl aus der Schweiz in diesen Bereichen viel Know-how eingebracht werden könnte, und wo die Schweiz ebenfalls an einer Weiterentwicklung interessiert wäre. Die Projekte können hoffentlich Anfang 2010 mit einer aktiven Beteiligung der Schweiz gestartet werden. Gemeinsam

mit dem IEA Implementing Agreement *Solar Heating and Cooling (SHC)* soll ein Annex *Heat pump and Solar* gestartet werden, an dem sich die Schweiz aktiv beteiligen wird. Der Operating Agent wird vom Programmleiter des Forschungsprogramms *Solarwärmenutzung,* Jean-Christoph Hadorn, besetzt. Die Schweiz wird mehrere nationale Projekte beisteuern.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Moment sind keine Projekte unter dem Status P&D in diesem Forschungsprogramm in Arbeit. Das Projekt *IWB – Kundenzentrum Steinen, Erfolgskontrolle* [19] kann aber als P&D-Projekt betrachtet werden. Hier wird eine Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe (DAWP) kombiniert mit einem Gaskessel zur Heizung und Warmwassererzeugung des Kundenzentrums der Industriellen Werke Basel IWB eingesetzt. Die Energiezentrale kann auch kühlen. Die Wärmequelle und die passive Kühlung sollten ursprünglich durch den Grundwasserstrom realisiert werden. Der Grundwasserstrom ist allerdings nach dem Bau des Gebäudes versiegt und deshalb wurden nachträglich zwei Erdwärmesonden erstellt. Die Kühlung ist im Sommer erschwert, da die Austrittstemperatur der Erdwärmesonden im Sommer zwischen 18 und 20 °C beträgt. Die Kühlleistung erreicht nur 25 % des geplanten Wertes. Der Betrieb des DAWP-Prototyps ist noch nicht befriedigend, sodass in der bisherigen Berichtsperiode noch keine schlüssigen Energiekennzahlen eruiert werden konnten und die Laufzeit des Projektes verlängert werden muss.

Auch das Projekt *Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat* [10b] hat Pilotcharakter. Seit 2006 ist im Schulhaus Limmat in Zürich eine Propanwärmepumpe in Betrieb, welche das Gebäude aus dem Jahre 1909 im Verbund mit einem Gaskessel beheizt und mit Warmwasser versorgt. Die Wärmepumpe bezieht Wärme aus einem Abwasserkanal mit einer im Winter typischen Temperatur von 14 °C. Damit wäre eine ideale Voraussetzung für eine Anlage mit einem hohen Wirkungsgrad gegeben. Die Anlage wurde im Projekt ausgemessen und exergetisch beurteilt. Es ergab sich eine Jahresarbeitszahl von 2,7. Dieser Wert ist bedingt durch eine nicht-optimale Schaltung der Wärmeverteilung, die wegen einer kleineren Energiemenge in der Abwartwohnung auf einer zu hohen Vorlauftemperatur läuft. Leider wurden von dieser Anlage im Zeitraum vor dem 4. Dezember 2008 zu hohe Leistungswerte publiziert. Es wurde dann aber in diesem Messprojekt festgestellt, dass bei der Auswertung der Messwerte die elektrische Leistung der Kompressoren und der Gesamtwärmepumpe um Faktor 1,6 zu gering dargestellt wurden, sodass die COP-Werte um diesen Faktor zu hoch berechnet wurden. Die Hauptursache dieser ursprünglich hohen COP-Werte, die bei Experten auch von Anfang an zu Zweifeln Anlass gaben, war ein falsch eingegebener Faktor in der Messdatenerfassung. Das Wärmeverteil-Konzept wurde bei der Umstellung von Ölfeuerung zur Wärmepumpe unverändert übernommen. Auch die Propanwärmepumpe lief nicht optimal, es wurden Oszillationen im Betrieb festgestellt. Die vorgeschlagenen Verbesserungsmassnahmen führen rechnerisch zu einer Jahresarbeitszahl von 4,4. Noch vor Abschluss des Projektes wurde begonnen, die Massnahmen umzusetzen und einige positive Resultate konnten schon festgestellt werden. Die Oszillationen an der Wärmepumpe treten heute nicht mehr auf. Das Verhalten dieser Wärmepumpe kann online über die Webseite www.schulhauslimmat.ch verfolgt werden. Das Projekt wurde vom Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Fachstelle Energie + Gebäudetechnik, finanziell und personell unterstützt.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die 2009 bearbeiteten Projekte fördern die Erreichung der vom *Konzept der Energieforschung des Bundes* definierten Ziele. Es konnten auch einige Projekte abgeschlossen werden, die durch besondere Umstände im Projektplan verzögert wurden. Das Projekt Analyse von Grosswärmepumpen zeigte eindrücklich, dass Wärmepumpen nur bei guter planerischer Integration ihr volles Leistungs-

vermögen ausweisen können. Bei schlechter Integration der Wärmepumpe in das Gesamtsystem ergeben sich grosse Wirkungsgradverluste. Besonders gespannt darf man auf den Abschluss des Projektes der magnetischen Wärmepumpe sein. Die begonnene Entwicklung eines Turbokompressors für CO_2-Wärmepumpen ist ein sehr anspruchsvolles Projekt. Einen grossen Erfolg stellt der Start des Projektes der Integration der Ausnützung der Expansionsenergie in den links-laufenden Kreisprozessen in praktischen Anwendungen dar. Mit diesem bisher nicht gewagten Schritt lässt sich der Wirkungsgrad in Abhängigkeit des Arbeitsmediums theoretisch zwischen 9 % für Ammoniak im Fall Wärmepumpe und 66 % im Fall von CO_2 für die Kälteerzeugung erhöhen.

Nach dem grossen Erfolg der 15. Wärmepumpentagung vom 24. Juni 2009 in Burgdorf wird auch 2010 am 9. Juni die 16. Wärmepumpentagung stattfinden.

Auf internationaler Ebene wird 2010 im Zeichen der Vorbereitung der *10th International Heat Pump Conference* vom 16. – 19. Mai 2011 in Tokio unter dem Konferenztitel *Heat pumps – The Solution for a Low Carbon World* stehen. Abstracts werden Mitte 2010 auch von Forschern aus der Schweiz erwartet. Danach gestaltet das International Organizing Committe, in dem der Programmleiter das Amt des Chairman bekleidet, das Konferenzprogramm. Weitere Informationen zur Konferenz sind auf der Webseite www.hpc2011.org zu finden.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden

(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch und www.bfe.admin.ch/forschungwkk unter der angegebenen Projektnummer).

Unter den angegebenen Internet-Adressen und auf www.energieforschung.ch sind die Berichte sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] L. Gasser, M. Albert, I. Wyssen, M. Häusermann, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **Effiziente Luft/Wasser-Wärmepumpen durch kontinuierliche Leistungsregelung** (Jahresbericht Projekt 102'713)

[2] M. Uhlmann, St. S. Bertsch (stefan.bertsch@ntb.ch), Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, Buchs: **Dynamischer Wärmepumpentest, Phase 3 und 4** (Jahresbericht Projekt 102'073)

[3] J. Demierre, D. Favrat (jonathan.demierre@epfl.ch), EPFL, LENI, Lausanne: **Pompe à chaleur thermique à double cycle de Rankine** (Rapport annuel projet 102'846)

[4] R. Dott, N. Lederle, Th. Afjei (thomas.afjei@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut am Bau, Muttenz: **SEK – Standardlösungen zum energieeffizienten Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen** (Jahresbericht Projekt 101'579)

[5] P. Hubacher, M. Ehrbar (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg und Enertec AG, Sargans: **Feldmonitoring und Analysen an Grosswärmepumpen, Phase 2** (Schlussbericht Projekt 100'917)

[6] P. Hubacher (he-ko@bluewin.ch), Hubacher Engineering, Engelburg: **Beurteilungstool für Grosswärmepumpen, Phase 2** (Jahresbericht Projekt 102'366)

[7] F. Rognon, S. Perret (stephanie.perret@planair.ch), Planair SA, La Sagne: **Utilisation de géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec des pompes à chaleur à très hautes performances** (Rapport annuel projet 103'436)

[8] H. Mayer, H. R. Gabathuler, Th. Baumgartner (mayer.gmbh@bluewin.ch), Mayer Ingenieur GmbH Diessenhofen, Gabathuler Beratung GmbH Diessenhofen, Baumgartner & Partner AG Dübendorf: **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe und sekundärseitiger Laderegelung – Messungen an einer Anlage in Uttwil** (Schlussbericht Projekt 101'494)

[9] A. Grüniger, B. Wellig (beat.wellig@hslu.ch), Fachhochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme & Verfahrenstechnik, Horw: **CO_2-Erdwärmesonde, Phase 2** (Schlussbericht Projekt 102'247)

[10] M. Friedl (Markus.Friedl@awtec.ch), awtec AG für Technologie und Innovation, Zürich: a) **Ölfreier CO_2-Kompressor für Grosswärmepumpen zur Warmwassererzeugung** (Jahresbericht Projekt 103'073) b) **Exergieanalyse der Wärmepumpe im Schulhaus Limmat** (Schlussbericht Projekt 102'624)

[11] P.W. Egolf, A. Kitanovski, C. Gonin, A. Nguepnang Noume, M. Liu, B. Yu, P. Repetti, A. Orita, J.L. Beney (Peter.egolf@heig-vd.ch), Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Yverdon-les-bains, Universität von Turin, Italien, Jiao Tong University Xi'an, China: **Magnetische Wärmepumpe mit Erdwärme-Quelle – Optimierter Prototyp** (Annual report project 100'873)

[12] M. Kane, D. Cretegny, D. Favrat, J. Maquet (malick.kane-@eneftech.com), Eneftech Innovation SA Lausanne, EPFL-LENI Lausanne: **Projet HTScroll – Nouveau système de cogénération à turbine spirale haute température** (Rapport final projet 101'609)

[13] G. Cherix, M. Capezzali (massimiliano.capezzali@epfl.ch), EPFL Energy Center Lausanne, HES-SO Valais, CREM Martigny: **MEU – Instruments innovants de planification et de management de système énergétiques en zones urbaines** (Rapport annuel projet 102'775)

[14] M. Schmid (martin.schmid@oekozentrum.ch), Ökozentrum Langenbruck, Langenbruck: **Aactor !GT – Entwicklung einer inversen Gasturbine «Aactor» zur Nutzung erneuerbarer Energie und industrieller Abwärme** (Schlussbericht Projekt 102'820)

[15] M. Erb, St. Gutzwiller (markus.erb@eicher-pauli.ch), Dr. Eicher+Pauli AG, Liestal: **Abwärmenutzung in der gewerblichen Kälte – Energetische Analyse von zwei Verkaufsstellen** (Schlussbericht Projekt 101'544)

[16] M. Balli, O. Sari, C. M'Ahmed, Ch. Besson, M. Jaccard, Ph. Bonhote, D. David, J. forchelet, P. Egolf, (osmann-.sari@heig-vd.ch), HEIG-VD, IGT-TiS, Yverdon-les-Bains: **Réfrigération magnétique – Force magnétique** (Rapport annuel projet 103'069)

[17] R. Gerber (r.gerber@frigoconsulting.ch), Frigo-Consulting AG, Gümligen: **Effiziente Kälteerzeugung – Integration einer Expansionsmaschine in ein CO_2-Kältesystem** (Jahresbericht Projekt 103'308)

[18] C. Wemhöner, Th. Afjei (carsten.wemhoener@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut für Energie am Bau, Muttenz: **IEA-HPP-Annex 32: Economical Heating and Cooling for Low Energy Houses** (Annual report project 101'579)

[19] D. Mollet, R. Dott, Th. Afjei (daniel.mollet@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut am Bau, Muttenz: **IWB – Kundenzentrum Steinen, Erfolgskontrolle** (Jahresbericht Projekt 101'527)

[20] Th. Kopp, A. Eckmanns, R. Phillips (thomas.kopp@hsr.ch), BFE Bern: **Tagungsband der 15. Tagung des Forschungsprogramms *Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte* des BFE: News aus der Wärmepumpen-Forschung: Heizen und Kühlen mit Wärmepumpen – Kombination Wärmepumpe und Solar**, Bundesamt für Energie BFE, 2009, Bern.

Referenzen

[21] Eidgenössische Energieforschungskommission CORE: *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011*, Bundesamt für Energie, April 2007.

[22] Th. Kopp, A. Eckmanns: Energieforschungsprogramm Wärmepumpen, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte für die Jahre 2008 bis 2011 (Detailkonzept), Bundesamt für Energie, Juli 2009.

[23] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008: Bundesamt für Energie, 2008.

[24] Th. Lang (thomas.lang@ebp.ch), Ernst Basler & Partner, Zürich: **Workshop Lücken zwischen den Gewerken**, Kälte-Forum 2008, Zürich, 27.11.2008.

[25] M. Eschmann (michael.eschmann@ntb.ch), Wärmepumpen-Testzentrum, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, Buchs: **Monitoring von Kleinwärmepumpen mittels Normprüfungen 2008** (Schlussbericht Projekt 102'062).

[26] L. Berlinger, L. Gasser, M. Albert, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **LOREF – Lamellenluftkühler-Optimierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 1: Theoretische und experimentelle Untersuchungen** (Schlussbericht Projekt 100'059).

[27] R. Sahinagic, L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig-@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **LOREF – Lamellenluftkühler-Optimnierung mit Reduktion von Eis- und Frostbildung: Optimierung des Lamellenluftkühlers/Verdampfers von Luft/Wasser-Wärmepumpen – Teil 2: Mathematisch- physikalische Simulation des Lamellenluftkühlers mit Kondensat- und Frostbildung** (Schlussbericht Projekt 100'059).

[28] L. Gasser, B. Wellig, K. Hilfiker (beat.wellig@hslu.ch), Hochschule Luzern – Technik und Architektur, CC Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik, Horw: **WEXA – Exergie-Analyse zur Effizienzsteigerung von Luft/Wasser-Wärmepumpen** (Schlussbericht Projekt 101'543).

[29] K. Marti: **Energiemessungen an der Solarwerkstatt Jenni**, Bundesamt für Energie (Schlussbericht Projekt 2354, 1994).

[30] H. Mayer, H.R. Gabathuler, Th. Baumgartner (gabathuler-.ag@bluewin.ch), Gabathuler AG Diessenhofen und Baumgartner & Partner AG Dübendorf: **Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe** (Schlussbericht Projekt 101'494, Juli 2007)

[31] Th. Boerrnert (thomas.boerrnert@ch.abb.com) ABB Baden-Dättwil: **Aus Abwärme wird Strom**, ABB Connect, 3, 2009

[32] M. Kaufmann: **Energiepolitik, Energieeffizienz und Kälte**, Vortrag am Kälte-Forum08, 27. November 2008, Zürich

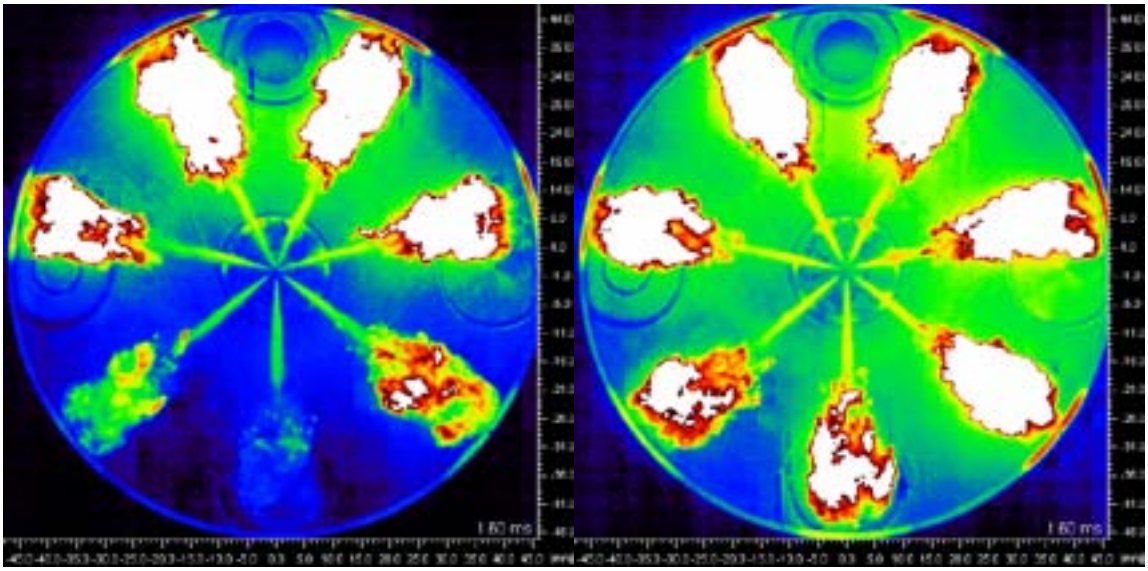
[33] R. Heidelck, Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen FKW GmbH, Hannover: **Expansionsmaschinen für CO_2 auf der Basis von modifizierten Hubkolbenmaschinen** , DKV-Tagung 2000, Bremen

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Verbrennung

Stephan Renz

renz.btr@swissonline.ch



Aufnahme von zwei Dieseleinspritzungen in die Hochtemperatur-Druckzelle (HTDZ) des Laboratoriums für Aerothermochemie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

Für die Erweiterung und Validierung von numerischen Simulationsverfahren wie die Computational Reactive Fluid Dynamics müssen Versuche an optisch gut zugänglichen Modellen von Motoren durchgeführt werden können. Die mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen Bilder zeigen eine starke Fluktuation des Zündbeginns von zwei identischen Einspritzungen.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Ein grosser Teil der für unsere Energieversorgung genutzten Energieträger wie Erdöl, Erdgas oder Kohle wird durch Verbrennung in die nutzbaren Energieformen Kraft (Strom) und Wärme umgewandelt. Die Endlichkeit der vorgenannten Rohstoffe fossilen Ursprungs, aber auch die durch die Verbrennung entstehenden Schadstoffe wie Russ, Feinstaub, Stickoxid oder Kohlenwasserstoffe stellen hohe Anforderungen an die Entwicklung effizienter und schadstoffarmer Verbrennungssysteme. Die Nutzung fossiler Energieträger bewirkt zudem einen Zuwachs von Kohlendioxid in der Atmosphäre und damit eine Verstärkung des Treibhauseffekts. Neben der Optimierung der Verbrennungssysteme für konventionelle Brennstoffe erhält deshalb die Nutzung von Holz, Biogas, Ethanol oder Biodiesel, die aus nachwachsenden Energieträgern hergestellt werden, eine zunehmende Bedeutung in der Verbrennungsforschung. Verschiedene Forschungsarbeiten beinhalten folglich neben den grundlegenden Aspekten zur Optimierung von Verbrennungssystemen einen speziellen Fokus zur Nutzung erneuerbarer Energieträger.

In der Schweiz sind mehrere Entwicklungszentren von weltweit tätigen Herstellern von Grossdieselmotoren, Dieselmotoren für Nutzfahrzeuge und Baumaschinen sowie Gasturbinen domiziliert. Verschiedene Hochschulen und Forschungsinstitutionen arbeiten eng mit der Industrie zusammen und sind international anerkannt. Zum Gesamtumsatz der Schweizer Verbrennungsindustrie von rund CHF 2 Mrd. tragen auch diverse Entwickler und Hersteller von kleineren Verbrennungssystemen und Zulieferer bei. Der Bund setzt für die Verbrennungsforschung jährlich rund CHF 11,5 Mio. ein.

Zielsetzungen

Die Zielsetzungen des Programms Verbrennung richten sich nach den Vorgaben des Konzepts der Energieforschung des Bundes [1] für die Periode 2008 – 2011:

Verbesserte Forschungsmethoden und -instrumente

Die Instrumente der Forschung wie physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger sind weiter zu entwickeln und an die gestellten Anforderungen anzupassen.

Erhöhung des Systemwirkungsgrads

Mit der Erhöhung des Wirkungsgrads werden der Brennstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen reduziert. Wichtig ist der Einbezug des Gesamtsystems und der unterschiedlichen Lastzustände.

Reduktion der Schadstoffemissionen

International werden die Emissionsvorschriften für Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxide sowie Russ und Feinstaub weiter verschärft. Zudem wird die Verminderung der Kohlendioxide gefordert.

Nutzung verschiedener Energieträger

Zur Verbesserung des Wirkungsgrads und zur Reduktion der Schadstoffe wird auch die Zusammensetzung der Brennstoffe geändert. Hinzu kommt die zunehmende Nutzung von biogenen Brennstoffen.

Daraus werden für die Periode 2008 – 2011 die folgenden 6 Schwerpunkte abgeleitet:

- Weiterentewicklung der Forschungsmethoden und -instrumente für konventionelle und für biogene Energieträger.
- Verbesserung und stärkere Vernetzung der experimentellen und numerischen Methoden für die Optimierung des Gesamtsystems «Motor», umfassend die Prozesskette Gemischbildung–Zündung–Verbrennung–Abgasnachbehandlung.
- Darstellung von «Null-Emission-Systemen» für die kleinskalige (10 kW bis 100 kW) kombinierte Strom-Wärme-Kälte-Erzeugung (inkl. Wärmepumpen und Biomasse) und für PW-Antriebe.
- Optimierung von Gemischaufbereitung, Verbrennung und Abgasnachbehandlung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim (Teil-)Einsatz von biogenen Kraftstoffen.
- Optimierung von Gemischaufbereitung und Verbrennung sowie Minimierung von Schadstoffemissionen beim Einsatz von konventionellen und biogenen Kraftstoffen in der atmosphärischen Verbrennung im kleinskaligen Bereich.
- Stärkere Vernetzung und Auftritt der Akteure in der Schweizer Verbrennungsforschung und -industrie inkl. Leistungserbringern von Komponenten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

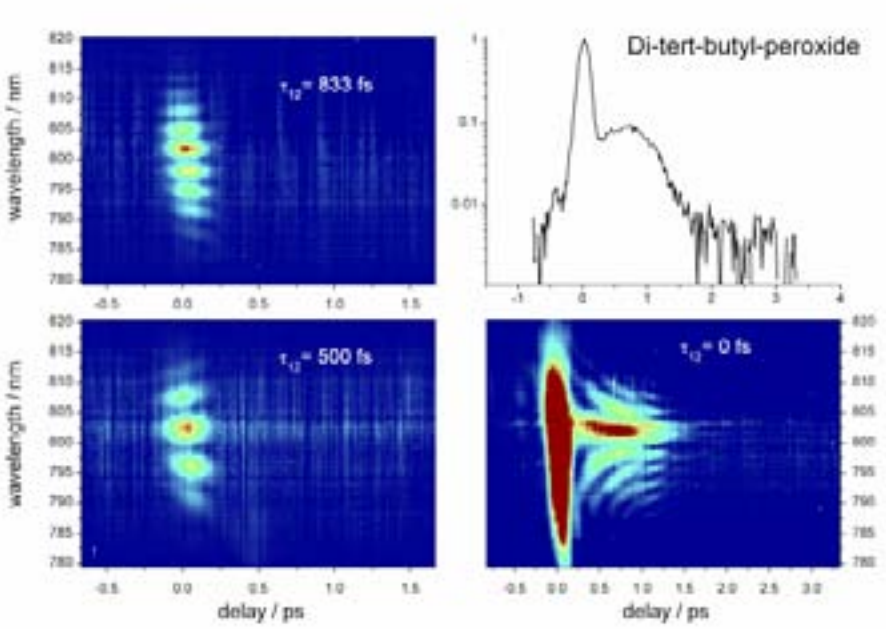
Verbesserung der Forschungsgrundlagen und -methoden

(Physikalische Grundlagen, numerische Simulation, Messmethoden und Versuchsträger)

Um die auf hohem technischem Niveau stehenden Verbrennungssysteme entsprechend den gestellten Forderungen nach höherem Wirkungsgrad, Variabilität der Brennstoffe und Reduktion der Schadstoffe zu verbessern, ist ein fundiertes Wissen über die Vorgänge im Verbrennungsprozess notwendig. Rein empirische Vorgehensweisen genügen nicht mehr, um die unterschiedlichen Funktionsweisen und Einflussfaktoren der chemischen, thermodynamischen und kinetischen Prozesse in der Verbrennung zu verstehen und entsprechende Veränderungen zu bestimmen. Notwendig sind Daten der chemischen Prozesse, numerische Modelle zur Simulation der Vorgänge in der Verbrennung sowie Messmethoden und spezielle Versuchträger. Damit können die theoretischen Modelle überprüft und verbesserte Komponenten getestet werden. Hinzu kommen grössere Versuchsstände, an denen die Interaktionen der verschiedenen Teilsysteme wie die Einspritzung, der Zündvorgang, der Verbrennungsablauf und die Abgasnachbehandlung eines Verbrennungsmotors untersucht werden können. In verschiedenen vom Bundesamt für Energie (BFE) unterstützten Projekten werden deshalb Verbesserungen der physikalischen und chemischen Grundlagen, der Rechenmodelle, der Messmethoden und der Versuchsträger weiterentwickelt. Diese haben auch immer einen Bezug zu den wirkungsorientierten Zielen der Verbrennungsforschung: Erhöhung des Systemwirkungsgrads, Reduktion der Schadstoffemissionen sowie Nutzung verschiedener Energieträger.

Thermochemische Daten von Radikalen im Zündvorgang

Der Zündvorgang hat einen grundlegenden Einfluss auf den Verlauf der Verbrennung und damit auf die Entwicklung von Schadstoffen, insbesondere von Russ. Das Zündverhalten wird weitgehend durch Peroxy-Radikale bestimmt. Sie beeinflussen die Art und die Zusammensetzung der anfänglich vorhandenen Zwischenprodukte und somit die Entwicklung der nachfolgenden Reaktionen.

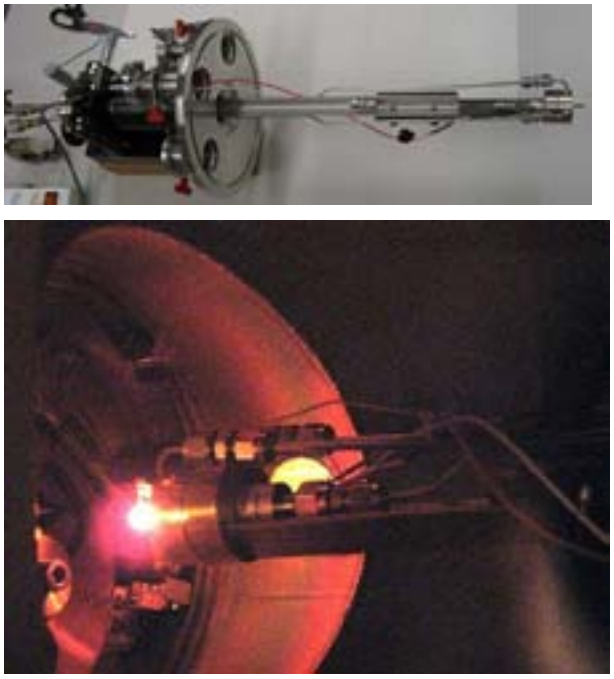


Figur 1: Spektren von di-tert-Butyl-Peroxid, aufgenommen bei drei verschiedenen Zeiten.

Die thermochemischen Daten von Radikalen, die bisher grösstenteils aus kinetischen Versuchen gewonnenen wurden, erreichen eine zu geringe «chemische» Genauigkeit von bestenfalls 2 kJ/mol, typisch sind 10 kJ/mol. Diese Ungenauigkeit schlägt sich in den Reaktionsgeschwindigkeiten nieder, die auch bei einer Temperatur von 1000 °C nur eine Genauigkeit innerhalb eines Faktors 10 erreicht. Damit ist beispielsweise die Produktion von Stickoxid kaum verlässlich modellierbar. Kinetische Messungen allein genügen deshalb nicht, um die erforderliche Genauigkeit der Daten zu erreichen. Vielmehr muss die zu ihrer Bildung aufgewendete Energie und ihre interne Energie während einer kurzen Lebensdauer im Bereich von ns bis µs bestimmt werden. Dazu eignen sich nur spektroskopische Methoden in Kombination mit

Massenspektrometrie, welche die notwendige Zeitauflösung erbringen und die empfindlich genug sind, um die nur in kleinen Quantitäten herstellbaren Radikalen zu detektieren.

Im Ende 2009 abgeschlossenen Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] der Gruppe «Molekulare Dynamik» des Paul Scherrer Instituts (PSI) wurden die notwendigen spektroskopischen und massenspektrometrischen Instrumente entwickelt und installiert. Mit frequenzaufgelöster Mehrfarbenspektroskopie wurde das C_2- und das C_2^--Anion vermessen. Der Einfluss nahe beieinander liegender elektronischer Zustände auf die Vibrations- und Rotationsenergie konnten eindeutig zugeordnet werden. Zudem wurde gezeigt, dass die angewandten nicht linearen Messmethoden auf extreme Empfindlichkeit ausgerichtet und sehr kleine Probemengen (10 Millionen Moleküle) vermessen werde können. Die Messungen an Tert-Butyl-Peroxy mit Femtosekunden-Pump-Probe-Methoden wurden erweitert und vertieft. Durch die spektrale Zerlegung der gemessenen Signale erschliesst sich eine zusätzliche Dimension, die wesentlich mehr Information bereitstellt, als das Zeitspektrum des üblichen Pump-Probe-Verfahrens (Fig. 1). Allerdings ist die Auswertung der mehrdimensionalen Spektren sehr aufwändig und deren eindeutige Interpretation Gegenstand zukünftiger Arbeiten.



Figur 2: Pyrolytische Radikalen-Quelle. Oben: Das dünne Röhrchen mit 1 mm Durchmesser kann auf 2'600 K erhitzt werden. Unten: Die Radikalen-Quelle in Funktion im Vakuum.

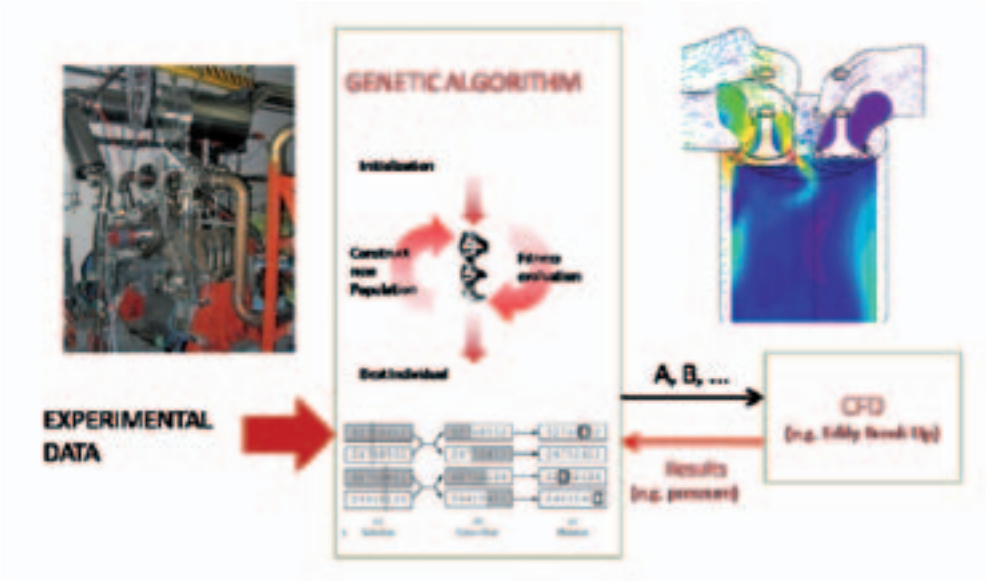
Neben dem Laserlabor steht auch eine Strahllinie an der Swiss-Light-Source [3] zur Verfügung mit der dank Spektroskopie im Vakuum-Ultraviolett-Bereich die Enthalpien von Ionenfragmenten und damit auch die Enthalpien der entsprechenden neutralen Radikalen sehr direkt bestimmt werden können (Fig. 2). In Zusammenarbeit mit externen Gruppen konnte so die Enthalpie von Tert-Butyl-Peroxy, für die es bisher keine experimentell begründete Herleitung gab, genauer festgelegt werden. Dank einer gegenüber Standartexperimenten zehnfach verbesserten Genauigkeit konnte auch der Dissoziationsmechanismus von Methan-Ionen genau vermessen werden. Die adiabatische Ionisationsenergie von Phenylpropargyl-Radikalen wurde gemessen. Die Kenntnis der unterschiedlichen Ionisationsenergien der Phenylpropargyl-Ionen erlaubte in einem ionensensitiven Experiment, die einzelnen Isomere in einer Flamme zu unterscheiden.

Das Projekt konnte erfolgreich in die per 2010 startende europäische COST Forschungsaktion CM0901 [4] mit dem Titel «Detailed Chemical Kinetic Models for Cleaner Combustion» eingebracht werden. COST koordinierte in Europa die Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung im Auftrag der angeschlossenen Mitgliedstaaten. Zur vorliegenden Aktion CM0901 sagten bisher Gruppen aus 18 Staaten ihre Mitarbeit zu. Das Ziel dieses grossen Verbandes ist. ein Verbrennungsmodell zu erstellen, das insbesondere auch für die Beschreibung von Verbrennungsreaktionen von aus erneuerbaren Quellen gewonnen Brennstoffe verwendet werden kann.

Numerische Simualtionsmethoden

Die Verbesserung von Verbrennungssystemen erfolgt in der Industrie in erster Linie über numerische Modelle, die mit Hochleistungscomputern berechnet und visualisiert werden. Damit werden aufwändige Messreihen und Versuchsinstallationen durch kostengünstige und Zeit sparende Simulationsberechnungen ersetzt. Mit den sich ändernden Anforderungen an Verbrennungsmotoren müssen auch die Rechen-Codes weiterentwickelt werden. Am Laboratorium für Aerothermochemie und Verbrennungssysteme (LAV) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) bestehen langjährige Erfahrungen in der Entwicklung der Computational Reactive Fluid Dynamics (CRFD). Im Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-*

Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe [5] werden die bestehenden Simulationswerkzeuge erweitert, um neuartigen Brennverfahren und unterschiedlichen Kraftstoffeigenschaften Rechnung tragen zu können und präzise Vorhersagen über den Verbrennungsprozess – namentlich die Emissionen und die Wärmefreisetzung – zu ermöglichen. Die Problematik wird dabei von zwei Seiten angegangen: In einem experimenteller Teil zur Bereitstellung der Validierungsdaten und parallel dazu in einem theoretischen Teil zur Entwicklung der Simulations-Codes (Fig. 3).



Figur 3: Schematische Darstellung der Vorgehensweise.

Zu diesem Zweck werden vier Arbeitspakete (AP) bearbeitet: Seitens der Messung kommen ein «MTU 396»-1-Zylinder-Heavy-Duty-Forschungsmotor mit umfangreicher Instrumentierung (inkl. Endoskop und der Gasentnahme im Zylinder) zum Einsatz (AP1). In Ergänzung dazu werden an generischen Versuchsträgern (Einhubtriebwerk) mit optischem Zugang mittels Hochgeschwindigkeitskameras bildgebende Verfahren für Diesel (AP2a) und Gas (AP2b) appliziert. Diese Daten werden anschliessend verwendet, um Modellentwicklung seitens des Conditional-Moment-Closure-Verbrennungscodes (CMC) weiter voranzutreiben und zu validieren (AP3 für den MTU-Motor, AP4a für das Einhubtriebwert mit Diesel und AP4b für Gas). 2009 wurden folgende Forschritte erzielt:

AP1: Bisher konzentrierten sich die Arbeiten auf die Vorbereitung des 1-Zylindermotors für die Durchführung der diversen Messekampagnen. Ein sehr flexibles Common-Rail-Einspritzsystem wurde in Betrieb genommen und erfolgreich getestet. Luftseitig wurden letzte Anpassungen vorgenommen – u.a. ein gekühlter Abgas-Rezirkulations-Pfad (AGR). Zudem mussten diverse technische Probleme wie beispielsweise die Regelung der Bremse oder starke Vibrationen im Kurbeltrieb gelöst werden.

AP2a: Eine Diesel-Einspritzdüse wurde hinsichtlich hydraulischem Verzug und Reproduzierbarkeit der Einspritzung charakterisiert. Eine neue Hochgeschwindigkeitskamera wurde erfolgreich in Betrieb genommen; erste optische Untersuchungen zeigten hohe Fluktuationen in der Reproduzierbarkeit des Zündortes. Erste Vergleiche von Einspritzcharakteristiken der verschiedenen synthetischen Kraftstoffe wurden durchgeführt.

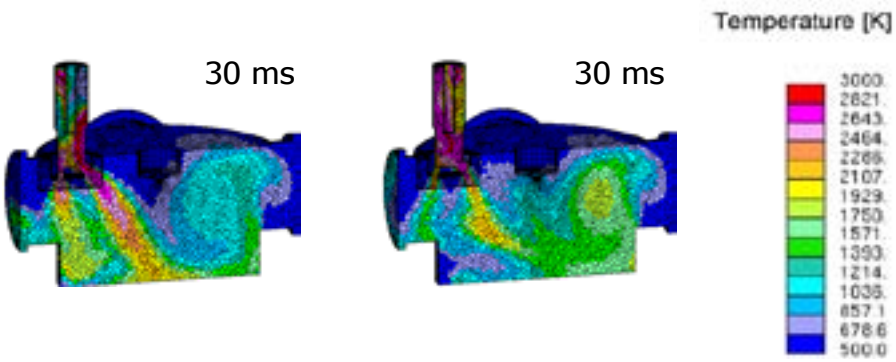
AP3: Eine zusätzliche Modellvalidierung mittels Daten eines «In-House» Heavy-Duty-Motors konnten in der Zeitschrift der Society of Automotive Engineers (SAE) publiziert und am SAE World Congress präsentiert werden. Eine Sensitivitätsstudie an der Hochtemperatur-Druck-Zelle (HTDZ) zur Validierung von Zündort, Zündzeitpunkt und den Einflüssen verschiedener Modellunsicherheiten wurde durchgeführt (siehe Titelbild). Für den MTU-Motor konnten verschiedene numerische Setups erfolgreich generiert und Spray- und Verbrennungssimulationen durchgeführt werden. Zur schnellen Abstimmung der Modellparameter wurde ein auf generischen Algorithmen basierender, an den CFD-Solver gekoppelter Code entwickelt.

AP4a: Das Design der Vorbrennkammer für die HTDZ wurde numerisch ausgelegt. Verschiedene Komponenten wurden bereits gefertigt und werden demnächst assembliert und getestet. Zur schnellen Abschätzung der Betriebsparameter und den daraus resultierenden Zuständen in der Kammer wurde eine spezielle Software entwickelt. (Fig. 4)

AP4b and AP2b: Die Literaturstudie zur turbulenten Flammgeschwindigkeits-Korrelation wurde abgeschlossen und ein passendes Modell identifiziert. Für das Einhubtriebwerk wurden Spray-Si-

mulationen mit verschiedenen Brennstoffen durchgeführt. Zusammen mit ersten Rechnungen zur Abschätzung des Einflusses der Methan-Grundladung liefern diese Vorarbeiten wertvollen Input bezüglich Betriebs- und Randbedingungen für die bevorstehenden Experimente.

Im 2007 abgeschlossenen Projekt *Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Mikrobereich* [6] wurde an der ETHZ eine neue Annäherung für die rechenunterstützte Strömungsdynamik an einer Mikrometerskala entwickelt. Diese Grundlagen werden im 2009 gestarteten Projekt *Modeling of Energy Conversion Process at Microscale with Application to PEFCs* [7] am PSI nun weiter erforscht. Im Fokus stehen reaktive Strömungen in komplexen Mikrokanälen wie sie in Katalysatoren für die Brennstoffaufbereitung und in Brennstoffzellen vorkommen. Das Projekt wird zusammen mit dem Forschungsprogramm Brennstoffzellen gefördert.



Figur 4: Simulation verschiedener Einspritzdüsen in der HTDZ.

Erhöhung des Systemwirkungsgrads und Reduktion der Schadstoffemissionen

Massnahmen zur Verbesserung des Wirkungsgrads der Verbrennung erfordern in der Regel höhere Temperaturen und höhere Drücke. Dadurch wird jedoch die Bildung von Schadstoffen wie Stickoxid verstärkt. Ganzheitliche Betrachtungen, welche die gegenteiligen Auswirkungen einzelner Massnahmen auf den Wirkungsgrad und die Schadstoffbildung berücksichtigen, sind erforderlich. Hinzu kommen die peripheren Komponenten der Verbrennung, wie Brennstoffzusammensetzung, Gemischbildung, Abgasrückführung oder Abgasbehandlung mit denen Nachteile des Verbrennungsprozesses wieder korrigiert werden können. Ein Beispiel ist die Abgasnachbehandlung, um die Stickoxid-Werte zu reduzieren.

Grossvolumige Dieselmotoren

Im EU-Projekt *HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships)* [8] werden neue Technologien für die Reduktion der Schadstoffemissionen und die Erhöhung des Wirkungsgrads grosser Schiffsdieselmotoren entwickelt. Die Schweizer Projektteilnehmer Wärtsilä Schweiz AG, ABB Turbosystems AG, das LAV der ETHZ, das PSI und die Empa befassen sich in einem Teilprojekt mit der Anwendung und Erweiterung von Verbrennungsprozess-Simulationsmodellen, für deren Entwicklung und Validierung experimentelle Daten benötigt werden. Das BFE unterstützte in einem 2008 abgeschlossenen Projekt die Entwicklung eines experimentellen Versuchsträgers, der das Verbrennungssystem grosser 2-Takt-Schiffsdieselmotoren (Bohrung 500 mm) unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedingungen weitestgehend repräsentiert. Im zwischenzeitlich gestarteten EU-Nachfolgeprojekt *HERCULES Beta* [9] werden damit die benötigten Referenzdaten generiert. Parallel dazu unterstützt das BFE einen eigenständigen Projektteil *Weiterentwicklung eines Referenzexperiments (Spray Combustion Chamber) in Bezug auf die Optimierung des Verbrennungssystems von Grossdieselmotoren* [10], in dem erweiterte Aspekte untersucht und die Brennkammer weiterentwickelt werden sollen. Dazu gehört die Untersuchung des Zündverhaltens verschiedener auch alternativer Brennstoffe (von Schweröl bis handelsüblichem Dieselkraftstoff), Ergänzung der Anlage durch neuartige Komponenten wie Probeentnahmesonden oder Schaugläser und die entwicklungstechnische Verbesserung von Bauteilen wie die Einspritzdüsen, die später in die eigentliche Produktentwicklung fliessen. Hinzu kommen die Anwendung und die Weiterentwicklung von Diagonseverfahren wie etwa optische Messtechniken.

2009 konnte der Aufbau des Versuchstandes fertig gestellt (Fig. 5), die Inbetriebnahme abgeschlossen und erste reguläre Messkampagnen durchgeführt werden. Die realen Motoren entsprechenden thermo- und fluid-dynamischen Bedingungen bei Einspritzbeginn in der Kammer werden über die Prozessgaszuführung durch schräge Einlasskanä-

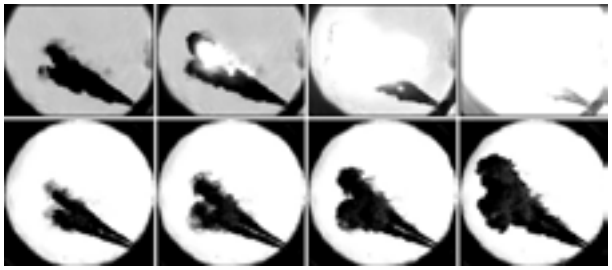
le aus einem Druckkessel/Wärmeregenerations-System gewährleistet.

Figur 5: Experimenteller Versuchstand «Spray Combustion Chamber».

Die Validierung dieser simultanen Anforderungen in Bezug auf Druck- und Temperaturniveaus sowie hinsichtlich des Bereiches der erforderlichen Drallströmung wurde erfolgreich durchgeführt. Ferner konnte das Einspritzsystem in Bezug auf möglichst reale Druckverläufe wesentlich verbessert werden. Zudem wurde das Messdatenerfassungssystem erweitert, um das «Kennfeld» sowie alle weiteren wichtigen Randbedingungen zu erfassen. Im Weiteren konnte die Schattenbildtechnik durch den Einsatz einer Laserdiode wesentlich optimiert werden, so dass die Einspritzstrahlausbreitung selbst nach der Zündung durch entsprechende Filterung des Flammenleuchtens nach wie vor erfasst werden kann (Fig. 6). Schliesslich konnte ein erstes Set von Referenzdaten bei unterschiedlichen Einspritzkonfigurationen (Geometrie der Düse, Anzahl Bohrungen) und Betriebsparametern (Druck, Temperatur, Einspritzdruck) generiert werden. Die bis jetzt durchgeführten ersten Untersuchungen bestätigen das Potenzial der Anlage in Bezug auf ein verbessertes Verständnis von verbrennungsrelevanten Prozessen unter realistischen schiffsdieselmotorischen Bedingungen.

Optimierung von Brennverfahren und Abgasnachbehandlung

Die weitere Entwicklung von «Medium-» und «Heavy-Duty»-Dieselmotoren (Busse, Lastwagen, Baumaschinen usw.) wird einerseits von der Forderung nach Reduktion des spezifischen CO_2-Ausstosses (und somit der Erhöhung des thermodynamischen Wirkungsgrades) und andererseits von der Notwendigkeit, mittelfristig nochmals schärfere Emissionsvorschriften wie EURO 6 (gegen 2013) und die USA-2014-Gesetzgebung zu erfüllen, bestimmt. So müssen beispielsweise die NO_x-Emissionen von aktuell zulässigen 2,0 g/kWh auf 0,4 g/kWh – also um den Faktor 5 – gesenkt werden. Eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen der industriellen Forschung und Entwicklung ist die Verfügbarkeit von «on-line» Messtechniken und entsprechend schneller Modelle für den Arbeitsprozess und die wichtigsten Schadstoffemissionen des Motors, d.h. Stickoxide und Russ. Diese Forderung, die Funktionsweise und die Einflussfaktoren des gesamten Verbrennungssystems – d.h. von der Brennstoffaufbereitung bis zur Abgasnachbehandlung – in die Betrachtungen mit einzubeziehen, wird im Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselbrennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* des LAV der ETHZ [11] erfüllt. Projektgegenstand ist die Entwicklung von sehr schnellen messtechnischen und Modellierungsmethoden für die Optimierung des Zusammenspiels zwischen motorischem Brennverfahren und Abgasnachbehandlung, insbesondere der SCR-basierten Entstickung. Die zu entwickelnden Werkzeuge werden an einem eigens dazu aufzubauenden, leistungsstarken, transient-fahrbaren Prüfstand evaluiert und kontinuierlich verbessert.

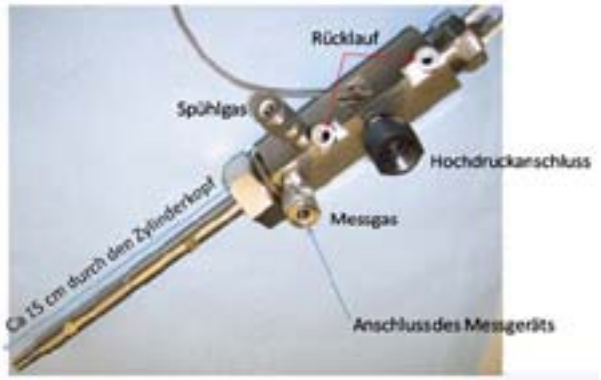


Figur 6: Schattenbildtechnik-Messungen der Einspritzstrahlausbreitung basierend auf einer regulären (Lichtbogen-)Lichtquelle (obere Sequenz) gegenüber dem Einsatz einer pulsenden Laserdiode (Filter) als verbesserte Lichtquelle (untere Sequenz).

Um die Anforderungen an ein Abgasnachbehandlungssystem von Dieselmotoren zu definieren, ist eine genaue Kenntnis der Emissionen (Russ und NO_x) des Motors erforderlich. In früheren Projekten konnten mittels eines im Rahmen eines KTI-Projekts [12] entwickelten, miniaturisierten In-Zylinder-Pyrometers vertiefte Kenntnisse der Bildung von Russ im Zylinder unter stationären Bedingungen gewonnen werden. Diese Prozesse sind, wegen der wesentlich erhöhten Anforderungen an die

Messtechnik, unter Lasttransienten noch nicht ausreichend verstanden. Da gerade solche Transienten einen ganz wesentlichen Beitrag an die Russemissionen liefern, sind vertiefte Untersuchungen dieser Prozesse in Hinblick auf die Erfüllung kommender Abgasgrenzwerte unbedingt erforderlich. Im Berichtsjahr wurde ein 4-Zylinder «Heavy-Duty»-Dieselmotor von Liebherr zusammen mit einer Leistungsbremse sowie einem Steuer- und Überwachungssystem und der erforderlichen Messtechnik aufgebaut (Fig. 7). Parallel dazu wurde am LAV im Rahmen des BFE-Projekts *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* ein 1-Zylinder-Dieselmotor von MTU aufgebaut und in Betrieb gesetzt. Mit diesem ausgesprochenen Forschungsmotor werden erste Versuche mit dem schnellen Gasentnahme-Ventil durchgeführt werden. Das schnelle Ventil (Fig. 8) wurde im Rahmen des 2007 abgeschlossenen BFE Projekts *Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren – Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO_2-Ausstoss* [13] entwickelt. Es wurde nun an einem mit einer definierten Gasmischung gefüllten Druckbehälter gestestet und charakterisiert. Dabei wurde die aus dem Druckbehälter entnommene Probe mittels eines schnellen Massenspektrometers (Airsense) analysiert. Das Zeit-Verhalten dieses Systems wurde charakterisiert und erkannte Verbesserungsmöglichkeiten wurden umgesetzt. Im Weiteren wurde das Pyrometer erstmals an Lasttransienten zur Untersuchung der Russbildung im Zylinder eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass die pyrometrische Messung einerseits zuverlässig mit der im Auspuff gemessenen Russemission korreliert und andererseits Zeit-aufgelöst die Russbildung und -oxidation in jedem einzelnen Verbrennungs-Zyklus charakterisiert werden kann. Ein im Rahmen des Projekts *Russgeregelter Dieselmotor* der deutschen Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) [14] zur Verfügung gestellter 6-Zylindermotor wurde erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach aufwendigen Anpassungen des Betriebskennfelds konnten erste Serienmessungen gewonnen, ausgewertet und für die Parametrierung phänomenologischer Modelle verwendet werden. Zur Simulation eines SCR-deNO_x-Katalysators wurde für die dem Katalysator vorgelagerten Verdampfungs- und Harnstoff-Hydrolyse-Prozesse verschiedene Modelle getestet und geeignete selektiert. Für die Simulation der Einzelkanäle wurde ein Simulations-Code entwickelt, welcher eine effiziente Parametrierung mittels Algorithmen anhand der verfügbaren experimentellen Daten ermöglicht.

Figur 7: Aufbau des Versuchsstands mit einem Liebherr 4-Zylindermotor D 924.



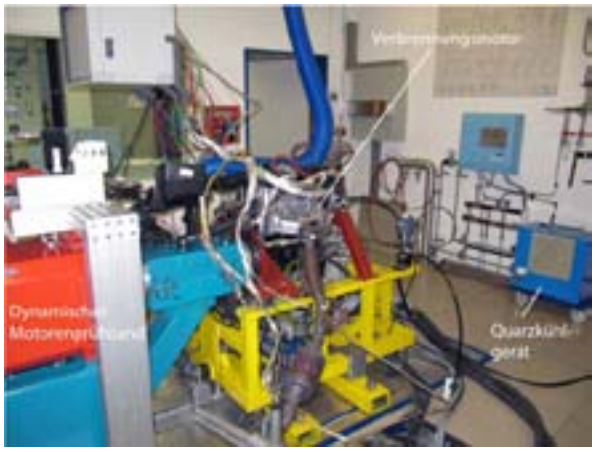
Figur 8: Schnelle Gas-Entnahmesonde entwickelt von der ETHZ in Zusammenarbeit mit der Firma Kistler.

Katalytische Reaktionen im Brennraum

Im instationären Hochdruck-Verbrennungsprozess wie er im Verbrennungsmotor stattfindet, spielt der Wärmeverlust über die Zylinderwände, den Kolbenboden und den Zylinderkopf eine wichtige Rolle. Aus materialtechnischen Gründen ist die Wärmeabfuhr zur Vermeidung einer zu hohen Temperatur notwendig, und zudem bietet ein gekühlter Innenraum des Zylinders ein besseres Füllvermögen der angesaugten Luft bzw. des Gemisches. Der Wärmeverlust bewirkt jedoch auch eine Verminderung des Wirkungsgrades und die vergleichsweise kühlen Oberflächen führen zu einem Auslöschen der Flamme oder zum Kondensieren des Gemisches, was eine verstärkte Russbildung zur Folge hat. Abhilfe könnte eine Isolation der Flächen bewirkten. Mit einer isolierenden Beschichtung des Kolbenbodens liesse sich auch eine katalyisch wirksame Schicht aufbringen. Damit könnten An-

teile des Brennstoffes und entstandene Schadstoffe bereits im Motor katalytisch umgewandelt und die Emissionen verbessert werden. Dies spielt u.a. bei mit Methan (Erdgas, Biogas) betriebenen Motoren eine wichtige Rolle. Die Emissionen von CH_4 beeinträchtigen den Katalysator und beinhalten ein grosses Treibhauspotenzial. Eine Umwandlung bereits im Brennraum bietet somit mehrere Vorteile.

Über die keramische Isolation von Kolben bei Dieselmotoren wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Das Thema wird kontrovers dargestellt, wobei die Nachteile zu überwiegen scheinen. Bei vorgemischter ottomotorischer Verbrennung sind hingegen zum Thema Isolation und katalytische Beschichtung im Brennraum erst wenige Informationen vorhanden. Die Prozesse sind anders als beim Dieselmotor und hängen zudem stärker von den Eigenschaften des Kraftstoffes ab. Speziell der Einfluss auf die Flammlöschdistanz und die dadurch entstehende bessere Energieausnutzung sowie reduzierte Emissionen von Kohlenwasserstoffen sind bei Isolation und katalytischer Beschichtung unbekannt. Das Projekt *Insulated and Catalyst-Coated Pistons (INCA)* der Abteilung Verbrennungsmotoren der Empa [15] setzt sich zum Ziel, den Einfluss von isolierten und katalytisch beschichteten Kolben bei vorgemischter ottomotorischer Verbrennung systematisch experimentell zu untersuchen und zwar mit Benzin und Methan als Kraftstoff und mit verschiedenen Luft/-Kraftstoff-Verhältnissen. Dazu wird ein 4-Zylinder-Ottomotor mit 2 Litern Hubraum und der Möglichkeit, Benzin oder Methan in das Saugrohr einzubringen, als Versuchsträger verwendet. Der Versuchsträger wird am Motorenprüfstand (Fig. 9) betrieben und ist mit Standardmesstechnik (Verbrauch, Temperaturen, Drücke, Schadstoffemissionen), sowie kurbelwinkelbasierter Aufzeichnung des Brennrauminnendrucks (Indizierung) mittels wassergekühlter piezoelektrischer Sensoren ausgerüstet. Mit Hilfe der Indizierung kann, unter Verwendung von Modellen, auf Verbrennung und thermodynamische Verluste geschlossen werden. Als erstes wurde der Motor für die Basisversuche mit Benzin und Methan und konventionellen Kolben in einem weiten Bereich von Luft/Kraftstoff-Verhältnissen bei verschiedenen Zündwinkeln betrieben. Anschliessend wird der Motor mit beschichteten Kolben (Fig. 10) ausgerüstet und die Versuche werden wiederholt. Ein systematischer Vergleich der Energieumsetzung, der Verluste sowie der Schadstoffemissionen wird die Beurteilung des Potenziales dieser Massnahme für verschiedene Anwendungsfälle (Lambda = 1 sowie Magermotoren für Benzin und Methan) ermöglichen.



Figur 9: Versuchsträger am Motorenprüfstand.

Figur 10: Originalkolben (links) und beschichteter Kolben (rechts).

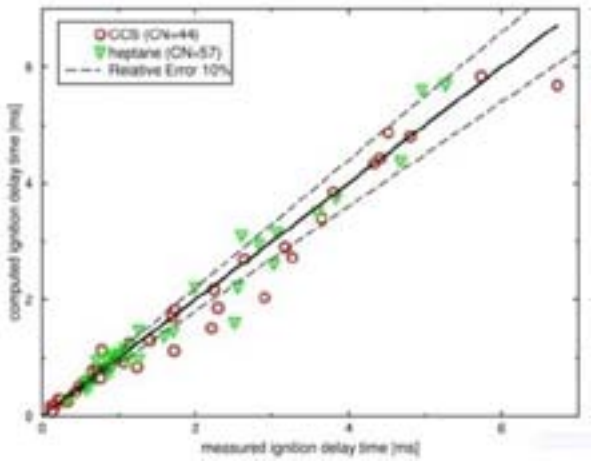
Nutzung verschiedener Energieträger

Das Zündverhalten, der Abbrand, die Russbildung, die Bildung von Stickoxiden aber auch die Gemischbildung und die Energiedichte werden durch den Treibstoff beeinflusst. Um die grossen Anforderungen an hoch effiziente und schadstoffarme Verbrennungssyteme erfüllen zu können, müssen deshalb auch die Eigenschaften der Brennstoffe in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Neue Rezepturen der traditionellen Treibstoffe Benzin und Diesel oder Gemische wie beispielsweise mit Wasserstoff oder biogenen Energieträgern stehen zur Diskussion. Hinzu kommen Treibstoffe aus ausschliesslich biogenem Material, die in Form von Biogas, Biodiesel oder Ethanol in motorischen Verbrennungssystemen eingesetzt werden. Ähnli-

che Themen und Aufgaben stehen auch für die atmosphärische Verbrennung, d.h. für Heizkessel, zur Diskussion.

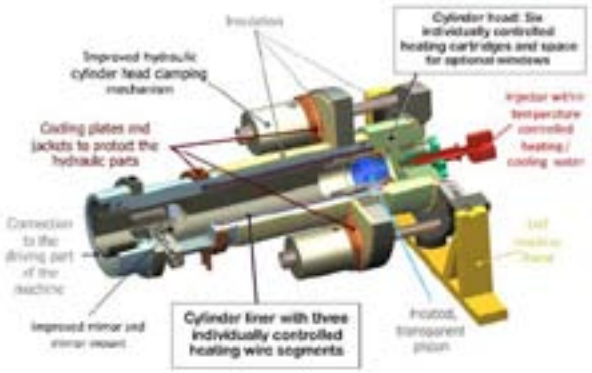
Brennstoffe für homogene Brennverfahren

Homogene Brennverfahren für Dieselmotoren (HCCI, Homogeneous Charge Compression Ignition) versprechen eine massive Reduktion der Stickoxid- und Russemissionen. Sie bilden deshalb seit einigen Jahren einen Schwerpunkt in der dieselmotorischen Verbrennungsforschung. Ungelöst ist die Kontrolle dieses Brennverfahrens besonders bei hohen Lasten, tiefen Drehzahlen oder bei instationärem Betrieb. Die Selbstzündung des Gemisches erfolgt oft zu früh, was zu hohen Druckspitzen (Lärm, mechanische Belastung) und einem schlechten thermodynamischen Wirkungsgrad führt. Der heute in Dieselmotoren eingesetzte Kraftstoff eignet sich schlecht für das HCCI-Brennverfahren, da seine bei der dieselmotorischen Diffusionsverbrennung notwendige kurze Zündverzugszeit im homogenen Betrieb (also bei langen Vormischzeiten) zu einer zu frühen Zündung des Gemischs führt. Neben der Optimierung des Motors wird für das HCCI-Brennverfahren deshalb auch der Einsatz speziell geeigneter synthetisch hergestellter Brennstoffe geprüft. Dafür ist es notwendig, die Eigenschaften der eingesetzten Kraftstoffe gut – idealerweise mit einer oder mehreren Kennzahlen – zu beschreiben.

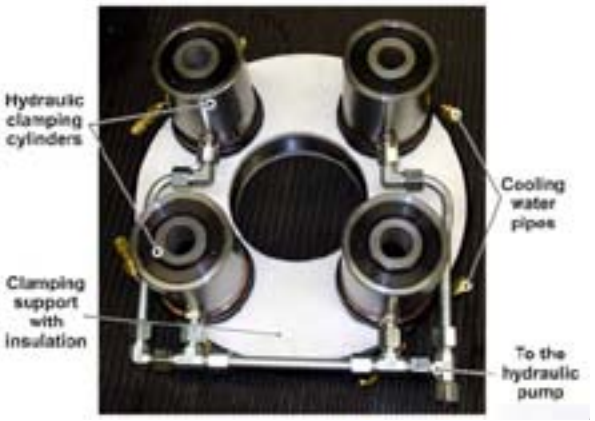


Figur 11: Gemessener und berechneter Zündverzug für n-Heptan und Diesel zeigen eine gute Übereinstimmung.

Im Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [16] werden deshalb die Eigenschaften und die Eignung verschiedener Brennstoffe für das HCCI-Brennverfahren experimentell und theoretisch untersucht, um entsprechende Kennzahlen bestimmen zu können. Es ist eng mit dem Forschungsvorhaben *Kraftstoffkennzahlen für homogene Verbrennung* der FVV [14] verknüpft. Neben der Uni Duisburg–Essen, der RWTH Aachen und der Uni Stuttgart sind mehr als 10 europäische Industriefirmen im Rahmen der FVV an diesem Vorhaben beteiligt.



Figur 12: Neukonstruktion von Zylinder und Zylinderkopf mit Klemmung für das Einhubtriebwerk.



Figur 13: Klemmplatte mit den Spannzylindern für die Zylinderkopfklemmung und den zugehörigen Kühlmannschetten.

Da detaillierte Reaktionsmechanismen für komplexe Brennstoffmischungen bisher noch kaum existieren und sie zudem für die Kopplung mit 3D-CFD-Simulationen zu komplex (d.h. langsam) sind, wird ein phänomenologisches Reaktionsmodell eingesetzt. Die Parameter dieses Grundmodells müssen für jeden betrachteten Kraftstoff mittels generischer Algorithmen optimiert werden. Durch die Kopplung dieser Reaktionsmodelle mit 3D-CFD-Simulationen können anschliessend die innermotorischen Abläufe in HCCI Motoren detailliert untersucht werden. Im Berichtsjahr wurde ein geeignetes numerisches Reaktionsmodell ausgewählt und implementiert. In einem ersten Schritt wurden die Parameter des Modells mittels generischer Algorithmen für den Brennstoff n-Heptan optimiert; zuerst nur im Hinblick auf den Zündverzug der Hochtemperaturreaktion, dann gleichzeitig

auch für den Zündverzug und die Wärmefreisetzung der Niedrigtemperaturreaktion (Fig. 11). Die zugrunde liegenden experimentellen Daten stammen aus Messungen in einem Stosswellenrohr. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen dem Reaktionsmodell und den experimentellen Daten der Hochtemperaturreaktion gefunden werden. Auch die laufende Optimierung für mehrere Zielgrössen (Hoch- und Niedrigtemperaturreaktionen, Wärmefreisetzung) zeigt erste viel versprechende Resultate. Für die experimentelle Untersuchung der Brennstoffeigenschaften (Zündverzüge, Wärmefreisetzung) unter HCCI-Bedingungen ist das Einhubtriebwerk des Labors ein idealer Versuchsträger. Es ermöglicht Experimente unter motorischen Bedingungen bei gleichzeitig ausgezeichnetem Zugang zum Brennraum für optische Messverfahren. Wichtige Parameter für die Darstellung unterschiedlicher Motortypen wie das Kompressionsverhältnis und der Gaszustand im Zylinder vor Kompressionsbeginn (Druck, Temperatur, Zusammensetzung) können frei gewählt werden. Im Verlauf des Berichtsjahrs wurden erste Messreihen mit n-Heptan durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass für niedrig siedende Brennstoffe wie n-Heptan gute homogene Bedingungen auch im bisher unbeheizten Einhubtriebwerk realisierbar sind. Um auch für die erst bei höheren Temperaturen verdampfenden Brennstoffe gute homogene Bedingungen erreichen zu können, wurden neue, beheizte Bauteile für das Einhubtriebwerk entwickelt (Fig. 12, 13). Damit verdampfen auch die höher siedenden Kraftstoffe schnell genug, um bis zum Zeitpunkt der Selbstzündung eine homogene Brennstoff-Luft-Mischung zu bilden.

Abgasnachbehandlung von mit flüssigen Biotreibstoffen betriebenen Motoren

Die Entwicklung von Katalysatoren und Dieselpartikelfiltern wird mit grossen Anstrengungen vorangetrieben. Die noch wenig erforschten Auswirkungen von Biotreibstoffen auf diese Abgasnachbehandlungssysteme werden im Projekt *Influences of Biocomponents (FAME) on Emissions and on Exhaust Systems of HD-Diesel Engines (BioExDi)* [17] in der Abgasprüfstelle der Fachhochschule Biel untersucht. In verschiedenen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Mischungen auf der Basis von Diesel und FAME (Fatty Acid Methyl Esters) werden Messungen mit SCR-Katalysatoren und Dieselpartikelfilter durchgeführt. Daraus werden Schlussfolgerungen gezogen, um die Abgasnachbehandlungssysteme anzupassen.

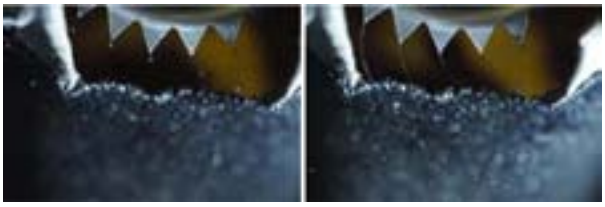
Biogene Brennstoffe in der atmosphärischen Verbrennung

Die erforderliche Leistung von Heizöl betriebenen Wärmeerzeugungssystemen wird zunehmend kleiner. Bestehende Gebäude werden isoliert, neue nach Minergiestandard gebaut oder additive Heizsysteme wie Sonnenkollektoren eingebaut. Für einen optimalen Jahreswirkungsgrad müssen die Heizsysteme zudem mit modulierbarer Leistung betrieben werden können. Hinzu kommt die Forderung auch flüssige biogene Brennstoffe nutzen zu können. Mit konventionellen Systemen, bei denen die Brennstoffzufuhr über eine Düse erfolgt, liegt der untere Leistungsbereich bei 10 – 12 kW. Für kleinere Leistungen eignet sich die Vorverdampfertechnik. Das Heizöl wird durch ein vorgeschaltetes System verdampft und kann im Brennraum besser mit der Luft zu einem russfrei brennbaren Gemisch vermengt werden. Nachteilig sind die Rückstände im System zur Vorverdampfung, die insbesondere bei biogenen Brennstoffen ein ungelöstes Problem sind.

Der Verdampfungsprozess und das Phänomen der Verkokung werden im Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [18] der Fachhochschule Nordwestschweiz für zwei verschiedene Vorverdampfungssysteme untersucht. Beim Plutobrenner der Schweizer Firma Toby AG wird das Öl nach der Zentrifugalzerstäubung auf einer durch Rauchgasrückführung beheizten Wand verdampft. Verdampfer und Brenner bilden bei diesem Verfahren eine fest verkoppelte Einheit. Der vom Ingenieur L. Griesser entwickelte Catvap-Brenner nutzt die Strahlungswärme der katalytischen Oxidation eines Teilstroms des zugeführten Brennstoffs. Die folgenden Brennstoffe werden im Projekt untersucht: Heizöl EL (Euro-Qualität), Ökoheizöl schwefelarm, Bio-Diesel und zwei Heizöl-Biodiesel-Blends.

Im Berichtsjahr wurde zuerst das Toby Verfahren untersucht. Das Ziel der ersten Projektphase war die Charakterisierung der Tropfenbildung. Nach der Analyse des Ausgangszustandes sollte eine Optimierung des Sprays durchgeführt werden. Ein optimierter Spray weist eine kleinere Standardab-

weichung der Tropfenverteilung auf und auch der Mittelwert der Tropfenverteilung ist kleiner. Ziel ist ein monodisperser Spray mit Tropfen < 100 µm. Durch Optimierung der Zerstäubung sollen die Parameter so eingestellt werden können, damit eine rückstandsfreie Verdampfung möglich ist. Ein für die Zerstäubungsqualität entscheidender Parameter ist die Art der Tropfenablösung am Rand des Rotationsbechers (Fig. 14). Mit einem optimierten Becher können kleinere Tropfen erzeugt werden. Zusätzlich ist das gesamte Tropfenspektrum schmäler. Für diesen Becher konnte weiter ein Modell erstellt werden, das eine Vorhersage der Tropfengrösse ermöglicht. Für die Erzeugung von Einzeltropfen mit denselben Parametern wie die des Zerstäubers konnte ein Tropfengenerator bestimmt werden. Messungen mit grossen Tropfen zeigen, dass die Messungen für bestimmte, bekannte Parameter mit der Theorie übereinstimmen. In den nächsten Messungen werden für die verschiedenen eingesetzten Medien die Verdampfungsmechanismen erfasst. Anhand dieser Messungen werden für kleine Tropfen die Ablagerungsbedingungen bestimmt. Zur Untersuchung des Catvap Verfahrens wurde zudem eine Versuchseinrichtung realisiert, die einen homogenen Brennstofffilm erzeugt.



Figur 14: Erzeugung von Brennstofftropfen mittels Rotationszerstäubung. Übergang vom Zerstäubungsmechanismus: Abtropfen zu Fadenzerfall aufgrund einer Erhöhung des Volumendurchflusses.

Nationale Zusammenarbeit

Ein Meilenstein für die nationale Zusammenarbeit 2009 war die an der ETH durchgeführte vom BFE mit organisierte Tagung *Verbrennungsforschung in der Schweiz* [19]. In 14 Referaten von Vertretern aus Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Industrieunternehmen wurde der aktuelle Stand der Schweizer Verbrennungsforschung präsentiert. In speziellen Vorträgen von Industrievertretern wurden zudem die künftigen Herausforderungen aufgezeigt: Einerseits müssen Verbrennungsprozesse noch effizienter werden, anderseits gilt es, die Stickoxid- und Partikelemissionen erheblich zu senken. Im Motorenbereich für Fahrzeuge werden Grenzwerte verschärft, aber auch bei Flugzeugen wird die generelle Verbrauchsreduktion in Zukunft eine noch grössere Rolle spielen. Auch bei der Hochseeschifffahrt gelten künftig schärfere Emissionsgrenzwerte in Küstennähe, so dass Dieselmotoren mit grösserer Flexibilität bei der Treibstoffzusammensetzung zu entwickeln sind. Mit der Tagung wurden auch die Kompetenzschwerpunkte der Schweizer Forschenden verdeutlicht. Dazu gehören mittlere bis grösste Dieselmotoren und Gasturbinen. Spezielles Wissen wurde zudem zu Gasmotoren, Abgasmessung und -behandlung, sowie speziellen Messsystemen präsentiert.

An der 2009 zum 13. Mal durchgeführten *ETH-Conference Combustion Generated Nanoparticles* [20] wurde die Problematik der durch die Verbrennung erzeugten Partikel interdisziplinär behandelt. Die Themen der Referate spannten den Bogen von der Partikelentstehung in der Verbrennung, über die Abgasnachbehandlung, zur Messtechnik sowie zu den atmosphärischen Vorgängen und zu den biologisch-medizinischen Wirkungsaspekten. Unter den 385 Teilnehmenden war das Ausland mit 20 Nationen in der Teilnehmerzahl sogar stärker vertreten als die Schweiz. Eine vernetzte Diskussion der Problematik und der Lösungsvorschläge wurde durch die Vertreter aus Wissenschaft, Behörden und Industrie ermöglicht. Interessant war zu erfahren, dass die neuen Abgasnormen der EU (Euro 5/6 für die Light-Duty-Vehicles und Euro VI für die Heavy-Duty-Vehicles) die Anzahl von Feststoffpartikeln erstmals im alveolengängigen[1] Grössenbereich festlegen und begrenzen. Die dafür notwendigen Messverfahren wurden in der Schweiz bereits eingeführt und erfordern nun den Einsatz hoch wirksamer Filter, um die Grenzwerte einhalten zu können. Interessant war auch das Referat von Prof. M. Jacobson von der Stanford University [21]. Er konnte nachweisen, dass die klimawirksamen Auswirkungen der Russpartikel (Black Carbon) massenspezifisch 1600-mal stärker wirksam sind als CO_2. Damit wird die

[1] Alveole = Lungenbläschen (Gasaustausch zwischen Blut und Atemluft)

Bedeutung der Partikelfilter deutlich unterstrichen und vor Massnahmen zur CO_2-Reduktion bei Verbrennungsmotoren gestellt. Die Konferenz wurde von einer Ausstellung begleitet, an der Partikel-Messsysteme und -filter gezeigt wurden. Die Nach- oder Neuausrüstung von Dieselmotoren erfährt einen starken Zuwachs, was auch zur Weiterentwicklung der Systeme beiträgt. Probleme in der Praxis sind beispielsweise bei den Baumaschinen zu finden, die vorwiegend im Lastwechselbetrieb und in Einsatzgebieten mit wechselnder Brennstoffqualität gefahren werden. Die von einem grossen internationalen Netzwerk von Fachleuten getragene Konferenz ist für die Teilnehmenden unentgeltlich. Das BFE unterstützte die Konferenz finanziell.

Ein Informationsaustausch der Schweizer Industrie findet in der Fachgruppe Verbrennungsmaschinen des Verbands der Schweizer Maschinen-, Elektro- und Metallindustrie (Swissmem) statt.

Die Forscherteams der Schweizer Verbrennungsforschung pflegen jedoch auch über zahlreiche gemeinsame Projekte gute Kontakte. Dazu gehören verschiedene vom BFE mitfinanzierte Projekte. Zu nennen sind das Projekt *HERCULES* [9], in dem die ETHZ, das PSI sowie Wärtsilä Schweiz AG und ABB Turbosystems AG Partner sind. Zahlreiche Industriepartner sind im Projekt *Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselbrennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung* [11] direkt oder indirekt involviert. Dazu gehören Duap AG, Kistler Instrumente AG, Iveco Motorenforschungs AG, Liebherr Machines Bulle SA und Hug Engineering AG. Das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] ist Teil des vom Swiss Competence Centre Energy und Mobility (CCEM) geführten Projekts Clean Efficient Large Diesel Engine (CELaDE) [22] in dem eine Zusammenarbeit zwischen der ETHZ, dem PSI und der Empa erfolgt. Im Projekt *Insulated and Catalyst-Coated Pistions (INCA)* [15] erfolgt eine Zusammenarbeit zwischen der Empa, der ETH und Nova Werke AG. Im Projekt *BioExDi* [17] arbeitet die Fachhochschule Biel mit der Empa und Hug Engineering zusammen. Das Projekt wird vom Forschungsprogramm Biomasse mitfinanziert und erhält zudem Mittel vom Bundesamt für Umwelt und von der Erdöl-Vereinigung [23]. Das an der Fachhochschule Nordwestschweiz bearbeitete Projekt *Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT)* [18] stützt sich auf die Zusammenarbeit mit der Firma Toby AG als Lieferant der Brenner und dem Verein Bio-Fuel als Lieferant der Bio-Brennstoffe. Das Projekt wird von der Erdölvereinigung mitfinanziert.

Internationale Zusammenarbeit

In mehreren vom BFE unterstützten Projekten erfolgt eine internationale Zusammenarbeit mit Hochschulen und Industriepartnern. Dazu gehört das von der EU mitfinanzierte Projekt *HERCULES* [9]: Neben den bereits erwähnten Schweizer Forschungsinstitutionen und Industriepartner sind auch die Abo Akademi University, die Helsinki University of Technology, die National Technical University of Athens sowie die Wärtsilä Corporation Finnland beteiligt. Das Projekt *Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse* [16] war Teil einer internationalen Ausschreibung der FVV [14]. Das LAV der ETHZ erhielt den Zuschlag, was seine Kompetenz und die internationale Konkurrenzfähigkeit bestätigt. Eine Zusammenarbeit erfolgt mit den Universitäten Duisburg und Stuttgart sowie der Technischen Hochschule Aachen. Auch das Projekt *Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe* [5] wird parallel zu Projekten der FVV bearbeitet, mit entsprechender Zusammenarbeit mit anderen Forschungsstellen in Deutschland. Im Projekt *Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion* [2] erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit der University of North Carolina aber auch mit der Universität Würzburg und der University of Birmingham in England. Durch die Aufnahme des Projekts in eine COST-Action der EU wird die internationale Zusammenarbeit erweitert werden.

Ein wichtiger Informationsaustausch und die Gelegenheit, die Schwerpunkte der Verbrennungsforschung international mitzugestalten, erfolgt in der Mitarbeit in Arbeitsgruppen der Internationalen

Energieagentur (IEA) [24]. Für die Verbrennung relevant sind das Implementing Agreement (IA) *Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion* (IA Combustion) [25], die *Working Party for Fossil Fuels* (WPFF) [26] und das Implementing Agreement *Advanced Motor Fuels* [27]. Die Schweiz ist in diesen Arbeitsgruppen vertreten.

Grössere Aktivitäten von Schweizer Vertretern erfolgen im IA *Combustion*. Hier ist das Ziel, die Entwicklung von Verbrennungstechnologien, die einen verminderten Treibstoffverbrauch und geringere Partikelemissionen aufweisen, für industrielle Anwendungen voranzutreiben. Die Forschungsthemen werden in sogenannten *Collaborative Tasks* bearbeitet. Dazu gehören *Gas Turbines*, *Sprays in Combustion*, *Alternative Fuels in Combustion* und *Nanoparticle Diagnostics* zu denen Schweizer Forschende Beiträge leisten, sowie *Hydrogen Internal Combustion Engines* und *Homogeneous Charge Compression Ignition*. Die Mitarbeit der Schweiz sichert eine Vertretung der Interessen im Bereich Verbrennung, eine Mitwirkung bei der Festlegung zukünftiger Schwerpunkte, die Vermittlung Schweizerischer Forschungsresultate, die Bekanntmachung der Firmen aus der Schweiz, sowie die Weitergabe von Informationen über internationale Aktivitäten an Interessierte in der Schweiz. Im IA *Combustion* sind 12 Mitgliedsländer vertreten.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Rückblick

Mit der Tagung «Verbrennungsforschung in der Schweiz» konnte die Vielfalt und die Kompetenz der Forschenden aus Industrie und Hochschulen präsentiert werden. Das grosse Interesse am Anlass, die hoch stehenden Beiträge und die regen Diskussionen waren ein Erfolgsausweis für die Veranstaltung und eine gute Demonstration der Qualität der Verbrennungsforschung in der Schweiz.

Das Projekt *Investigation of Reactions and Species Dominating Low Temperature Combustion* [2] wurde mit zahlreichen neuen Erfahrungen abgeschlossen. Das Ziel, die genaue Bestimmung der Enthalpie der Peroxy-Radikale konnte noch nicht vollständig erreicht werden. Dank der Einbindung in die europäische COST-Action [4] wird eine breitere und internationale Abstützung der weiteren Arbeiten ermöglicht werden. Die weiteren 2009 bearbeiteten, bereits laufenden oder neu gestarteten Projekte liegen im vorgesehenen Zeitplan und erreichten die Zwischenziele.

Erfolgreich waren verschiedene Kontakte zur Industrie, die verstärkt die Zielsetzungen Schadstoffreduktion, Wirkungsgradverbesserung und Nutzung biogener Brennstoffe, welches auch die Ziele des BFE sind, priorisiert. Das 2008 abgeschlossene Projekt *HERCULES* wird in einem Folgeprojekt der EU weiterbearbeitet. Im vom BFE mitfinanzierten Zusatzprojekt *HERCULES Beta* [9] können weitere Aspekte untersucht werden.

Durch die aktive Teilnahme an den Meetings des IA *Combustion* [25] konnte die neu gestarteten *Collaborative Tasks* mitgestaltet und Projektteilnehmer aus der Schweiz integriert werden. Der verstärkte Wissensaustausch auf internationaler Ebene ist ein Gewinn für alle Teilnehmenden.

Ausblick

Für 2010 werden im Forschungsprogramm Verbrennung vier Schwerpunkte verfolgt:

- Begleitung der laufenden Projekte und verstärkte Öffentlichkeitsarbeit zur Kommunikation der Ergebnisse;
- Initiierung und Start von neuen Projekten: Dazu gehört die Entwicklung kleinskaliger Verbrennungsmotoren, die Fortschreibung der Erforschung der Peroxy-Radikale im Rahmen der COST-Action und Projekte mit Industriebeteiligung;
- Fortschreibung der Vernetzung der Schweizer Forschenden aus Industrie und Hochschulen und Sensibilisierung für die Zielsetzungen des BFE;
- Konsolidierung der Schweizer Projektbeteiligung innerhalb des IA *Combustion*.

Liste der F+E-Projekte + Referenzen

[1] Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 – 2011, www.bfe.admin.ch/themen/00519/index.html?lang=de&dossier_id=00798.

[2] T. Gerber et al. (thomas.gerber@psi.ch), PSI-Villigen: Investigation of reactions and species dominating low temperature combustion (SB Projekt 100'708).

[3] SLS Swiss Light Source VUV; A beamline for Vacuum Ultraviolet Radiation; PSI Villingen http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/vuv/index.html.

[4] Eurpoean Cooperation in Science and Technology (COST) Action CM0901 Detailed chemical kinetic models for cleaner combustion; www.cost.esf.org.

[5] Y.M. Wright, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Erweiterung und Validierung der CRFD-Simulation für neue motorische Brennverfahren und Kraftstoffe (JB Projekt 102688).

[6] I. V. Karlin (karlin@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Lattice Boltzmann Simulationsmethoden für chemisch reaktive Systeme im Microbereich (SB Projekt 100'862).

[7] J. Mantzaras, N. Prasianakis, PSI-Villingen; Modeling of energy cnnversion processes at microscale with application to PEFCs (JB Projekt 103078).

[8] K. Hermann, LAV/ETH-Zürich: HERCULES Advanced combustion concepts, Test facility: Spray/Combustion chamber (SB Projekt 100706).

[9] European Commission Seventh Framework Programme (FP7) Project Higher-efficiency engine with ultra-low emissions for ships HERCULES Beta, http://cordis.europa.eu/fp7/home_en.html.

[10] K. Herrmann (kai.hermann@wartsila.com), Weiterentwicklung eines Referenzexperiments (Spray Combustion Chamber) in Bezug auf die Optimierung des Verbrennungssystems von Grossdieselmotoren; Wärtsilä Schweiz AG (JB Projekt 103241).

[11] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Entwicklung schneller Mess- und Rechenverfahren für die Charakterisierung energieeffizienter Dieselbrennverfahren an der Nahtstelle zur Abgasnachbehandlung (Projekt 102859).

[12] Förderagentur für Innovation (KTI); www.bbt.admin.ch/kti.

[13] K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Darstellung des Technologiepotenzials von zukünftigen Dieselmotoren zur Erfüllung zukünftiger Emissionsvorschriften bei niedrigem CO_2-Ausstoss (SB Projekt 47366).

[14] Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen FVV; http://www.fvv.de.

[15] Chr. Bach, P. Soltic, Empa Abteilung Verbrennungsmotoren, Insulated and Catalyst-coated Pistons (JB Projekt 103240).

[16] B. Schneider, K. Boulouchos (boulouchos@lav.mavt.ethz.ch), LAV/ETH-Zürich: Brennstoffe für homogene selbstgezündete Verbrennungsprozesse (JB Projekt 101514).

[17] J. Czerwinsiki Abgasprüfstelle Fachhochschule Biel, Influences of Biocomponents (FAME) on Emissions and on Exhaust Systems of HD-Diesel Engines (BioExDi), (JB Projekt 103206).

[18] T. Griffin (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Institute für Thermo- und Fluid-Engineering: Grundlagen zur Erweiterung des Leistungsbereichs und der Brennstoff-Flexibilitäten von Ölbrennern mit Vorverdampfertechnik (VVT) (JB Projekt 102860).

[19] Tagung Verbrennungsforschung in der Schweiz 28.10.2009, www.bfe.admin.ch/forschungverbrennung.

[20] A. Mayer, TTM (ttm.a.mayer@bluewin.ch), Ed., Proc. 13th ETH-Conference on Combustion generated Nanoparticles.

[21] Mark Z. Jakobson, The Global and Regional Climat and Air Pollution Effects of Fossil-Fuel; Dept. of Civil & Environmental Engineering, Stanford University http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson.

[22] Competence Center Energy and Mobility Clean Efficient Large Diesel Engine http://ccem-ch.web.psi.ch/documents/CELaDE_webupdate.pdf.

[23] Erdöl Vereinigung (EV), www.erdoel-vereinigung.ch.

[24] International Energy Agency (IEA) http://www.iea.org.

[25] International Energy Agency (IEA) Implementing Agreement Energy Conservation and Emissions Reduction in Combustion http://ieacombustion.com/default.aspx.

[26] WPFF Working Party for Fossil Fuels der IEA http://www.iea.org.

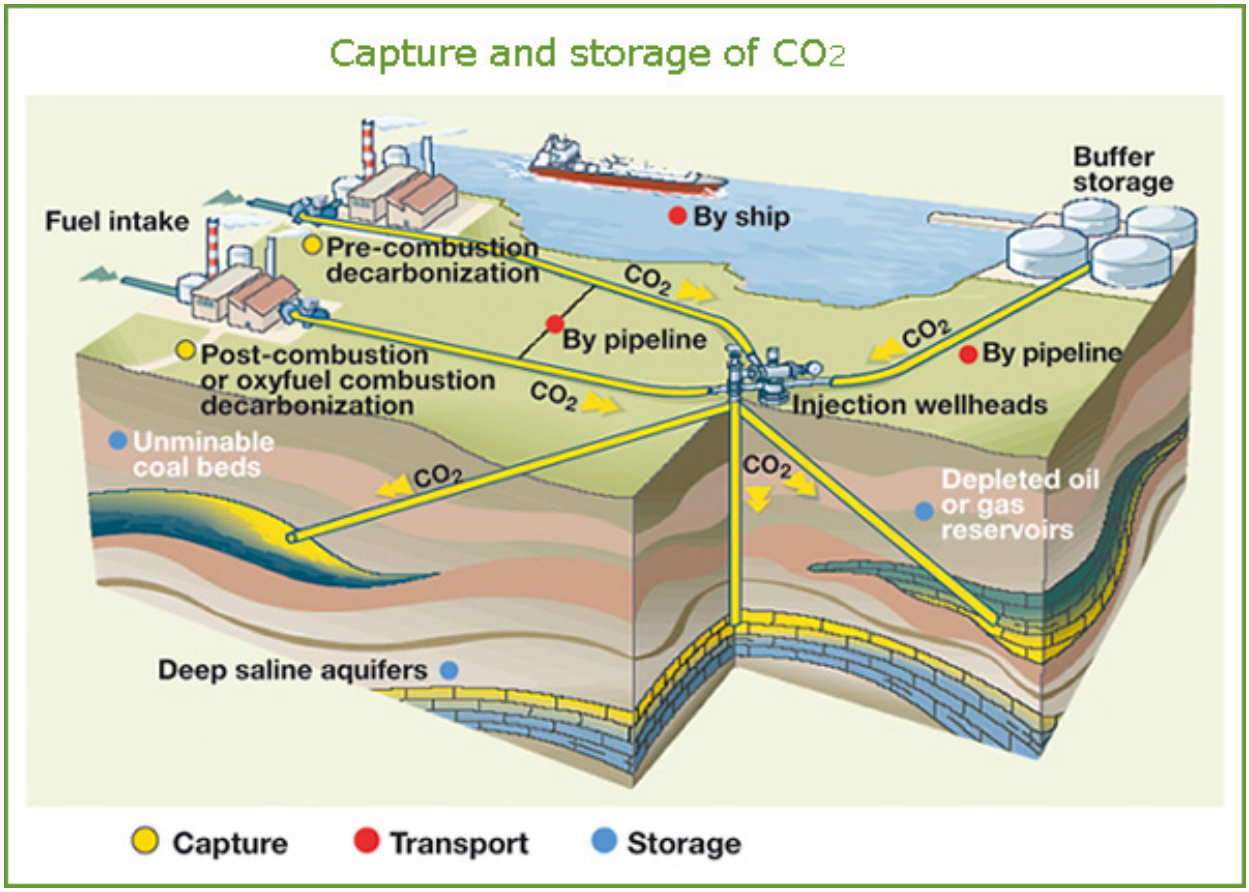
[27] International Energy Agency (IEA), Implementing Agreement on Advanced Motor Fuels http://www.iea-amf.vtt.fi.

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm
Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS)

Peter Jansohn

peter.jansohn@psi.ch



«Carbon Capture & Storage (CCS)»: Konzept der Abscheidungsmöglichkeiten und Konzentration des CO_2, des Transport und der Verpressung in tief liegenden Gesteinsschichten [Quelle: IPCC und Total].

Zurzeit wird CCS weltweit als mögliche, zeitlich bis 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts begrenzte Notwendigkeit für einen Übergang in eine Kohlenstoff-neutrale Zukunft diskutiert. In der Schweiz entwickelte Technologien liefern die Grundlagen für eine erfolgreiche Teilnahme an dem sich stark entwickelnden Markt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Durch den steigenden Strombedarf, das Auslaufen von Stromimportverträgen und das Erreichen der maximalen Betriebsdauer bestehender Kraftwerksanlagen zeichnet sich für den Zeitraum um das Jahr 2020 ein Engpass in der Stromversorgung der Schweiz ab. Um diese prognostizierte Versorgungslücke zu schliessen, sind Anstrengungen auf unterschiedlichen Ebenen (rationelle Stromverwendung, Ersatz von Stromerzeugungskapazitäten usw.) zu leisten. Eine Option für die Elektrizitätserzeugung in der Schweiz stellen dabei **Kombi-Kraftwerke auf Erdgas-Basis** dar, die aufgrund ihrer für thermische Kraftwerke hohen Effizienz und ihres niedrigen Schadstoffausstosses mittelfristig in der Stromerzeugung von Bedeutung sind. Diese Technik ist auch deshalb für die Schweiz von besonderem Interesse, weil Schweizer Industriefirmen und Forschungsorganisationen führend in der Weiterentwicklung dieser Technologie tätig sind und sich somit ein hohes Umsetzungspotenzial sowohl in der Schweiz als auch weltweit bietet.

Um auch die klimapolitischen Zielsetzungen der Schweiz zu erfüllen, sind bei einem zusätzlichen Einsatz von Erdgas für die Stromerzeugung flankierende Massnahmen zu ergreifen, die es erlauben, zu einer **Netto-Reduktion der CO_2-Emissionen** aus dem gesamten schweizerischen Energiesystem zu kommen. Die Prozessführung des Kraftwerks ist z.B. so zu gestalten, dass alternative Brennstoffe eingesetzt werden können und CO_2 ganz oder teilweise abgeschieden werden kann. Die bisherige Strategie der Kombination von modernen, effizienten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen mit Wärmepumpen muss ebenfalls weiterhin verfolgt und umgesetzt werden. Neu sind seit 2008 auch Prozesse ausserhalb des eigentlichen Kraftwerks, wie z.B. externe Brennstoffaufbereitung oder CO_2-Abtrennung und -Lagerung integraler Bestandteil des Programms. Aufgrund des begrenzten finanziellen Rahmens kann das Programm aber nur einen signifikanten Beitrag leisten, wenn eine starke Fokussierung auf Schlüsselkomponenten erfolgt.

Um der zeitlichen Zielsetzung des Forschungsprogramms gerecht zu werden, im Jahre 2020 die notwendigen Technologien einsatzbereit entwickelt zu haben, müssen die dazu erforderlichen **Basis-Technologien spätestens im Jahr 2015 verfügbar** sein. Deshalb ist das Programm vorerst auf einen Zeitraum von ca. 10 Jahren (d.h. bis Ende 2015) ausgerichtet. Dieser Programmperiode können sich geeignete Fortsetzungsphasen mit erweiterten, angepassten Zielsetzungen anschliessen. Die Konzentration der Programm-Aktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren ist auch aus diesen zeitlichen Aspekten heraus erforderlich.

Ein wesentliches Ziel des Programms ist es, durch Bündelung der Aktivitäten und durch Koordination der Ausrichtung individueller Projekte zu einer **Stärkung des Forschungs- und Industriestandortes Schweiz** im Bereich fortschrittlicher Gaskraftwerke zu gelangen. Dadurch soll auch sichergestellt werden, dass stets die bestgeeigneten Technologien bzw. Systeme für die Stromerzeugung zum Einsatz kommen. Die schweizerische Kraftwerksindustrie inklusive der Zulieferfirmen und dem unterstützenden, akademischen Umfeld ist international führend und hat eine starke Marktstellung.

Zentrales technisches Ziel ist die **Maximierung des elektrischen Wirkungsgrads** eines kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozesses. Ein Wert von deutlich über 60 % (Zielbereich: 62–63 %) auf Basis Erdgas soll erreicht werden. Dies wird erwartungsgemäss dem im Jahr 2020 weltweit besten Standard entsprechen.

Weiteres Ziel ist die **Steigerung des Einsatzes von erneuerbaren, CO_2-neutralen Brennstoffen** (insbesondere Biomasse-basierenden Vergasungsprodukten) auf 15 % im produktiven Betrieb. Ferner sollen mit dem Einbezug von prozesstechnischen Varianten für die **erleichterte Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2)** darüber hinausgehende CO_2-Emissionsminderungs-Potenziale ausgenützt werden.

Durch den zukünftig verstärkten Einsatz fluktuierender, erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien wie Wind und Photovoltaik werden Stromversorgungsnetzwerke stärkeren, kurzfristigeren Produktionsschwankungen unterworfen sein, die durch die anderen Stromerzeuger kompensiert werden müssen. Ein weiteres Ziel des Programms ist es deshalb, Gasturbinen-Kraftwerke noch besser zu befähigen, die **Stabilisierung des Stromversorgungsnetzes** zu übernehmen. Dazu müssen Techniken entwickelt werden, die höhere Last-

gradienten (+/-3 % Last pro Sekunde) oder gar eine Netzfrequenz unabhängige Betriebsweise erlauben.

Nach dem offiziellen Start des Programms Anfang 2006 und der Initiierung einer ersten Welle von Projekten, die den Rahmenbedingungen des *Programmkonzeptes* [14] gerecht wurden, war die Programmentwicklung 2009 stark beeinflusst durch die Umsetzung der Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich «Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2)» (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS). Dieser Programmentwicklung wird durch eine veränderte Gewichtung der einzusetzenden Programmmittel (Wirkungsgradsteigerung: 45 %; CO_2-Minderung: 40 %; Netzunterstützung: 15 %) und einem insgesamt moderat erhöhten Gesamtbudget (dies bezieht sich auf die zur Verfügung gestellten BFE-Mittel) Rechnung getragen. Die angepasste Programmausrichtung ist in einer Fortschreibung des Programmkonzepts dokumentiert [15].

Aufgrund der mittlerweile mehr als 3-jährigen Programmlaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) war das Jahr 2009 ein Übergangsjahr in dem nun fast alle Projekte der Programm-Anfangsphase abgeschlossen wurden und teils durch thematisch ähnliche Fortsetzungsprojekte ersetzt wurden. Das Programm befindet sich nun in einer Phase der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios, welches die etwas modifizierte Ausrichtung (CCS) immer deutlicher widerspiegeln wird. Mit den neuen, 2009 lancierten Projekten wurden teilweise auch wichtige thematische Lücken (z.B. im Bereich «Schaufelkühlung») geschlossen, so dass das Programm nun (fast) alle ursprünglich vorgesehene Themenbereiche abdeckt. Der zur Verfügung gestellte Finanzrahmen aus BFE-Mitteln war 2009 durch Projekte aus der Anfangsphase noch weitgehend ausgeschöpft und erlaubte dementsprechend nur eine mässige Erweiterung des Projektumfangs.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Im Jahresverlauf 2009 konnten entsprechend der erweiterten Ausrichtung des Programms auf Themen im Bereich CO_2-Minderung neue Projekte lanciert und einige Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen werden.

Figur 1: Skalierter Versuchsstand für die experimentelle Simulation der Strömungsverhältnisse in einem luftgekühlten Generator am Standort Fachhochschule Nordwestschweiz [Quelle: Prof. T. Griffin]

Neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) unterstützt die Förderagentur für Innovation (KTI), sowie der Forschungsfond der schweizerischen Energiewirtschaft (Swisselectric Research) und die Europäische Gemeinschaft im Zusammenhang mit dem 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) weitere für dieses Forschungsprogramm relevante Projekte.

Nachfolgend sind der Stand der Arbeiten und die erzielten Ergebnisse aus einigen ausgewählten Projekten aufgeführt, jeweils mit Zuordnung zu den Hauptzielsetzungen des Programms:

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads

Im Projekt **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (>99 %)** [1] wurde angestrebt, den Wirkungsgrad von grossen, luftgekühlten Generatoren (bis zu 400 MVA) bis über 99 % zu steigern (derzeitige Stand der Technik: bis zu 98,7 %) und damit auch einen Beitrag zur Steigerung des Gesamtsystem-Wirkungsgrades von Gas--Dampf-Kraftwerken zu leisten.

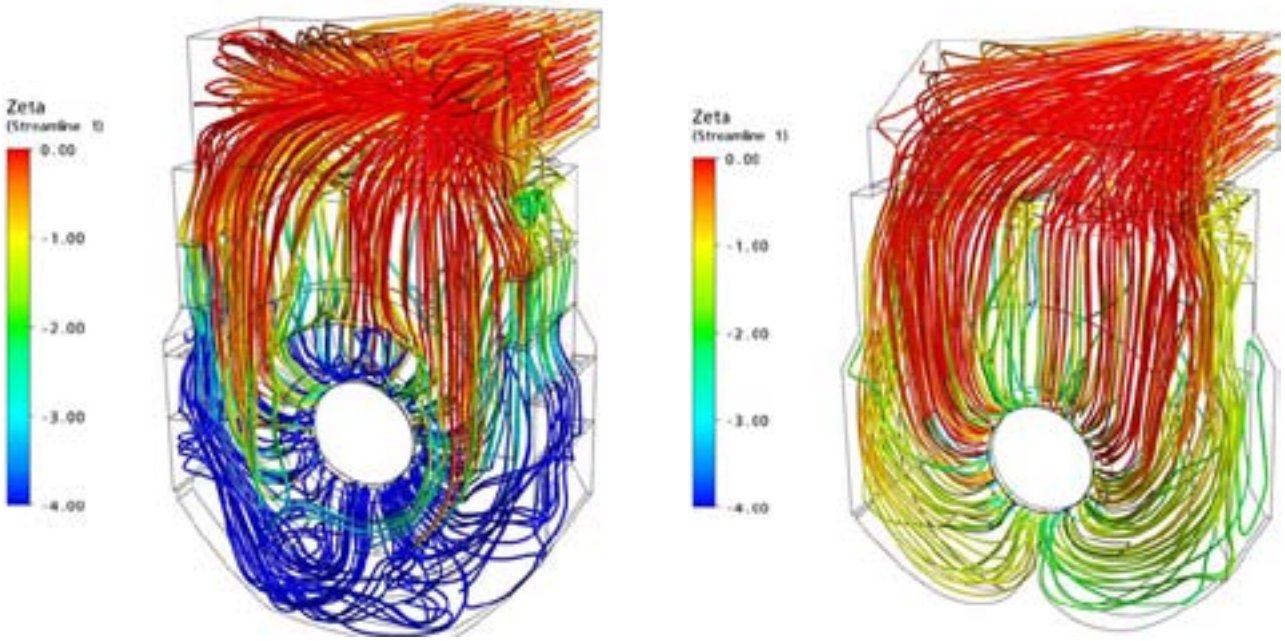
Die Wirkungsgradsteigerung soll durch eine Minimierung der Ventilationsverluste (d.h. Verluste

durch aktive Kühlung der elektrischen Leiterbahnen) erreicht werden, die gegenwärtig 40 % der gesamten Generatorverluste darstellen. Die Beiträge zur Steigerung des Wirkungsgrads sollen durch 3 Massnahmen bzw. Weiterentwicklungen erreicht werden:

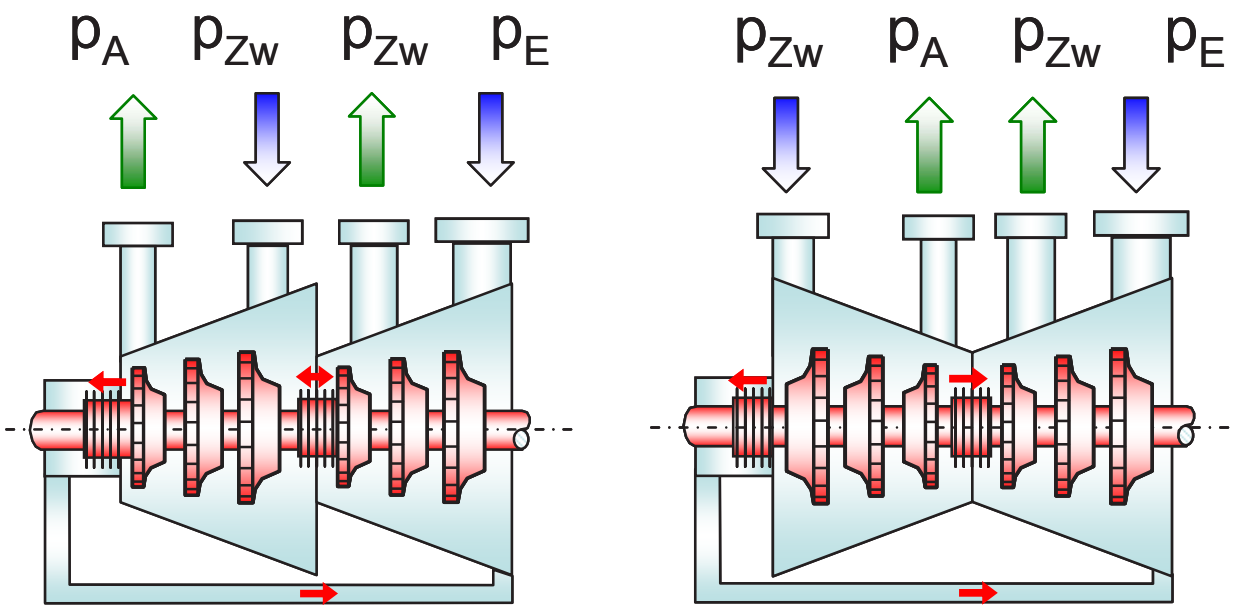
- Verbesserter Wärmetransport zwischen elektrischem Leiter und Kühlmedium durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit günstigeren Eigenschaften (höhere Wärmeleitfähigkeit und/oder höhere Durchschlagfestigkeit);
- Reduzierung des Kühlluftbedarfs durch Entwicklung eines Isolationsmaterials mit verbesserter Temperaturbeständigkeit (zulässige Materialtemperatur: 180 °C; heutiger Stand der Technik: 155 °C);
- Verbesserung des aerodynamischen Wirkungsgrads (geringere Energieaufwand) des Kühlluft-Gebläses (Lüfterrad ist direkt mit dem Generator-Rotor verbunden) durch eine optimierte Einlass-Geometrie und modifizierte Profilierung der Gebläse-Beschaufelung.

Der Schwerpunkt der Arbeiten 2009 lag bei der Inbetriebnahme des Versuchsstandes zur experimentellen Simulation der Strömungsverhältnisse im Einlauf- bzw. Ventilatorgehäuse eines luftgekühlten Generators. Der Versuchsstand (im Massstab 1:3) wurde beim Forschungspartner (Fachhochschule Nordwestschweiz, FHNW), in Brugg-Windisch) 2009 in Betrieb genommen. Um repräsentative Strömungszustände in diesem verkleinerten Massstab zu generieren, sind verglichen zum realen Apparat entsprechend höhere Drehzahlen im Modellprüfstand zu verwirklichen. Aufgrund der recht hohen Drehzahlen (9000 U/min) ist hohe Sorgfalt bei der Ausbalancierung des Rotors von Nöten, aber auch Sicherheitsvorkehrungen (Fangvorrichtungen) für sich lösende Bauteile im Falle eines Rotorschadens zu treffen. Einen Eindruck vom Versuchsaufbau liefern Fig. 1 und 2.

Im Rahmen der Aktivitäten zur Modellierung der Strömungsverhältnisse (mittels CFD-Simulationen) im Einlassbereich der Kühlluft (Zuströmung zum Ringspalt zwischen Generatorwelle und den Statorelementen), welche letztlich mit experimentellen Messdaten validiert und schliesslich zur aerodynamischen Optimierung des Ventilatorrades und der Luft-Einlassgeometrie für die Kühlluft des Generators führen sollen, wurde erstmals die Wechselwirkung von rotierenden und statischen Elementen (Rotor–Stator-Interaktion) mitberücksichtigt. Dazu wurden verschiedene, sukzessive aufwendigere Modellansätze verwendet, wie z.B. die vereinfachende Verwendung einer Mischebene zum Austausch von Daten (Randbedingungen) beim Übergang vom Rechenmodell für die rotierenden bzw. statischen Komponenten des Versuchsaufbaus (Mixing Plane Interface), als auch ein vollständig gekoppelter, instationärer Modell-



Figur 2: Stromlinienbilder des Einlaufgehäuses (Farbkodierung: Totaldruckverlustkoeffizient zeta). Links: ursprüngliche Gehäusegeometrie; rechts: optimierte Gehäusegeometrie



Figur 3: Prinzip der Verdichteranordnungen und der sich ergebenden Leckageströme.Links: In-Line-Anordnung; rechts: Back-to-Back-Anordnung

ansatz mit entsprechend vervielfachtem Rechenaufwand.

Mit Hilfe validierter Modellrechnungen (Rechenergebnisse werden mit Messwerten des statischen Drucks an der Gehäusewand und mit mittels einer pneumatischen 5-Loch-Sonde gemessenen Geschwindigkeitsprofilen verglichen) konnte bereits eine wesentliche Optimierung der Strömungsverhältnisse über eine verbesserte Führung der Strömung im Einlaufkanal erreicht werden. Die gleichmässigere Strömungsverteilung führt zu einer besseren (gleichmässigeren) Anströmung der Ventilatorblätter und vermeidet damit verlustreiche Strömungsablösungen und Wirbel. Allein mit diesen Massnahmen an der (statischen) Gehäusegeometrie sinkt der Druckverlust im Einlauf zum Generator signifikant (Druckverlust-Koeffizient bisher: 3,6, neu: 0,7), was sich schon mit einem Wirkungsgradgewinn von bis zu 0,1 Wirkungsgradpunkten auswirkt. Dies entspricht ungefähr einer Reduktion der bisherigen Verluste (für den gesamten Generator) um knapp 10 % (relativ) und übertrifft damit bereits die in den Projektzielen angestrebten Verbesserungen. Mit einer zusätzlichen Optimierung der Ventilatorblätter ist noch eine weitere Wirkungsgrad-Steigerung zu erwarten.

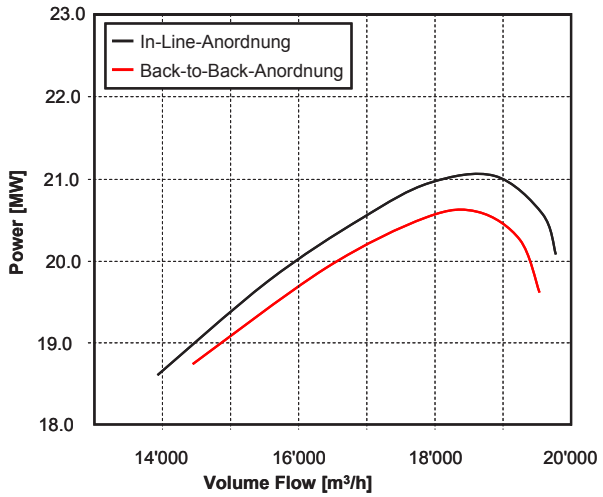
CO_2-Emissionsminderung

Im Projekt **hoch effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse** [4] werden Kompressoren weiter entwickelt, die für die Förderung der Produktgase aus Vergasungsprozessen von Biomasse (aber auch von fossilen, nicht gasförmigen Energieträgern und kohlenwasserstoffhaltigen Prozessrückständen) benötigt werden. Hoch effiziente Verdichter für solche Produktgase (auch Synthesegase genannt, da aus ihnen auch wieder «syntheti-

		Wirkungsgradsteigerung	
Massnahme		prognostiziert	ausgewiesen
Konzeptuelle Studie (Back-to-Back-Anordnung	Modul 1	0,25	1,9
Entwicklung des erforderlichen Laufzeuges	Modul 2	2,50	2,6
Optimierung des Dichtungskonzeptes	Modul 3	0,25	1,6
Optimierung des Gehäuse-Ein-/Austritts	Modul 4	0,00	(-0,03)

Tabelle 1: Erzielte und erwartete Wirkungsgradgewinne für eine Verdichterreihe, speziell ausgelegt für Brenngase (Syngase) aus der Biomassevergasung

sche» Kohlenwasserstoffe erzeugt werden können) sind eine wesentliche Voraussetzung um den Gesamtanlagen-Wirkungsgrad von sogenannten «Integrated Gasification Combined Cycle»-Prozessen (IGCC-Prozesse) zur Stromerzeugung weiter steigern zu können, da die Verdichtungsprozesse den höchsten Anteil der in neuen Kraftwerksprozessen zusätzlich aufzuwendenden Energie ausmachen. Zielsetzung des Projektes ist es, eine Synthesegas-Verdichterbaureihe zu entwickeln, die das geforderte Druck- und Volumenstrom-Spektrum möglichst effizient abdecken soll. Dazu braucht es speziell für Synthesegase (Gasgemische, die sich hauptsächlich aus Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) zusammensetzen) ausgelegte Strömungskomponenten und Laufräder, die eine der Verdichtung niedermolekularer Gase – verursacht durch den hohen Wasserstoff-Anteil – angepasste Betriebscharakteristik aufweisen. Die bearbeiteten Teilaufgaben – optimierte Anordnung, speziell ausgelegte Laufräder, optimiertes Dichtungskonzept, Verbesserung der Gehäusegeometrie am Ein-/Auslass – wurden alle sehr erfolgreich abgeschlossen und die erwarteten Zielvorgaben bezüglich eines verbesserten Wirkungsgrads allesamt erreicht bzw. übertroffen (Tab. 1).



Figur 4: Leistungsaufnahme für verschiedene Verdichter-Anordnungen

In Modul 1 wurde die sogenannte Back-to-Back-Anordnung untersucht, die inhärent geringere Leckagemengen über den Wellendichtungen aufweist. Der Wirkungsgradgewinn dieser Anordnung liegt in den unterschiedlichen Leckagemengen und deren Rückführung zum Prozessgas. Während bei der In-Line-Anordnung (Fig. 3a) der volle Austrittsdruck in einem Schritt gegenüber dem Saugdruck abgedichtet werden muss (p_A – p_E), ist es in der Back-to-Back-Anordnung (Fig. 3b) einmal die Differenz zwischen Austrittsdruck p_A und Zwischendruck p_{Zw}, und einmal zwischen diesem und dem Eintrittsdruck p_E. Für die In-Line-Anordnung bedeutet das, dass der gesamte Leckagemassenstrom nochmals verdichtet wird. In der Back-to-Back-Anordnung gilt das zwar auch, aber für einen kleineren Leckagemassenstrom. Hinzu kommt, dass die Leckagemenge von der Hoch- zur Niederdruckstufengruppe zuerst den Prozessgas-Kühler passiert, bevor sie wieder verdichtet wird. Im Gegenzug mischt sich in der In-Line-Anordnung der gesamte Leckagestrom ungekühlt mit dem Prozessgas am Eintritt der Niederdruckstufengruppe.

Welche Vorteile in thermodynamischer Hinsicht diese Anordnung bringt, sei exemplarisch an einem 9-stufigem Verdichter gezeigt (Fig. 4), bei dem nach fünf Stufen zwischengekühlt wird. Die Leistungsreduktion beträgt demnach rund 1,9 %. Das ist gleich zu setzen mit einem Wirkungsgradgewinn von 1,9 %.

Charakteristikum der in Modul 2 neu entwickelten Verdichterlaufräder (Bild 5) ist das vergleichsweise breite Kennfeld, das vor allem eine Folge der Verwendung von unbeschaufelten Diffusoren (sogenannten Low-Solidity-Diffusoren), wie auch der an das betrachtete Gas angepassten Kanalform. Betriebsbereich wie auch Wirkungsgrad sind mit den neuen Stufen deutlich besser. Der Wirkungsgradgewinn liegt bei ca. 2,6 % (Wirkungsgrad-Prozentpunkte).

Primäres Ziel der Optimierung des Dichtungskonzeptes (Modul 3) war es, im Betriebszustand eine geringere Leckage zu erzielen als mit der bestehenden Labyrinthdichtung. Dazu wurden verschiedene Materialen und verschiedene Geometrien im einem Prüfstand an der Hochschule Rapperswil untersucht, der es erlaubt, die Spaltweite zwischen den rotierenden (Laufrad) und statischen (Gehäuse-)Komponenten im Betrieb zu variieren. Die Tests zeigten, dass bei geeigneter Wahl von Material und Geometrie der Dichtspalt nahezu Null betragen kann (0,05 mm; anstatt 0,3 mm wie bei den bisher verwendeten konventionellen Labyrinthdichtungen). Das führt zu einer wesentlich kleineren Leckagemenge. Für die Back-to-Back-Verdichteranordnung (Fig. 3b) wurde im Auslegungspunkt eine Leistungsreduktion von 1,6 % erzielt, was gleichbedeutend mit einer entspre-

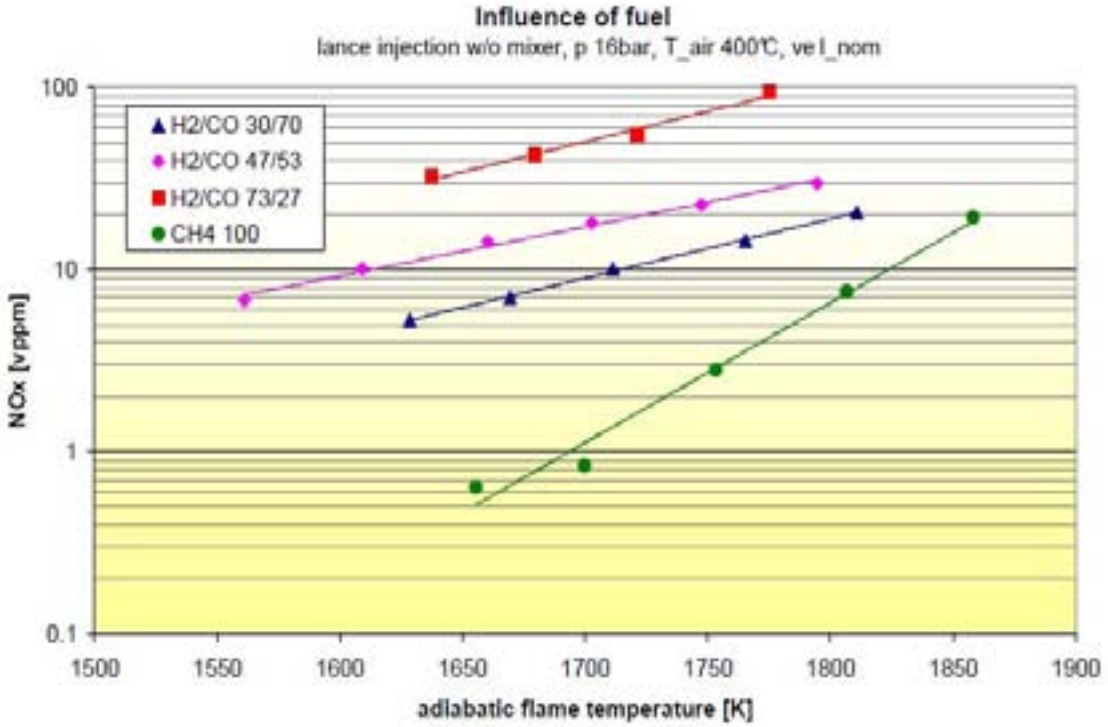
chenden Verbesserung des Wirkungsgrades von 1,6 % ist.

Im Ende 2009 gestarteten Nachfolgeprojekt **Entwicklung von integrierten Motorverdichtern für Brenngase aus Biomasse** [4] steht die Entwicklung einer Radialverdichter-Baureihe (1–6 m^3/s; 4000–20'000 m^3/h) in Form von integrierten Motorverdichtern zur Verdichtung von Rohsynthesegasen aus Biomasse im Vordergrund. Durch diese Entwicklung sollen verdichterseitig die Voraussetzungen geschaffen werden, um den aufwendigen Prozessschritt der Rohsynthesegas-Reinigung möglichst zu vermeiden. Dieser Maschinentyp soll aufgrund seines Designs inhärente Vorteile beim Umgang mit brennbaren, verschmutzten und ggf. toxischen Gasen aufweisen, wie z.B. hermetische Dichtheit (durch komplette Kapselung), geringer Platzbedarf und hohe betriebliche Flexibilität (drehzahlvariable Highspeed-Motor-Technologie), sowie geringe Unterhaltskosten (Magnetlager, komplett ölfreies Design).

Die speziellen verbrennungstechnischen Besonderheiten beim Einsatz von Syngasen in Gasturbinen-Prozessen standen im Mittelpunkt des Projektes **Verbrennung von Syngasen** [5]. Durch den hohen Anteil an Wasserstoff (H_2) weisen Syngase ganz spezielle verbrennungstechnische Eigenschaften (Flammengeschwindigkeit, Zündgrenzen usw.) auf, die bei der Auslegung von Brenner- und Brennkammer-Systemen berücksichtigt werden müssen, um einen sicheren (d.h. stabilen, nicht fluktuierenden) und emissionsarmen Betrieb zu gewährleisten. Fig. 6 zeigt beispielhafte Ergebnisse für Brenngase mit unterschiedlichem Wasserstoffgehalt, wie sie am Mini-Hochdruck(MHD)-Prüfstand der Fachhochschule Nordwestschweiz (Standort der Anlage: Alstom, Birr) erarbeitet werden können. Es wird deutlich, dass bei Brenngasen mit hohem Wasserstoffanteil die Tendenz zu (sehr) hohen NO_x-Emissionen besteht, und ein starkes Augenmerk auf die Qualität der Vormischung von Brenngas und Luft gelegt werden muss, um diese Emissionen in einem akzeptablen Rahmen (zumindest unter 25 ppm NO_x bei einem Referenz-Sauerstoffgehalt von 15 % O_2) zu halten.

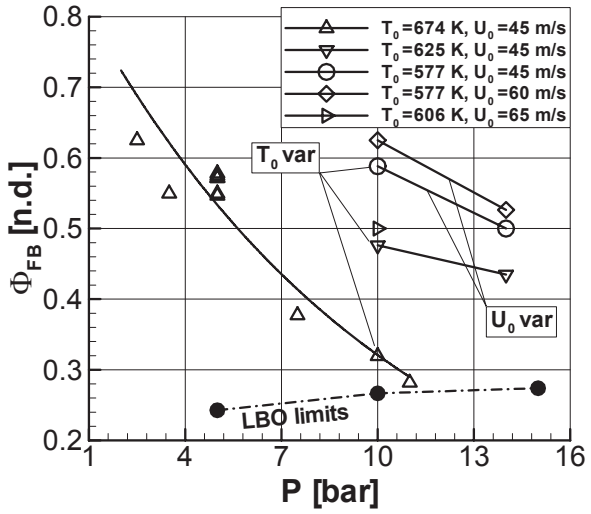
Der Betriebsbereich von Gasturbinen kann bei der Verwendung von Syngasen als Brennstoff ebenfalls deutlich eingeschränkt sein, wie die Ergebnisse in Fig. 7 aufzeigen. Weniger kritisch als bei Erdgasflammen ist dabei die Betriebsgrenze unter (sehr) mageren/brennstoffarmen Stöchiometriebedingungen ($\Phi < 0{,}3$; dies bedeutet: Brennstoff/Luft-Mischungsverhältnisse mit weniger als 30 % des Brennstoffs für optimale, vollständige Verbrennung), bei der es zu einem Verlöschen der Flamme kommen kann (Lean Blow Out, LBO). Dieses Löschverhalten ist für die am Paul Scherrer Institut (PSI) untersuchten Syngas-Flammen nur wenig vom Druck in der Brennkammer abhängig und tritt erst bei sehr mageren Mischungsverhältnissen auf ($\Phi < 0{,}3$), bei denen Erdgasflammen schon nicht mehr stabil betrieben werden können. Im Gegensatz dazu tritt bei Syngasflammen ein anderes Problem in den Vordergrund, nämlich die sichere/stabile Betriebsgrenze unter brennstoffreicheren Bedingungen ($\Phi > 0{,}45$). Diese Betriebsgrenze, die sich durch Flammenrückschlag ausweist (Flash Back, FB) ist extrem abhängig vom Druck in der Brennkammer und engt den möglichen Betriebsbereich mit steigendem Druck so stark ein, dass die Verbrennung ab Drücken über 10 bar nicht mehr stabil betrieben werden kann. Nur durch eine leich-

Figur 5: Versuchslaufräder für hohen (links) und mittleren (rechts) Durchsatz



Figur 6: NO_x-Emissionen für verschiedene Syngas-Zusammensetzungen (z. Vgl. Erdgas/Methan)

te Reduktion der Verbrennungslufttemperatur (die Verbrennungsluft erhitzt sich beim Kompressionsprozess im Verdichter der Gasturbine) um ca. 100 K kann allerdings der Betriebsbereich wieder deutlich erweitert werden, da sich die Flash-Back-Grenze bei niedrigeren Lufttemperaturen signifikant zu höheren Brennstoffanteilen ($\Phi > 0{,}45$) verschieben lässt.



Figur 7: Betriebsbereich (Stabilitätsgrenzen) für eine Syngasflamme (Gaszusammensetzung: H2/CO = 50 %/50 %)

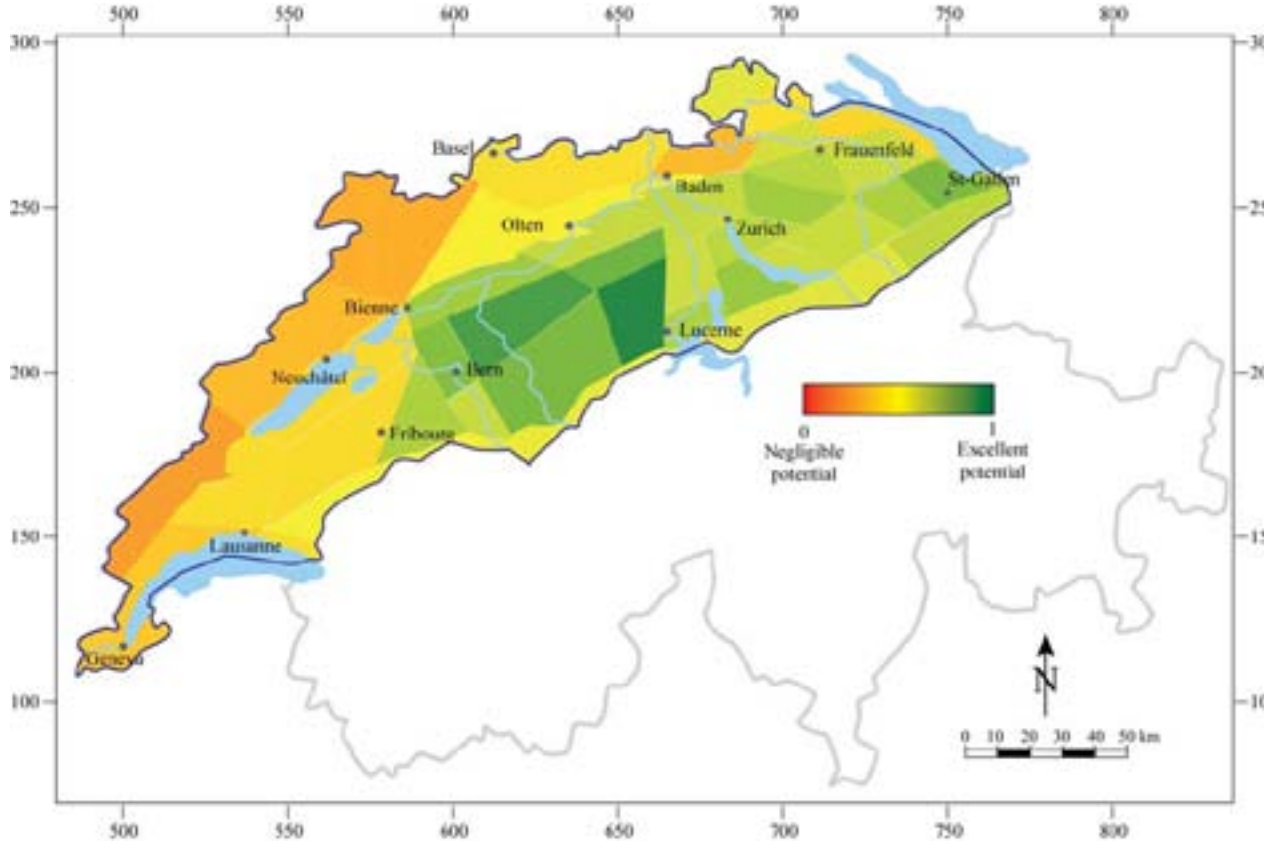
Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit (um fast 50 %) hat dagegen – auf den ersten Blick überraschend – kaum einen Einfluss auf die Erweiterung des Betriebsbereichs. Wie sich durch detaillierte zusätzliche Untersuchungen der Flammenfrontoberfläche (d.h. der Reaktionszone, in der der Hauptumsatz des Brennstoffs erfolgt) zeigt, können sich – wasserstoffhaltige – Syngasflammen sehr gut den erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten anpassen, indem sie durch eine weitergehende Auffaltung der Flammenfront zusätzliche Reaktionsoberfläche generieren und damit den durch die höhere Anströmgeschwindigkeit geforderten höheren Brennstoffumsatz kompensieren, ohne nennenswert ihren Stabilisierungsort zu ändern (d.h. ohne stromab zu driften wie dies bei Erdgasflammen der Fall ist).

CO_2- Abscheidung und - Lagerung

Die Studie **Speicherpotenzial für CO_2 in der Schweiz** [12] fokussiert sich auf das Speicherpotenzial von tief liegenden, regional ausgedehnten Aquiferen (Wasser führenden Schichten) des Schweizer Molassebecken, die gekoppelt mit einem undurchlässigen Deckgestein eine mögliche Speicherstätte für CO_2 sein könnten. Andere klassische Speicher wie erschöpfte Öl- und Gaslagerstätten, Kohleflöze oder durchlässige Basaltschichten werden in dieser Grobstudie nicht untersucht, da sie auf den ersten Blick hin nicht sehr relevant

für die Schweiz zu sein scheinen. CO_2, ein Gas mit einer durchschnittlichen Konzentration von ~ 0,3-0,4 Vol.-% (354 vppm) und einer Partialdichte von ~0,006 kg/m^3 in der Atmosphäre, wird unter hohem Druck in seine flüssige oder überkritische Phase gewandelt und mit einer Dichte von ~500–700 kg/m^3 geologisch eingelagert.

In der Schweiz gibt es drei, regional ausgedehnte mögliche Speicher- und Deckgesteinspaare; das Top des Kristallins mit dem überlagernden Gesteinsschichten des Mesozoikums, den Oberen Muschelkalk und den Oberen Malm. Gewichtete Kriterien (zum Beispiel Tektonik, Hydrogeologie, Tiefe der Speicher- und Deckgesteine, Kenntnisstand und noch andere) erlauben eine Klassifizierung möglicher Lagerstätten nach international vergleichbaren Massstäben. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Südkante des Molassebeckens und die subalpine Molasse prinzipiell attraktiv sein könnten, wobei die «sweet spots» verstärkt im Raum Fribourg–Biel bis Frauenfeld–St. Gallen zu suchen wären (Fig. 8). Mit der soeben erschienenen Synthese-Studie der Schweizerischen Geophysikalischen Gesellschaft, welche eine Neubewertung der Stratigraphie des Schweizer Molasse Beckens erlaubt, wird nun abschliessend in der ersten Hälfte 2010 ein wichtiger Datensatz hinzugezogen.



Figur 8: Qualitative Abschätzung des CO_2-Speicherpotenzials des Schweizer Molasse Beckens an Hand von international vergleichbaren Kriterien, welche das Speicherpotenzial charakterisieren

Nationale Zusammenarbeit

Die Programmziele sind anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet, weswegen eine starke Integration und Beteiligung der im angesprochenen Kraftwerksbereich tätigen Herstellerfirmen und Zulieferbetriebe unabdingbar notwendig ist. Ein zentrales Element stellen dabei die Hersteller von Turbomaschinen und Kraftwerksanlagen dar (Alstom, MAN Turbo, Turbomach), die mit ihren in der Schweiz angesiedelten Entwicklungs- und Produktionszentren den Garant für die Umsetzung der Programmergebnisse bieten und zusammen mit den in der Schweiz angesiedelten Zulieferfirmen (u.a. Sulzer, Precicast, Stellba, von Roll) sicherstellen, dass die Programmaufwendungen vorwiegend in der Schweiz wirksam werden. Daneben wird auch eine aktive Beteiligung der Strom- und der Gaswirtschaft in der Schweiz (Swisselectric, *VSG*) angestrebt, die als Anwender bzw. Versorger ebenfalls einen wesentlichen Nutzen aus der zu entwickelnden fortschrittlichen Technik ziehen sollen. Die äusserst anspruchsvollen technischen Ziele sind nur mit einem verbesserten Verständnis der technischen Zusammenhänge und auf einer erweiterten Basis von Grundlagenkenntnissen erreichbar. Diesen Beitrag zum Programmerfolg liefern die akademischen Institutionen der Schweizer Hochschul- und Forschungslandschaft (ETHZ, EPFL, Empa, PSI, FHNW, HSR, ZHW). Sie werden dabei auch ihrem Anspruch gerecht, neueste technische Erkenntnisse schnell in marktgerechte Produkte umsetzen zu helfen. Durch die hohe technische Kompetenz der im ETH-Bereich angesiedelten Forschungsinstitute – zusammen mit praxisnaher Unterstützung aus den Fachhochschulen – sind die Vorraussetzungen, einen signifikanten Beitrag zum Programmerfolg beizutragen, in nahezu idealer Weise gegeben.

Damit das Programm einen spürbaren Einfluss auf die Entwicklung der notwendigen Technologien bewirken kann, ist ein gesamtes Projektvolumen in Höhe von 15 Mio. CHF pro Jahr anvisiert (Stand Ende 2009: ca. 5 Mio. CHF). Diese Kosten werden anteilmässig von der Privatwirtschaft (Firmen und Interessenverbände finanzieren knapp 2/3 der Gesamtkosten) und öffentlichen Förderinstitutionen in der Schweiz (BFE, KTI) und Europa (7. Rahmenprogramm, FP7) getragen.

Während der **Programmjahrestagung** am 22. Juni 2009 in Bern wurden die Kontakte zwischen den verschiedenen Programmteilnehmern wieder aufgefrischt bzw. neue Verbindungen geknüpft. Die Jahrestagung gab allen Interessierten wieder die Möglichkeit, sich über die Zielsetzungen und den Stand des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen. Schwerpunktthemen der Jahrestagung 2009 waren die Forschungsprojekte, die sich mit Themen der Reduktion von CO_2-Emissionen befassen, sei es durch Einsatz von (CO_2-neutralen) Brennstoffen wie Biomasse oder durch Prozessmodifikationen zur vereinfachten Abscheidung von Kohlendioxid (CO_2). Auch die Rückhaltung von Kohlendioxid (CO_2) in geologischen Formationen in der Schweiz und der aktuelle Stand der CO_2-Gesetzgebung in der Schweiz wurden behandelt. Das nationale Netzwerk des Programms *Kraftwerk 2020* wird regelmässig in einer Jahresveranstaltung gepflegt (nächster Termin: voraussichtlich 7. Juni 2010), bei der ein Überblick über den Stand der Programmaktivitäten geboten wird und die Gelegenheit besteht, sich über die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen des Programms im Detail zu informieren und mit potenziellen Projektpartnern in Kontakt zu kommen.

Enge Verbindungen werden zum **Competence Center Energy & Mobility (CCEM-CH)** [16] des ETH-Bereichs unterhalten. Im Themenbereich *Elektrizität* im CCEM-CH besteht eine weitgehende Übereinstimmung der Zielsetzungen mit der Ausrichtung des Programms *Karftwerk 2020*. Drei Projekte im Programm *Kraftwerk 2020* (*Gasturbinenprozess optimiert für CO_2-Minderung* (GT-CO2), *Verbrennung von Syngasen* und *Carbon dioxide management in Swiss power generation* (CARMA) sind direkt mit Projekten im CCEM-CH verbunden und erhalten eine finanzielle Förderung aus ETH-Bereichsmitteln.

Sowohl das Projekt CARMA, als auch GT-CO2, welche einen breiten Bereich von Fragestellungen im Bereich der CO_2-Problematik bearbeiten (Gesamtsystemanalysen, Pre-Combustion Decarbonization, CO_2-Abscheidungstechniken, CO_2-Sequestrierung, sozio-ökonomische Fragen/gesellschaftliche Akzeptanz), und Antworten und Lösungen für die Schweiz suchen, aber auch Resultate von internationaler Bedeutung bereitstellen, sind mit Projektunterstützungsanträgen an die Forschungsförderungsorganisation von Swisselectric Re-

search[http://www.swisselectric-research.ch/D/forschungsprojekte/laufende-projekte/energiesysteme/technologies-for-gas-turbine-power-generation-with-co2-mitigation.html]

verknüpft. Es ist gewünscht und beabsichtigt diese Verbindungen weiter auszubauen und damit das Programm *Kraftwerk 2020* breit in der Förderlandschaft der Schweiz abzustützen.

Internationale Zusammenarbeit

Das Programm vernetzt vornehmlich die massgeblichen Kompetenzträger aus Industrie und akademischen Institutionen in der Schweiz, ist aber in Einzelfällen auch offen für ausländische Partner, die exklusives Know-how in Projekte einbringen können.

Weltweit werden sehr grosse Anstrengungen unternommen, um den Wirkungsgrad von gasbefeuerten Kombi-Kraftwerken zu verbessern und um auf Systemebene die CO_2-Emissionen zu senken resp. durch Abscheiden und Lagern ganz zu vermeiden. Deshalb existieren inzwischen in mehreren Ländern (Deutschland, England, Norwegen, USA, Australien, Japan) und Regionen (z.B. **Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts»** [17] der Länder Bayern und Baden-Württemberg) ähnliche (inter-)nationale/regionale Programme wie das Programm *Karftwerk 2020*, mit deren Ausrichtung und aktuellem Fortschritt ein regelmässiger Abgleich stattfindet. Durch gegenseitige Berichterstattung bei jährlich statt findenden Programmkonferenzen wird ein regelmässiger Informationsaustausch gepflegt. Gemeinsame Projekte sind aufgrund nationaler Finanzierungsregeln und komplizierter Konstellationen bezüglich Eigentumsrechten an Projektergebnissen bisher nicht konkret in Betracht gezogen worden.

Die europäische Integration wird durch die Einbettung von Projekten aus dem Forschungsprogramme *Kraftwerk 2020* im derzeit laufenden 7. Forschungsrahmenprogramm (FP7) der EU verfolgt. Die bisherige Erfahrung mit bereits erfolgten FP7-Projektausschreibungen zeigt, dass i.d.R. nur grosse Projektkonsortien (10–20 Partner) mit Projektanträgen erfolgreich sind. Daher ist es für Schweizer Partner essentiell, ein gut funktionierendes, weit gespanntes europäisches Netzwerk aufzubauen, um damit die Chance zu haben, schon im Frühstadium der Projektentwicklung miteinbezogen zu werden. Dies ist im Rahmen des **European Turbine Network (ETN)** [18] durch aktive Beteiligung an einem erfolgreichen Projektantrag (H2-IGCC) gelungen. Der offizielle Beginn des Projektes (Gesamt-Budget: 17,8 M€, Laufzeit 4 Jahre), an dem das Labor für Verbrennungsforschung des Paul Scherrer Instituts (PSI) einen wesentlichen Anteil hat, war der 1. November 2009. Die Zielsetzung des Projektes ist es, wichtige Technologien und Komponenten eines «Null-Emissions»-Kraftwerks auf Basis eines integrierten Vergasungs-Kombikraftwerks (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) mit CO2-Abscheidung zu demonstrieren. Über den Fortschritt der Arbeiten wird in zukünftigen Jahresberichten des *Programms KW2020* in umfassender Weise berichtet werden.

Durch die Beobachtung und aktive Teilnahme am Arbeitsprozess der **EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»** [19] erfolgt sowohl eine regelmässige Abstimmung der Aktivitäten mit anderen nationalen Programmen (der Programm- bzw. der Bereichsleiter haben Einsitz in der begleitenden Länderarbeitsgruppe *Government Group*), als auch die Möglichkeit der Mitgestaltung von gemeinsamen Entwicklungszielen und EU-Arbeitsprogrammen (der Programmleiter ist Mitglied der Arbeitsgruppe *Taskforce Technology*). Diese Aktivitäten sind unabdingbar, um die Entwicklungen im europäischen Umfeld frühzeitig zu erkennen, und Chancen für die Schweiz und Schweizer Partner identifizieren und ausschöpfen zu können. Da eine Realisierung von neuen Kraftwerkskonzepten im Pilot- und Demonstrations-Massstab erheblicher Finanzierungsmittel bedarf, sind solche Entwicklungsschritte nur auf internationaler/europäischer Ebene denkbar (dies kann auch im Rahmen bi- oder multi-lateraler Zusammenarbeit zweier oder mehrerer Länder erfolgen).

Über Kontakte zu themenrelevanten Initiativen der **Internationalen Energie Agentur (IEA)** [20] wie der *Working Party for Fossil Fuels* (WPFF), des *Implementing Agreement for Energy Conservation and Emission Reduction in Combustion*, des *Greenhouse Gas R&D Programme* sowie des *Carbon Sequestration Leadership Forum* (CSLF)

wird die internationale Vernetzung der Programmaktivitäten noch weiter verstärkt und damit Möglichkeiten eröffnet, durch gemeinsame Aktionen Projekte zu verwirklichen, die eine wesentlich grössere (internationale) Breitenwirkung entfalten und für die Schweiz allein sonst grundsätzlich gar nicht zu realisieren wären. Das IEA *Greenhouse Gas R&D Programme* hielt Anfang Oktober 2009 seine 36th «Executive Committee»-Sitzung in der Schweiz ab, wobei als Gastgeber das BFE und Alstom Schweiz auftraten.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Da die Programmziele anwendungs- und umsetzungsorientiert ausgerichtet sind, ist bei einigen Projekten des Programms Kraftwerk 2020 bereits ein teilweiser Pilot- und Demonstrations-Charakter im Projektumfang integriert. Spezifische Pilot- und Demonstrationsprojekte sind derzeit nicht im Programm enthalten und werden auch zukünftig hauptsächlich über privatwirtschaftliche Initiativen abgedeckt werden müssen, da die für die interessierenden Kraftwerkstechnologien notwendigen Pilotanlagengrössen (i.d.R minimale Leistungsgrösse: 50 MW) und die damit verbundenen Finanzsummen kaum über öffentliche Mittel bereit gestellt werden können.

In diesem Zusammenhang bieten ebenfalls bilaterale/internationale Kooperationen im europäischen Rahmen eine gute Gelegenheit in der Schweiz moderne Kraftwerkstechnologien zu demonstrieren, die eine Signalwirkung über die Schweiz hinaus (weltweit) ausüben. Entsprechende Möglichkeiten wären im Rahmen des Demonstrations-Programms der EU gegeben (**European CCS Demonstration Project Network** [http://www.ccsnetwork.eu), welches auf Initiative der EU Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants» im Aufbau ist. Um hier im europäischen Umfeld erfolgreich zu sein, ist aber eine (sehr) aktive Haltung der Schweizer Industrie und politischen Institutionen notwendig. Die Auswahl für die ersten (ca. 6 Einheiten) Pilot- und Demonstrationsanlagen von Null-Emissions-Kraftwerkskonzepten in Europa ist bereits weit fortgeschritten und demnächst entschieden. Diese Anlagen sollen als Vorreiter-Projekte bis zum Jahr 2015 realisiert werden und können mit einer finanziellen Unterstützung aus dem europäischen Handelsystem für CO_2-Emissionsrechte rechnen. In einer weiteren Vergaberunde können noch wenige (ca. 3) weitere Projekte mit einer Unterstützung rechnen, wenn gewisse Kriterien des Netzwerks erfüllt werden und verbliebene Technologielücken der bisher ausgewählten Projekte abgedeckt werden.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Aufgrund der mittlerweile mehr als 3-jährigen Programmlaufzeit (welche einer typischen Projektlaufdauer entspricht) war das Jahr 2009 ein Übergangsjahr in dem nun fast alle Projekte der Programmanfangsphase abgeschlossen und teils durch thematisch ähnliche Fortsetzungs-Projekte ersetzt wurden. Die bisher abgeschlossenen Projekte können mehrheitlich als recht erfolgreich bezeichnet werden. Alle Projektteams waren in erfreulicher Weise in der Lage, ihre Fachkompetenzen in den Projektarbeiten eindrucksvoll zum Einsatz zu bringen, was auch ein Verdienst der projektleitenden Partner ist, die ebenfalls sehr kompetent, professionell und umsichtig das Projektmanagement betreiben. Das Programm befindet sich nun in einer Phase der kontinuierlichen Erneuerung des Projektportfolios, welches die etwas modifizierte Ausrichtung (inkl. Carbon Capture and Storage, CCS) immer deutlicher widerspiegeln wird. Mit den neuen, 2009 lancierten Projekten wurden teilweise auch wichtige thematische Lücken (z.B. im Bereich *Schaufelkühlung*) geschlossen, so dass das Programm nun (fast) alle ursprünglich vorgesehene Themenbereiche abdeckt.

Die Zusammenarbeit bzw. die Koordination mit anderen öffentlichen Förderinstitutionen (vornehmlich der Kommission für Technologie und Innovation, KTI) konnte nicht mehr wie in den zurück liegenden Jahren gepflegt werden, dementsprechend ist der Informationsaustausch stark zurückgegangen und über den in KTI-Projekten erzielten Fortschritt kann an dieser Stelle nur noch sehr begrenzt berichtet werden. Um einen umfassenden Überblick über die Forschungsaktivitäten mit Bezug zum

Themenbereich des Programms *Kraftwerk 2020* zu gewährleisten, wäre es allerdings wünschenswert den Informationsaustausch wieder zu beleben. Das bisherige Projektortfolio ist neben der Förderung durch das Bundesamt für Energie (BFE) zu grossen Teilen der (in ähnlichem Umfang geleisteten) finanziellen Unterstützung durch die KTI zu verdanken. Da die finanzielle Ausstattung des Programms über das BFE-Budget hinter den ursprünglichen Erwartungen zurückgeblieben und 2010 sogar rückläufig ist, erscheint ein weiterer Programmausbau unrealistisch, auch wenn es gelingen sollte, durch eine stärkere Einbindung anderer Förderinstitutionen einen gewissen Ausgleich zu erreichen. Zielsetzung ist es, durch kontinuierliche Initiierung von Projekte auf nationaler Ebene über die Forschungsfonds der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft (Swisselectric Research) und der Gas- und Ölwirtschaft die Basis des Programms zu stärken. Auf internationaler Ebene werden die Projektbeteiligungen im FP7 der EU weiter sehr intensiv vorangetrieben werden müssen, um absehbar das Programmvolumen annähernd konstant halten zu können (bei ca. 5–7 Mio. CHF/Jahr).

Trotz der Konzentration der Programmaktivitäten auf Schlüsselgebiete der Dampf- und Gasturbinentechnik inkl. Generatoren kann mit dem gegebenen finanziellen Spielrahmen nur durch eine weiterhin starke Fokussierung auf einzelne Fragestellungen ein signifikanter technologischer Fortschritt bei einigen wenigen Schlüsselkomponenten erwartet werden. Mit der Erweiterung des Programmrahmens auf Themen im Bereich *Abscheidung und Rückhaltung von Kohlendioxid* (Carbon Capture and Storage, CCS) haben sich zusätzliche Chancen ergeben, das Programm noch bedeutsamer für die Entwicklung Klima-relevanter Techniken zu gestalten. Diese Programmentwicklung, die sich in einer veränderten Gewichtung der zukünftig einzusetzenden Programmmittel widerspiegelt, wird wieter fortgeführt.

Das Engagement der industriellen Partner wird auch zukünftig stark davon abhängig sein, wie die politischen Randbedingungen und die gesellschaftspolitischen Stimmungen in der Schweiz sich in Bezug auf künftige (Gross-)Kraftwerkstechnologien entwickeln, und wie die damit zusammenhängenden Fragen der Energieversorgungsbasis und der Emissionen an klimaschädlichen (Treibhaus-)Gasen wie CO_2 in der Öffentlichkeit diskutiert werden. Unter den derzeitigen (finanziellen) Rahmenbedingungen ist ein Ausbau der Projektaktivitäten auf das ursprünglich geplante Gesamtvolumen von 15 Mio. CHF pro Jahr unrealistisch. Damit einher geht die Erkenntnis, dass nicht alle relevanten Fragestellungen in ausreichendem Masse mit den in der Schweiz zur Verfügung stehenden Ressourcen und Kompetenzen bearbeitet werden können. Umso mehr Bedeutung kommt deshalb der Einbindung in und der Abstimmung mit entsprechenden Initiativen in anderen europäischen Ländern und weltweit zu. Neben der Aktivierung aller möglichen Ressourcen (Projektpartner, Finanzierungsquellen) in der Schweiz wird deshalb die Integration der Programmaktivitäten in die laufenden internationalen Anstrengungen – vor allem im europäischen Umfeld – ein noch wichtigerer Schwerpunkt der Bemühungen 2010 darstellen. In diesem Kontext wird u.a. weiter versucht werden, eines der in der Planungsphase befindlichen Gas- und Dampfkraftwerke in der Schweiz (z.B. am Standort Chavalon oder in Cornaux) im Rahmen des Demonstrationsprogramms der EU (European CCS Demonstration Project Network) als eine der ersten Pilot- und Demonstrationsanlagen mit CO_2-Abscheidung zu etablieren.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

Unter www.energieforschung.ch sind die Berichte (angegebene Projektnummern) sowie weitere Informationen verfügbar.

[1] Stefan Keller, (stefan.sk.keller@power.alstom.com), Alstom Power Turbo-Systems, Birr: **Turbogenerator mit höchstem elektrischen Wirkungsgrad (> 99 %)** (JB)

[2] Manfred Roth, (manfred.roth@empa.ch), Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübbendorf: **Beschichtete Schaufeln und Ventile in Dampfturbinen** (JB)

[3] Jürg Meier (mrj@zhwin.ch), Züricher Hochschule, Winterthur: **Hoch effiziente Dampfturbinenschaufeln («Schlanke Schaufel»)**

[4] Beat Ribi, (beat.ribi@ch.manturbo.com), MAN Turbo, Zürich: **Hoch effiziente Verdichter für Brenngase aus Biomasse** (JB)

[5] T. Griffin,(timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: **Verbrennung von Syngasen** (JB).

[6] Peter Griebel (peter.griebel@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Struktur und Brenneigenschaften von turbulenten, vorgemischten Hochdruck-Flammen** (SB)

[7] T.Griffin (timothy.griffin@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: **Gasturbinenprozess optimiert für CO_2-Minderung** (KTI-Projektantrag).

[8] S. Schenker, W. Kreutner, W. Huschmid (sabine.schenker@psi.ch), Paul Scherrer Institut, Villigen: **Laser-Diagnostik in sehr mageren Flammen** (SB)

[9] Norbert Hofmann (norbert.hofmann@fhnw.ch), Fachhochschule Nordwestschweiz, Brugg-Windisch: **Optimierter Giessprozess von Gasturbinen-Komponenten** (JB).

[10] Arnd Jung (jung@zhaw.ch), Züricher Hochschule, Winterthur: **Entwicklung von verschleissbeständigen Werkstoffsystemen für Bypassventile in Dampfturbinen bis 650 °C** (KTI-Projektantrag).

[11] Anja Skrivervik (anja.skrivervik@epfl.ch), Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, Lausanne: **Small Microwave Antenna for Rotating Turbomachinery** (KTI-Projektantrag).

[12] Jean-Louis Hersener (hersener@agrenum.ch), Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen: **Verfügbarkeit von Gras für Kombikraftwerke in der Schweiz** (BFE-Projektantrag)

[13] Marco Mazotti (marco.mazzotti@ipe.mavt.ethz.ch), Eidg. Technische Hochschule Zürich, Zürich: **CARMA – Carbon dioxide management in Swiss power generation** (CCEM-Projektantrag)

Liste der P+D-Projekte

keine

Referenzen

[14] **Konzept für das Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»**, BFE, Bundesamt für Energie BFE - Forschungsprogramm Kraftwerk 2020.

[15] **Forschungsprogramm «Kraftwerk 2020»: Ergänzung und Aktualisierung des Programmkonzepts für den Zeitraum 2008–2011**, Bundesamt für Energie BFE - Forschungsprogramm Kraftwerk 2020

[16] **Competence Center Energy and Mobility (CCEM-CH),** CCEM-CH

[17] **Forschungsinitiative «Kraftwerke des 21. Jahrhunderts»,** KW21

[18] **European Turbine Network (ETN)**, www.eu-gasturbine.org/

[19] **Technology Platform «Zero Emission Fossil Fuel Power Plants»,** www.zero-emissionplatform.eu/website/

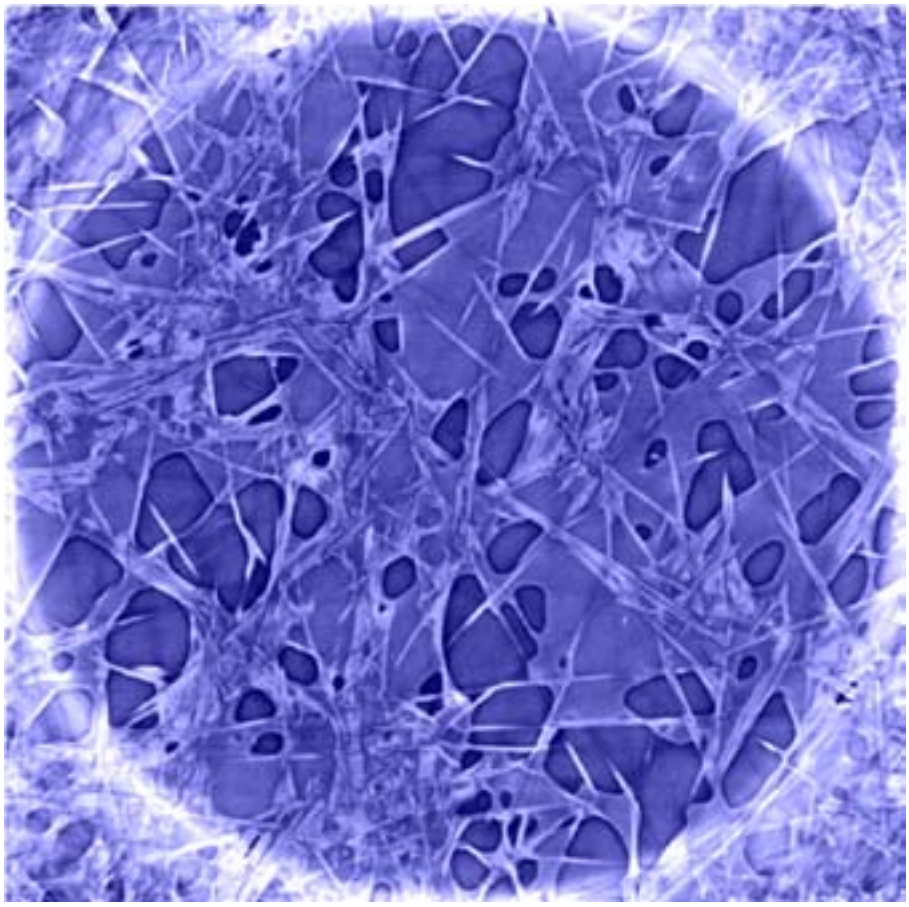
[20] **Internationalen Energie Agentur (IEA),** www.iea.org

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramme Wasserstoff und Brennstoffzellen

Stefan Oberholzer

stefan.oberholzer@bfe.admin.ch



Struktur und Wasserverteilung in der Gas-Diffusionsschicht einer Brennstoffzelle

Das Wassermanagement in Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzellen bei sich verändernder Last ist eine grosse Herausforderung. Am Paul Scherrer Institut wird die poröse Struktur der Gas-Diffusionsschichten (GDL) und das darin enthaltene Wasser mittels tomographischer Röntgenmikroskopie untersucht. Die Messungen hierzu werden an einer speziellen Beamline der Schweizer Synchrotronquelle SLS durchgeführt. Im Berichtsjahr konnte weltweit erstmals die Wasserverteilung in einer PEM-Brennstoffzelle bei laufendem Betrieb (in-situ) mit höchster Auflösung abgebildet werden. Die Aufnahme oben zeigt eine ex-situ Messung der Wasserverteilung in der GDL parallel zur Membran (horizontaler Schnitt durch die Brennstoffzelle). Der weissliche Ring repräsentiert das Sichtfeld von hier 1,5 mm mit einer Auflösung von 1,5 µm. Wasser enthaltende Poren erscheinen im Bild heller als mit Luft gefüllte. [22]

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

In einer nachhaltigen Energiewirtschaft mit einer starken Diversifikation erneuerbarer Primärenergiequellen kommt der Wahl der Energievektoren eine entscheidende Bedeutung zu. Ein intensivierter Einsatz von Elektrizität als Energieträger scheint in vielen Bereichen sinnvoll, allein schon aufgrund der Tatsache, dass etliche erneuerbare Energiequellen direkt Storm produzieren. Gleichzeitig wird dadurch die Problematik von Angebot und Nachfrage elektrischer Energie – insbesondere wenn stochastisch produziert – weiter verschärft. Kurzfristig könnte dies durch einen intelligenten Betrieb der Netzte («smart grids») sowie deren Ausbau gelöst werden [1], während längerfristig ein erhöhter Bedarf an Regelleistung und Speicherkapazität besteht [2]. Als chemischer Energieträger besitzt Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen als effiziente Energieumwandler ein grosses Potenzial, die notwendigen Kapazitäten für die Zwischenspeicherung erneuerbarer Energien zu gewährleisten.

Ein breiter Konsens besteht im Bereich der individuellen Mobilität betreffend des rein elektrischen Antriebs als effizienteste Lösung. Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicher werden in ihren Fahrleistungen (Reichweite, Schnellbetankung) an Grenzen stossen, welche nur durch den Einsatz eines chemischen Treibstoffes – z.B. Wasserstoff in Kombination mit Brennstoffzellen – langfristig überbrückt werden. In diesem Zusammenhang haben verschiedene namhafte Automobilhersteller und Energieunternehmen im Berichtsjahr durch zwei separate *Memoranda of Understanding* zum Ausdruck gebracht, dass (1) im Bereich Elektromobilität weiterhin parallel zwei Entwicklunswege – Batterieelektrisch und Brennstoffzelle – verfolgt werden, und dass (2) der Aufbau einer für eine serienmässige Produktion von Brennstoffzellenfahrzeuge unabdingbare Wasserstofflogistik gemeinsam in Angriff genommen werden soll. Wie schnell sich solche Umsetzungsabsichten schliesslich verwirklichen werden, hängt nicht zuletzt auch vom politischen Willen und den damit verbundenen Förderungsmöglichkeiten der öffentlichen Hand ab.

Parallel zu Umsetzungsbemühungen sind weiterhin grosse Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig, um Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien wirtschaftlicher werden zu lassen, und so die schrittweise Einführung in den Markt vorzubereiten. Die Herausforderungen bestehen in der Weiterentwicklung effizienter Methoden zur Produktion aus erneuerbaren Quellen, der Verteilung und Speicherung von Wasserstoff, sowie der Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Kostenreduktion von Brennstoffzellen.

In der Schweiz liegen die Schwerpunkte der Forschungsprogramme *Brennstoffzellen* und *Wasserstoff* in der materialorientierten Grundlagenforschung, in der Systementwicklung, sowie in der Demonstration und Erprobung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Pilotprojekten. Die verschiedenen Aktivitäten der Programme gliedern sich in verschiedene Untergebiete, deren Zielsetzungen sich nach den Vorgaben des *Konzepts der Energieforschung des Bundes 2008–2011* [3, 4] richten.

Wasserstoff

Nachhaltige Wasserstoffproduktion

Die Erforschung neuer Materialien, welche für die photoelektrochemische (PEC) Produktion von Wasserstoff in Frage kommen, bildet hier das zentrale Thema. Dabei wird insbesondere die Weiterentwicklung von nanostrukturierten Photoanoden auf der Basis von Eisenoxid (Hämatit) vorangetrieben.

Effiziente Wasserstoffspeicherung

Der Schwerpunkt in diesem Teilbereich bilden komplexe Metallhydride, welche als Festskörper Wasserstoff effizient in ihrem Kristallgefüge speichern können. Im Mittelpunkt stehen verschiedene Boronat-Verbindungen, welche sich durch eine besonders hohe Speicherdichte auszeichnen. Sicherheitsrelevante Fragen im Zusammenhang mit den Desorptionsprodukten und der Oberflächenreaktivität von komplexen Hydriden werden hierbei ebenfalls mitbetrachtet.

Brennstoffzellen

Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzellen für mobile Anwendungen

Bei PEM-Brennstoffzellen stehen die Reduzierung der Kosten, die Robustheit im Betrieb sowie die Verfügbarkeit der Komponenten im Vordergrund. Die Analyse von diversen Degradationsphänomenen werden durch experimentelle Messungen an Teilkomponenten und ganzen Systemen sowie mittels deren theoretischer Modellierung einge-

hend untersucht. Die Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen und die Anwendung in Nischenmärkten bilden weitere Themen.

Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) für stationäre Anwendungen

Im Bereich der Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) steht die Erhöhung der Lebensdauer für die Anwendung in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen im Vordergrund. Ähnlich wie im PEM-Brennstoffzellenbereich wird versucht, durch künstliche Alterungsbeschleunigung Degradationsphänome-ne kostengünstiger und systematischer zu untersuchen. Modellierung und Validierung kommt auch in diesem Bereich eine grosse Bedeutung zu.

Zusätzlich zu wissenschaftlichen und technischen Fokusaktivitäten werden als Ziele verfolgt:

- Gewährung der Kontinuität der wissenschaftlichen Forschung und damit Erhalt und Ausbau des Wissens am Forschungsstandort Schweiz;
- Unterstützung des Technologietransfers durch Forschungsprojekte mit Industriebeteiligung;
- Verstärkte Vernetzung von Schweizer Forschungs- und Entwicklungsprojekten durch Förderung der aktiven Zusammenarbeit in nationalen und internationalen Gremien.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Wasserstoff

In einer künftigen Energiewirtschaft mit Wasserstoff als relevantem Energieträger werden Fragen der Wasserstoffbereitstellung – (nachhaltige) Produktion, Verteilung und Speicherung – von zentraler Wichtigkeit sein. In der Schweiz sind diverse Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vorhanden, welche sich insbesondere mit der Wasserstoffherstellung durch erneuerbare Energien sowie der energetisch effizienten und sicheren Speicherung von Wasserstoff in Festkörpern wie auch als synthetische Kohlenwasserstoffe befassen.

Nachhaltige Wasserstoff-Produktion

Jährlich werden weltweit rund 500 GNm^3 Wasserstoff produziert.[1] Der allergrösste Anteil wird für den industriellen Eigenbedarf der chemischen und Erdöl verarbeitenden Industrie hergestellt und basiert auf der Reformierung von fossilen Energieträgern. Nachhaltig kann Wasserstoff über Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen, der Vergasung von Biomasse, oder durch solarthermische und photoelektrochemische Wasserspaltung produziert werden. In der Schweiz besitzt die alkalische Druckelektrolyse (30 bar) mit Wirkungsgraden von bis zu 80 % eine lange Entwicklungsgeschichte (Zdansky-Lonza-System). Dies ist einerseits auf den hohen Wasserstoffbedarf der chemischen und Material verarbeitenden Industrie (Bsp. Djeva) als auch auf die hohe Verfügbarkeit von Elektrizität aus Wasserkraft zurückzuführen. Heute wird diese Technologie von den Schweizer Firmen AccaGen und IHT Industrie Haute Technologie erfolgreich vermarktet und weiterentwickelt. In Zusammenarbeit mit der Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) erforscht letztere in einem laufenden KTI-Projekt [5] neue Materialien zur Verbesserung und möglichen Ersatz der in den Elektrolysezellen verwendeten Membranen, um die Effizienz der Elektrolyse sowie die Gasreinheiten weiter steigern zu können. IHT engagiert sich ebenfalls im Rahmen des Wasserstoffprogramms (HIA) der Internationalen Energieagentur (IEA) im spanischen Pilotprojekt ITHER [6], wo Elektrizität aus Wind- und Photovoltaik zur Langzeitspeicherung mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt wird (Fig. 1).

Während alkalische (KOH) Elektrolyseure vor allem für höhere Leistungsbereiche (1 MW und mehr) zur Anwendung gelangen, werden für kleinere Leistungen (einige kW) PEM-Elektrolyseure eingesetzt, welche sich wie die PEM-Brennstoffzellen in stetiger Weiterentwicklung befinden. Die Vorteile solcher Systeme liegen im einfacheren Aufbau sowie im guten Regelverhalten, was insbesondere für die Kombination mit Strom aus fluktuierenden Quellen vorteilhaft ist. Im Berichtsjahr startete an der École d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg (EIA-FR) in Zusammenarbeit mit Michelin recherche et Technique und der Universität

[1] Dieser Energieinhalt entspricht etwa zwei Prozent des primären globalen Energiebedarfs.

Figur 1: Alkalischer Elektrolyseur (50 kW) der Schweizer Firma IHT im spanischen Pilotprojekt ITHER. Die Aktivitäten von IHT bilden einen zentralen Beitrag im Wasserstoff Implementing Agreement der Internationalen Energie Agentur (IEA) [task24.hidrogenoaragon.org].

Freiburg ein BFE-Projekt [7] zu einem neuartigen Elektrolyseurkonzept, welches die Vorteile von alkalischen und PEM-Elektrolyseuren miteinander vereinigen möchte. Dabei sollen Ausgangsdrücke von 200 bar und mehr möglich sein. Die Kompression von Wasserstoff für die Speicherung in Druckbehältern ist auf Grund des im Vergleich zu anderen Gasen geringen Molekulargewichts relativ energieintensiv.[2] Mit einer solchen Neuentwicklung könnte die Energieeffizienz der Kette Elektrolyse–Druckspeicherung verbessert werden. Die Herausforderung liegt in den mit zunehmendem Druck ansteigenden Fremdgasanteilen (insbesondere Wasserstoff in Sauerstoff) auf Grund der unterschiedlichen Partialdrücke. Die Innovation des Projektes besteht darin, den alkalischen Elektrolyten (KOH) mit einem chemischen Additiv zu ergänzen, wodurch die Trennung zwischen flüssigem Elektrolyten und den Produktgasen auf die Elektrolysezelle eingeschränkt wird. Das chemische Additiv bildet in Kontakt mit dem Elektrolyten ein Hydrogel, welches den Elektrolyten in der Zelle zurückhält und von den Produktgasen trennt, so dass mit höheren Drücken gearbeitet werden kann. Der Elektrolyt wird dabei nicht verbraucht und muss nicht dauernd umgewälzt werden wie in einem konventionellen alkalischen Elektrolyseur. In einer ersten Phase des Projektes wurden verschiedene Additive erprobt, welche die Kaliumhydroxid(KOH)-Ionen immobilisieren sollen. Dabei führen bestimmte Zusatzstoffe zu einer markanten Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit bei höheren Konzentrationen. Es konnten jedoch bereits alternative Materialien identifiziert werden, deren elektrische Leitfähigkeit auch bei höheren Konzentrationen ähnlich gut bleibt wie beim reinen Elektrolyten.

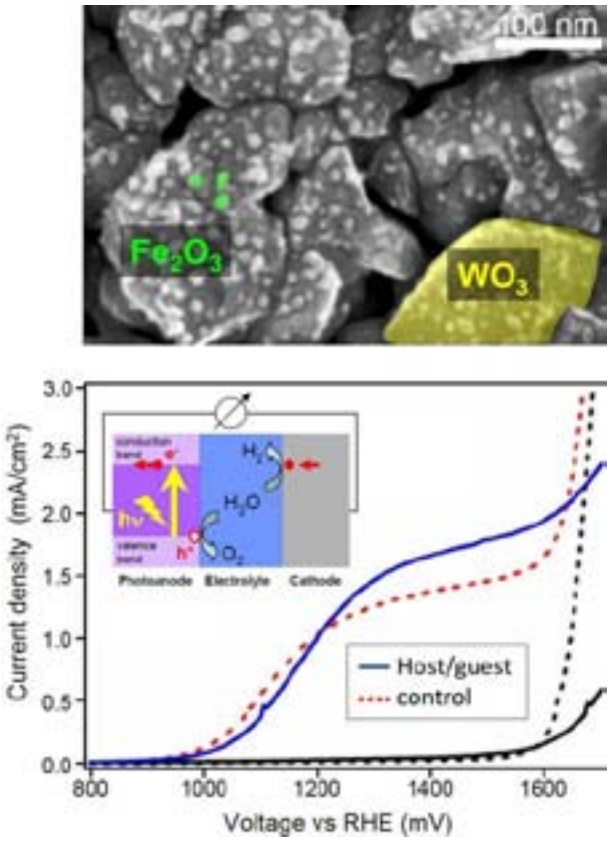
Die photoelektrochemische Wasserspaltung (PEC) als nachhaltige Methode zur Wasserstoffproduktion, mittels der Solarenergie bei Normalbedingungen direkt in Wasserstoff umgewandelt wird, bildet einen zentralen Forschungsschwerpunkt des Wasserstoffprogramms. Im Jahr 2007 wurde mit Unterstützung des BFE hierfür das Kompetenzzentrum *PEChouse* (pechouse.epfl.ch) an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) initiiert [8]. An dieses Projekt angegliedert sind Forschungsaktivitäten an der EMPA Dübendorf [9] und an der Universität Basel. In einer photoelektrochemischen Zelle zur Wasserspaltung (Fig. 2), bestehend aus einer halbleitenden Anode, einer metallischen Kathode und Wasser als Elektrolyten, wird durch Photoabsorption an der Anode der Elektrolyt Wasser zu Sauerstoff oxidiert und an der Kathode zu Wasserstoff reduziert. Von zentraler Bedeutung sind dabei die Wahl des Anodenmaterials sowie die Struktur der Anode. Die Forschung am PEC-Kompetenzzentrum der EPFL konzentriert sich auf den Halbleiter Hämatit (Eisenoxid Fe_2O_3), welcher sich auf Grund der Grösse der Bandlücke, seiner Korrosionsbeständigkeit, der Umweltverträglichkeit und auch der Kosten als ideales Material für Photoanoden in PEC-Zellen auszeichnet. Im Berichtsjahr konnten an Hämatit-Photoanoden mit Iridiumdioxid als Katalysator die weltweit bisher höchsten Photostromdichten von bis zu 3 mA/cm^2 bei einer Zellspannung von 1,3 V gemessen werden. Dies entspricht einer Erhöhung der Solar-zu-Wasserstoff-Effizienz (SHE) um 50 %, von 3 % SHE im Jahr 2006 auf 4,5 % SHE im Jahr 2009. Bis zum Projektende 2011 sollen eine Effizienz von 11 % erreicht werden. Der technologische Fortschritt konnte durch die gezielte Optimie-

[2] Verlust von 7 % des Brennwerts bei einer Kompression von 1 auf 200 bar

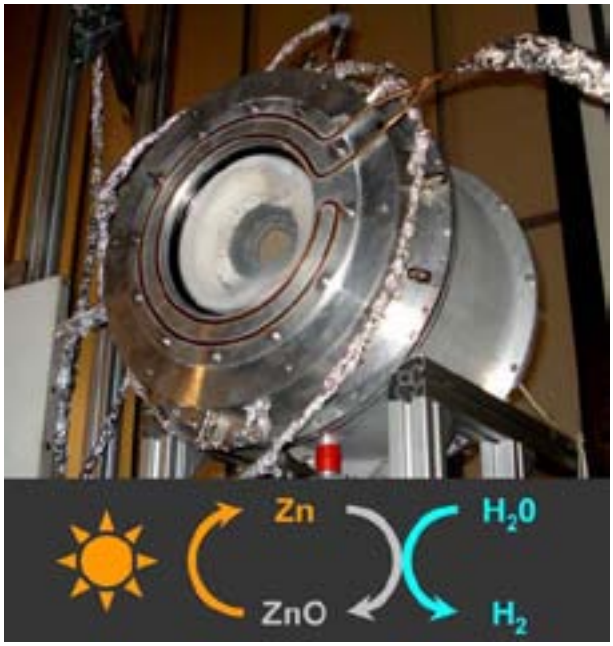
rung der Herstellungsmethode (atmosphärische chemische Gasphasenabscheidung) nanostrukturierter Hämatit-Filme erreicht werden. Weiter wird in dem Projekt an der Morphologie der Photoanode gearbeitet. Hämatit besitzt eine eher geringe Lichtabsorption und kurze Lochdiffusionslängen im Vergleich zu anderen Halbleitern. Mit Anoden bestehend aus extrem dünnen Hämatitschichten, welche auf einer Trägermatrix aufgebracht werden, können diese Nachteile teilweise kompensiert und dadurch die Effizienz weiter erhöht werden (Fig. 2).

Die PEC-Forschungsarbeiten sind eingebettet in das Projekt *nanoPEC* (nanopec.epfl.ch) des 7. EU-Forschung Rahmenprogramms unter Leitung der EPFL, woran sich acht europäische Forschungsgruppen beteiligen, darunter auch eine Gruppe der EMPA Dübendorf. Das Projekt startete Anfang 2009 und läuft drei Jahre. Am Projektende soll ein Prototyp mit einer aktiven Fläche von 100 cm^2 und einer Solar-zu-Wasserstoff-Effizienz von 7 % bereit stehen. Weiter sind die PEC-Aktivitäten Teil des Schweizer Beitrags des Task 26 im HIAder IEA.

Das Labor für Solartechnik des Paul Scherrer Instituts (PSI) arbeitet an thermochemischen Prozessen zur Erzeugung chemischer Energieträger (Wasserstoff) unter Ausnutzung von konzentrierter Solarstrahlung als Energiequelle. In einem vom BFE langfristig unterstützten Projekt [10] wird die thermische Dissoziation von Zinkoxid in einem solaren Reaktor untersucht (Fig. 3). Das dabei entstehende Zink kann in einem zweiten Prozess genutzt werden, um Wasserstoff zu gewinnen. In der aktuellen Projektphase konnte im Berichtsjahr die Optimierung des bestehenden 10-kW-Pilotreaktors erfolgen. Eine der Herausforderung liegt darin, entstehendes Zink genügend schnell abzukühlen (quenching), um eine Re-Oxidation zu verhindern. Es wurden verschiedene Quench-Einheiten getestet und es konnten hohe Zink-Erträge von 60 % gemessen werden. Die Tests wurden mit dem 15-kW-Solarsimulator am PSI durchgeführt. Im zweiten Projektteil wird der Reaktor auf 100 kW aufskaliert. Auf Grund der positiven Erfahrungen mit dem 10-kW-Reaktor starteten hier erste Simulationen und Designstudien. Gebaut wird die aufskalierte Anlage im Jahr 2010. Die anschliessenden Tests erfolgen am Solarofen des CNRS-PROMES-Forschungslabor in Odeillo (Frankreich), mit 1 MW Solarleistung eine der grössten Anlagen dieser Art. Bau und Test des 100-kW-Reaktors sind Teil eines Pilot- und Demonstrationsprojekts

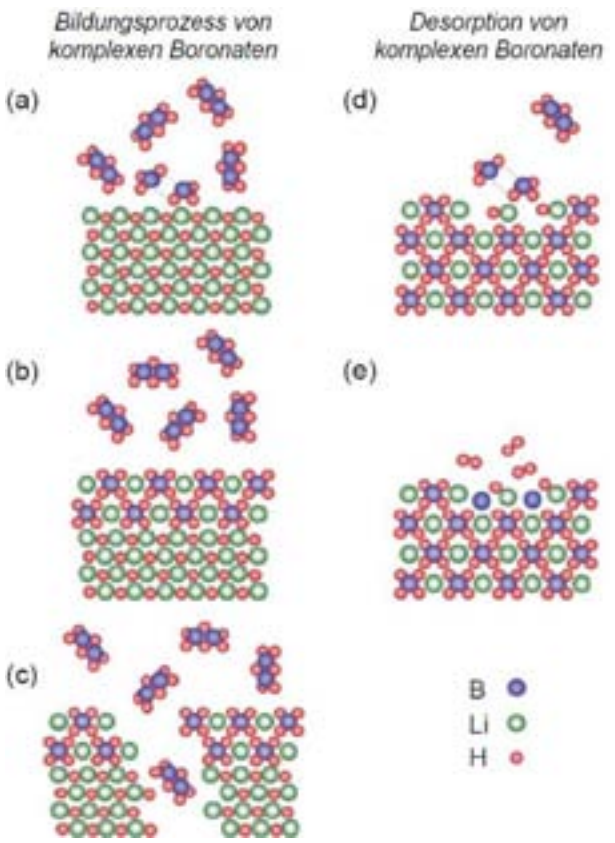


Figur 2: Konzept einer PEC-Photoanode mit 60 nm Fe_2O_3 als photoaktives Material (grün) eingebaut in eine WO_3-Trägermatrix (gelb). Der Photostrom wird dadurch um 20 % erhöht im Vergleich zur Anode ohne Trägermatrix [8].

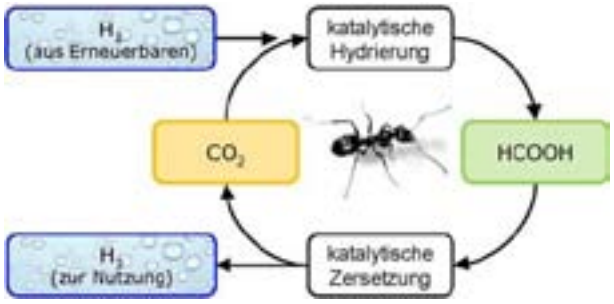


Figur 3: Pilotreaktor zur solarthermischen Gewinnung von Zink zur Wasserstoffproduktion.

des BFE [11]. Diese Arbeiten bilden den Schweizer Beitrag zur Arbeitsgruppe *Hochtemperaturproduktion von Wasserstoff* im HIA der IEA (Task 25).



Figur 4: Formierungs (a-c)- und Dekompositions (e-d)-Prozesse von LiBH4-Hydriden: (a) Di-Borane trennen sich auf beim Auftreffen auf die Li-Oberfläche (b). Es bildet sich eine Passivierungsschicht (c), welche aufbricht, sodass Di-Borane weiter in den Li-Kristall eindringen können. (d) Bei der Desorption (Freigabe von H2) werden Di-Borane zusammen mit BH3-Molekülen emittiert oder (e) Wasserstoff wird direkt abgeben, wobei die Bor-Atome im Kristall zurückbleiben [12].



Figur 5: Ameisensäure (Formalinsäure, HCOOH) hat das Potenzial, als sicherer und effizienter Wasserstoffspeicher eingesetzt zu werden. Industriell werden weltweit 350'000 Tonnen Ameisensäure pro Jahr produziert, Ameisen selbst erzeugen 1 Million Tonnen.

Wasserstoff-Speicherung

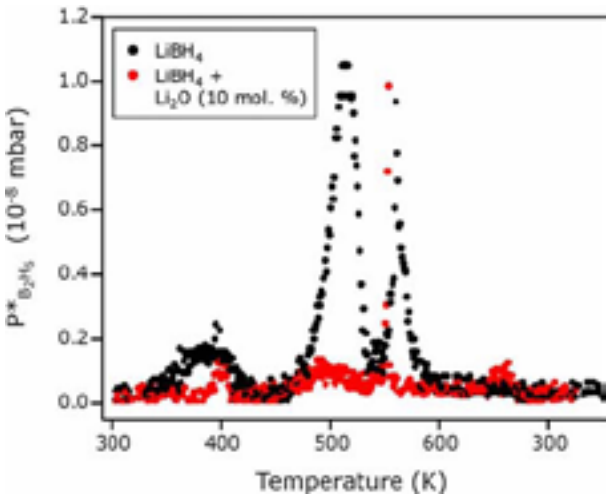
Die effiziente Speicherung von Wasserstoff bildet einen weiteren Schwerpunkt innerhalb des Forschungsprogramms. Es gibt diverse Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern: in flüssiger Form bei kryogenen Temperaturen, als komprimiertes Gas oder eingelagert in Feststoffen und Flüssigkeiten (metallische/komplexe Hydride, Kohlenstoffstrukturen, Flüssigkeiten). Die vom BFE mitunterstütze Forschung konzentriert sich hauptsächlich auf die letztgenannte Art. Die Vorteile liegen in der erhöhten Sicherheit, den geringeren Energieverlusten im Vergleich zur Komprimierung oder Abkühlung auf kryogeneTemperaturen sowie in der hohen volumetrischen Dichte. In der Schweiz arbeiten Forschungsgruppen an der EMPA, der EPFL und an der Universität Genf auf diesem Gebiet. In einem vom BFE unterstützten Projekt [12] an der EMPA werden komplexe Metallhydride wie Boronat- ($LiBH_4$) oder Alanat-Verbindungen ($NaAlH_4$) untersucht, welche theoretisch das Potenzial besitzen, Wasserstoff mit bis zu 18-Massenprozenten zu speichern. Gegenstand aktueller Untersuchungen sind dabei (1) die Kinetik sowie die energetische Effizienz der Absorptions und Desorpitionsmechanismen, (2) die Absorption an der Oberfläche und die Platzierung der Wasserstoffatome innerhalb des Materials sowie (3) die Reversibilität solcher Prozesse. Im Berichtsjahr wurden weiter grosse Fortschritte erzielt im grundlegenden Verständnis dieser Prozesse. So konnte beispielsweise erstmals $LiBH_4$ in einer Gas-Feststoffreaktion zwischen LiH und Borwasserstoffverbindungen (Boranen) unterhalb des Schmelzpunktes von $LiBH_4$ synthetisiert werden (Fig. 4). Dieser neue Syntheseprozess zeigt auf, dass insbesondere die Bildung der B-H-Verbindungen einen kinetisch hemmenden Faktor darstellen. Durch den gezielten Einsatz eines geeigneten Katalysators könnte hier der gesamte Bildungs wie auch Dekompositonsprozess beschleunigt werden. Die Arbeiten sind Teil des Schweizer Beitrags im Task 22 des HIA-IEA.

Alternativ zu metallischen Hydriden hat in den letzten Jahren die Speicherung von Wasserstoff in synthetischen Kohlenwasserstoffen vermehrt Beachtung erfahren. Auf Basis von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen synthetisch produziertes Methan wird bereits heute direkt ins Erdgasnetz eingespeist und lässt sich somit leicht zwischenspeichern, um beispielsweise für Mobilitätsanwendungen genutzt werden zu können

(www.solar-fuel.com). In der Schweiz laufen in diesem Bereich Forschungsarbeiten an der EPFL und an der EMPA. Am Labor für organometallische und medizinische Chemie (LCOM) der EPFL, teilweise in Zusammenarbeit mit der Firma Granit Green Networks, wird die relativ lange unbeachtet gebliebene Wasserstoffspeicherung in Form von Formalinsäure (HCOOH) erforscht [13] (Fig. 5). Formalinsäure kommt verbreitet in der Textil- und Nahrungsmittelindustrie zur Anwendung und wird in industriellem Massstab im Fischer-Tropsch-Verfahren hergestellt. Durch Decarboxylation kann Formalinsäure selektiv mittels Einsatz eines Katalysators bei Zimmertemperatur in CO_2 und Wasserstoff umgewandelt werden. Als nicht-toxische Substanz, welche bei Raumtemperatur und Normaldruck in flüssiger Form vorliegt, lässt sich diese leicht speichern und transportieren. Die Brennstoffzellentechnologie könnte insbesondere im Mobilitätsbereich von einem einfach handhabbaren flüssigen Treibstoff stark profitieren. Formalinsäure enthält 4,4 Massenprozente Wasserstoff, was einem Energieinhalt von 5,3 MJ/kg entspricht. Dies ist zwar deutlicher weniger im Vergleich zu Benzin, ergibt jedoch in etwa identische Speicherdichten wie bei Druck- oder Flüssigwasserstoff (inkl. Tank). Bei einer katalytischen Produktion aus CO_2 und Wasserstoff (aus erneuerbaren Energiequellen) liesse sich ein CO_2-neutraler Kreislauf erreichen. Die Forschungsgruppe an der EPFL arbeitet an Ruthenium(Ru)-basierten Katalysatoren. In den, in den Jahren 2008 und 2009 veröffentlichten Publikation wurde aufgezeigt, dass durch den Einsatz langzeitstabiler Ru-Katalysatoren Wasserstoff aus Formalinsäure mit einer Ausbeute von 90 bis 95 % gewonnen werden kann. Dabei lässt sich die Reaktionsrate so regulieren, dass ein konstanter Ausgangsdruck aufrechterhalten wird. Durch Partnerschaften mit verschiedenen Firmen wird parallel zur Forschung intensiv am Technologietransfer gearbeitet. Eine Reihe von Pilotprojekten sind in Planung, in denen diese Technologie in der Praxis getestet werden soll.

Sicherheitsaspekte von Wasserstoff

Komplexe Metallhydride wie $LiBH_4$ sind stark reaktive Materialien und können bei der Anwendung in Wasserstoffspeichersystemen eine potenzielle Gefahrenquelle bilden. In einem BFE-Projekt an der EMPA werden sicherheitsrelevante Aspekte zu Desorptionsprodukten und zur Oberflächenreaktivität



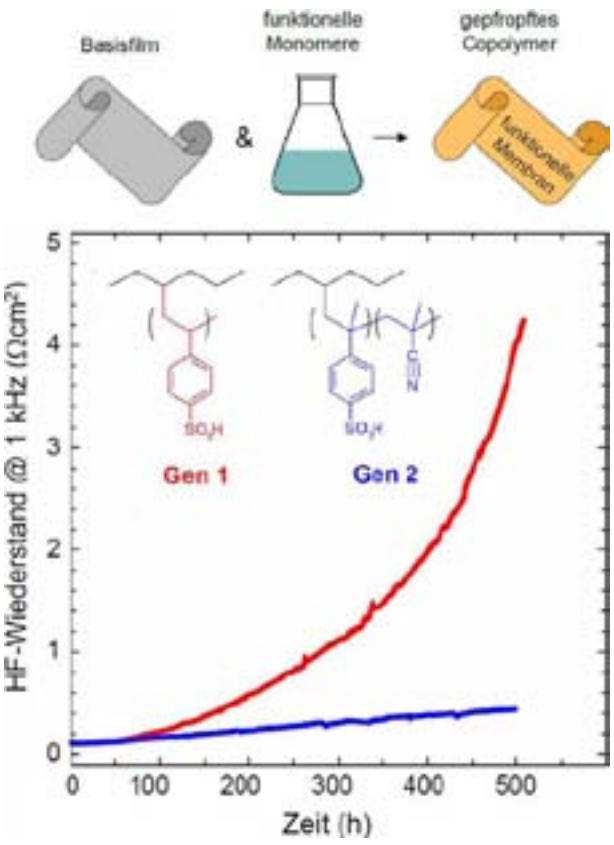
Figur 6: Freisetzung von Diboran für das komplexe Hydrid $LiBH_4$, welches als eines der unstabilsten Borhydriden das grösste Anwendungspotenzial besitzt. Die unerwünschte Freisetzung kann durch die Reaktion mit Sauerstoff (rote Punkte) deutlich reduziert werden [14].

untersucht [14]. Als Methoden werden dazu Photoelektronspektroskopie (ESCA) und Thermodesorptionsspektroskopie (TPD, temperaturaufgelöste Massenspektroskopie) eingesetzt. Nach Abschluss der Aufbauphase wurden im Berichtsjahr durch ESCA-Messungen die Oberflächenreaktivität von alkalischen Borhydriden bei Exposition mit Wasser und Sauerstoff detailliert untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Reaktivität mit Wasser allgemein um mehrere Grössenordnungen stärker ist. Mittels TPD-Analysen konnte gezeigt werden, dass die Freisetzung von (toxischem) Diboran durch die Anwesenheit von Sauerstoff stark unterdrückt wird (Fig. 6). Die Rolle des Sauerstoffs ist noch nicht wirklich verstanden, jedoch bilden diese Resultate einen wesentlichen Schritt hin zur Verhinderung der Diboranfreisetzung bei der Wasserstoffdesorption. Das Projekt bildet den Schweizer Beitrag im Task 19 *Hydrogen Safety* des HIA der IEA.

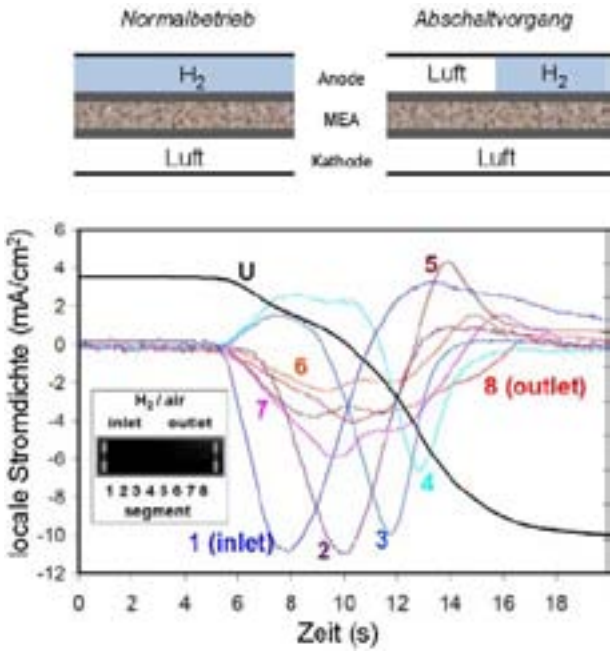
Neben Sicherheitsfragen im Zusammenhang mit Wasserstoffspeicherung in komplexen Hydriden werden in einem KTI-Projekt der Universität Genf kostengünstigere Alternativen für Wasserstoff-Leckdetektoren entwickelt. Die Arbeiten konzentrieren sich dabei auf Wasserstoff-induzierte Metall-Isolatorübergänge in dünnen metallischen Filmen [15].

Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzellen

PEM-Brennstoffzellensysteme zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und durch eine hohe Leistungsdichte aus, arbeiten bei moderaten



Figur 7: Beschleunigte chemische Alterung von Membranen in der Brennstoffzelle. Die weniger stark ausgeprägte Zunahme des Hochfrequenz-Widerstandes für die PSI-Membran der Generation 2 ist eine Folge der höheren chemischen Stabilität [17].



Figur 8: Abschaltprozesse in PEM-Zellen, bei denen die Kathode mit Luft geflutet wird, verursachen lokal negative Stromdichten, welche zu Korrosion der Katalysator-tragenden Kohlenstoffschicht führen. Die Korrosionsrate, welche durch Messung des CO_2-Anteils der Kathoden-Abgase bestimmt werden kann, hängt dabei stark von Feuchtigkeit, Temperatur und Zellspannung ab [19].

Temperaturen (<100 °C), lassen sich schnell ein- und ausschalten und zeigen hohe elektrische Wirkungsgrade. Nach wie vor steht die Weiterentwicklung der PEM-Brennstoffzelle für diverse Anwendungen von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen bis zu Fahrzeugantrieben im Vordergrund. Der wirtschaftliche Einsatz von PEM-Brennstoffzellensystemen in den kommenden Jahren hängt allerdings stark von der Steigerung der Leistungsdichte und der Lebensdauer ab. Kostengünstigere Herstellungsverfahren für die verschiedenen Komponenten der Zellen, der Elektrodenmaterialien (Katalysatoren) sowie des Brennstoffs (vornehmlich Wasserstoff oder Methanol) und den konsequenten Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur bilden unabdingbare Voraussetzungen für den breiten Einsatz dieser Technologie.

PEM-Membranen

Am Labor für Elektrochemie des Paul Scherrer Insituts (PSI) werden weltweit anerkannte Grundlagen- und Entwicklungsarbeiten im Bereich PEM-Brennstoffzellen geleistet. Das BFE unterstützt hier ein mehrjähriges Projekt im Bereich der Entwicklung verbesserter Protonen leitender Polymermembranen, welche in PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseuren als kostengünstigere Alternative zu kommerziellen Produkten Anwendung finden könnten [16]. Typischerweise werden heute in PEM-Brennstoffzellen kommerziell vertriebene Nafion-Membranen mit Kosten von mehr als 500 $/m^2 eingesetzt, was mindestens eine Grössenordnung von dem Wert entfernt ist, welcher einen wirtschaftlichen Einsatz der PEM-Brennstoffzelle ermöglichen würde. Dazu kommt, dass mit heute erhältlichen Materialien die notwendigen Lebenszeiten (> 40'000 h für stationäre und > 6'000 h für Mobilitäts-Anwendungen) nicht erreicht werden, insbesondere nicht unter realen Lastbedingungen. Die am PSI entwickelten Membranen werden über die Methode des Strahlungspfropfen von preiswerten Basis-Polymerfilmen hergestellt (Fig. 7). Dabei werden zusätzliche Komponenten (funktionale Monomere) in die Filme eingebaut, um der Membran dadurch die notwendige Funktionalität (Protonenleitfähigkeit etc.) zu verleihen. Im Berichtsjahr wurde eine zweite Generation der «PSI-Membran» entwickelt, bei welcher die Propfkomponente aus sulfoniertem α-Methylstyrol und Methacrylnitril besteht. Der damit verbundene Entwicklungsfortschritt wird parallel in

einem weiteren BFE-Projekt aufgezeigt, welches ebenfalls am PSI durchgeführt wird [17]. Ziel dieser Arbeiten ist die Identifikation von Degradationsmechanismen in strahlengepfropften Filmen, wobei chemische und mechanische Alterungsphänomene selektiv betrachtet werden können. Die chemische Alterung kann stark beschleunigt werden, wenn die Brennstoffzelle unter Leerlaufbedingungen (ohne Strom) betrieben wird. Fig. 8 zeigt einen solchen Test, wo der Hochfrequenzwiderstand für die zweite Generation der «PSI-Membranen» im Vergleich zur ersten nach 500 h Betriebsstunden deutlich langsamer ansteigt. In einer weiteren vom BFE unterstützten Doktorarbeit [18] wird die Degradation von Polymermembranen in-situ in einer unter Last stehenden Brennstoffzelle gemessen. Dazu wird der Anode zusätzlich zum Wasserstoff als Spurgas Helium zugeführt. Die Permeation des Spurgases auf dem Weg zur Kathode kann lokal an verschiedenen Stellen mittels Massenspektrometrie gemessen werden. Die Permeationsrate dient als Indikator für den lokalen Degradationszustand der Membran unter realen Bedingungen.

Lastwechselbedingte Degradationsphänomene

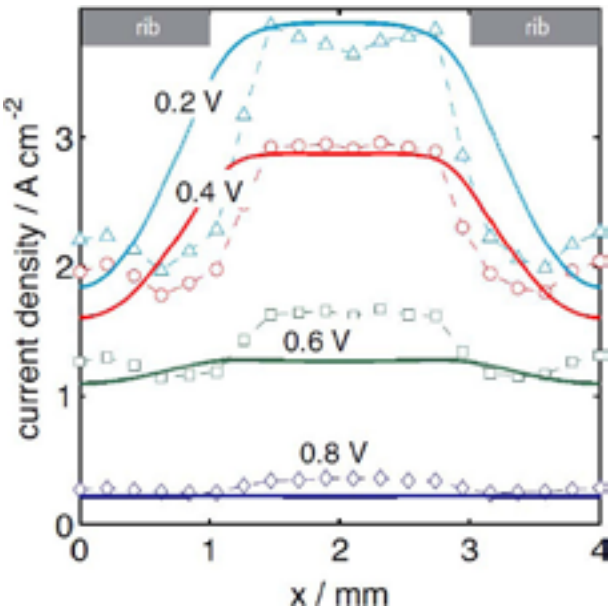
In dem vom BFE unterstützten Gemeinschaftsprojekt go.PEF-CH [19] mit dem PSI, der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (BFH-TI) sowie den Industriepartnern CEKA und MES-DEA werden Transientenphänomene in PEM-Brennstoffzellen auf verschiedenen Zeit- und Längenskalen untersucht. In Mobilitätsanwendungen sollten PEM-Brennstoffzellen mindestens einige zehntausend schnelle Lastwechsel und mehr als tausend Start/Stop-Zyklen überstehen. Im Berichtsjahr wurde die Degradation bedingt durch die Korrosion des Katalysator tragenden Kohlenstoffmaterials eingehend untersucht. Kohlenstoffkorrosion bei Start/Stop-Vorgängen wird durch die gleichzeitige Anwesenheit von Wasserstoff und Luft (Stickstoff) in der Kathode verursacht, was kurzfristig zu negativen Stromdichten führen kann. Basierend auf diesen Untersuchungen wurden belastungsarme Start/Stop-Protokolle entwickelt, welche an einem kurzen IPHoS-Stapel der Firma CEKA getestet wurden. In einem ersten Test während 1'000 Start/Stop-Zyklen wurde ein Leistungsabfall von 10 % beobachtet, wonach die Protokolle weiter optimiert werden sollen. Einige dieser Betriebsstrategien fliessen bereits direkt in das IHPoS-E System (500-W-Stapel) der Firma CEKA ein, welcher in einem aktuellen KTI-Projekt [20] in eine Minibar von Elvetino integriert wird (Fig. 9).

Figur 9: Integration eines PEM-Brennstoffzellenstapels der Firma CEKA in eine Minibar [19, 20].

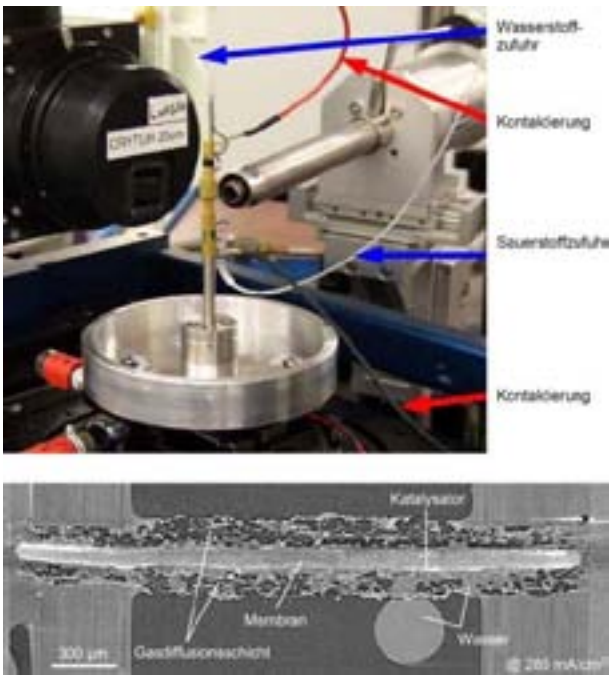
In einem zweiten Teil des Projektes werden Transientenphänomene an der Zelle lokal untersucht, in eigens hierfür segmentierten Mikro-Flussfeldern, sowie in modifizierten Stapeln der Firma MES-DEA. Degradationsphänomene treten an einer Zelle oder einem Stapel nicht überall gleich stark auf. Daher sind lokal-auflösende Methoden, welche z.B. elektrische Ströme parallel zu den Flussfeldern abbilden können, unabdingbar für ein tieferes Verständnis der zur Degradation führenden Phänomene.

Modellierung und Validation

Direkte experimentelle Untersuchungen an Brennstoffzellen sind auf Grund der Abgeschlossenheit des Systems aufwendig. Die Beschreibung mit mathematischen Modellen sowie deren Validierung mit experimentellen Daten ist daher für die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich sehr bedeutsam, da damit das Verständnis erhöht und



Figur 10: (oben) Simulierte und experimentell validierte lokale Stromdichteverteilung als Funktion der Zellspannung in einem Brennstoffzellenflussfeld. Die Stromdichte im Bereich der Gaskanäle ist bei niederen Spannungen deutlich höher im Vergleich zu den Stegen (ribs) [21].



Figur 11: Experimenteller Aufbau an der TOMCAT-Beamline am Schweizer Synchrotron SLS des PSI zur in-situ Untersuchung von PEM-Brennstoffzellen mittels Röntgentomographie (oben). xy-Querschnitt der tomographischen Rekonstruktion einer aktiven Einzelzelle (unten) [22].

Entwicklungszeiten eingespart werden können. Parallel zum *go.PEF-CH*-Projekt unterstützt das BFE im Projekt *cal.PEF-CH* der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) und des PSI Forschungsarbeiten in diesem Bereich [21]. Im theoretischen Teil des Projektes konnten die numerischen Modelle im Berichtsjahr weiter verfeinert werden, mit denen eine genaue Beschreibung der Wasserverteilung in kommerziell erhältlichen porösen Gas-Diffusionsschichten möglich ist. Weiter wurde ein 2-dimensionales Modell zur Simulation von Flussfeldern vervollständigt und experimentell validiert (Fig. 10).

Ergänzend zu theoretischen Modellierungsarbeiten werden am PSI mit verschiedensten Methoden (Impedanzspektroskopie, Zyklische Voltammetrie, Neutronenradiographie, Röntgentomographie etc.) PEM-Brennstoffzellen experimentell untersucht und so Daten zur Validierung der theoretischen Modelle generiert. In einer vom BFE finanzierten Doktorarbeit wird die Röntgen-Mikro-Tomographie zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen flüssigem Wasser und Wasserdampf in den GDL-Materialien weiter entwickelt wird [22]. Diese Arbeiten werden an der Tomcat-Beamline der Schweizer Synchrotronquelle SLS durchgeführt. Im Berichtsjahr konnte zum ersten Mal überhaupt eine laufende PEM-Brennstoffzelle mit Mikrometer-Auflösung abgebildet und der Wassergehalt in den Gas-Diffusionsschichten bestimmt werden (Fig. 11). Die am PSI entwickelte Methode ist weltweit einzigartig und erregte bereits kommerzielles Interesse von Automobilfirmen, welche im Bereich der Brennstoffzellenentwicklung aktiv sind.

Gemeinsam mit dem BFE-Forschungsprogramm *Verbrennung* wurde am PSI ein weiteres Projekt lanciert, in welchem ein allgemein anwendbares Tool zur Modellierung von thermochemischen und elektrochemischen Energieumwandlungsprozessen auf Mikro-Scala entwickelt werden soll. Die dabei angewandte Methode basiert auf dem Lattice-Boltzmann(LB)-Verfahren, welches in einer ersten Projektphase durch den Vergleich mit klassischer numerischen Strömungsmechanik (CFD) validiert werden soll. Als Endziel des Projektes soll das LB-Modell auf Gas-Diffusionsschichten in PEM-Brennstoffzellen angewendet und mit experimentellen Daten validiert werden [23].

An der Berner Fachhochschule in Biel (BFH-TI) sind grosse Kompetenzen im Bereich des Tests und der Systemintegration von PEM-Brennstoffzellen vorhanden. Im Jahr 2008 wurde hier der Aufbau eines Teststandes für Brennstoffzellen im Leistungsbereich 100 W bis 1 kW abgeschlossen.

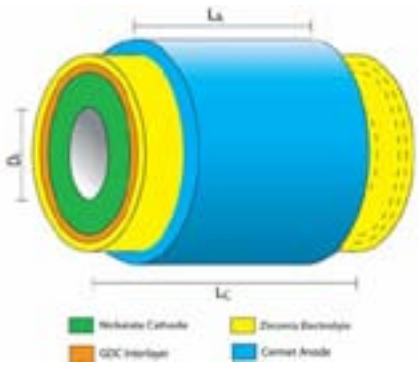
In einem kleineren Folgeprojekt wurde im Berichtsjahr dieser Teststand auf den Leistungsbereich 10 bis 100 W erweitert [24].

Im Jahr 2008 ging das PSI mit Belenos Clean Power Holding in Biel ein Joint-Venture-Abkommen ein, mit dem Ziel, ein neues Wasserstoff/Sauerstoff-Brennstoffzellensystems für einen Fahrzeugantrieb zu entwickeln. Das Projekt ist Teil des Mobilitätskonzeptes von Belenos, welches auf eine private Energieversorgung für den Individualverkehr abzielt. Im Berichtsjahr startete in diesem Zusammenhang ein von der KTI unterstütztes Projekt [25].

Feststoffoxid-Brennstoffzellen

Alle Brennstoffzellen sind energetisch attraktive Energiewandler auf Grund ihres hohen Wirkungsgrades. Im Vergleich zu anderen Brennstoffzellentypen zeichnen sich Feststoffoxid-Brennstoffzellen (SOFC) durch die höchsten elektrischen Wirkungsgrade (> 60 %), der Möglichkeit, neben reinem Wasserstoff auch Erdgas direkt nutzen zu können, sowie der anfallenden Wärme auf hohem Temperaturniveau aus. SOFCs haben ihr Potenzial vor allem im stationären Wärme-Kraft-Kopplungs(WKK)-Bereich. Weitere Applikationsmöglichkeiten liegen im Bereich der dezentralen Energieumwandlung z.B. als Auxiliary Power Units. Die Hauptherausforderung im Zusammenhang mit der Markteinführung dieser Technologie liegt neben den Kosten nach wie vor in der zurzeit noch zu geringen Lebensdauer. Für den kommerziellen Einsatz in WKK-Sytemen sollten SOFC-Stapel eine Mindestlebensdauer von 40'000 Stunden aufweisen. Die Materialdegradation als limitierender Faktor der Lebensdauer von SOFC wird in dem nationa*SOF-CH* [26] sowie im europäischen ERA-Net-Projekt *AccelenT* [27] eingehend untersucht.

Das Projekt *SOF-CH* [11], welches von *Swisselectric Research* und dem BFE gemeinsam unterstützt wird, vereint alle Schweizer Hauptakteure aus Forschung und Industrie im Bereich der SOFC (EPFL, EHTZ, ZHAW, Hexis und HTceramix). Angestrebtes Projektziel ist eine Reduktion der Degradation bis Ende 2010 auf 3 % pro 1000 Betriebsstunden. Dadurch würde die Lebenszeit des Stapels auf rund 20'000 Stunden erhöht, was je nach Betriebsart ein Wechsel des Stapels alle zwei bis vier Jahre bedeuten würde. Die Forschungsarbeiten im Projekt SOF-CH teilen sich auf in einen



Figur 12: Schematische Darstellung einer Mikrotubularen SOFC-Brennstoffzelle [28].

rein experimentellen und in einen Modellierungsteil. Im Berichtsjahr konnten in allen Arbeitspaketen gute Fortschritte erzielt werden. So konnte im Kathoden-Projektteil eine direkte Korrelation zwischen der Degradationsrate und der Schichtdicken sowie der keramischen Zusammensetzung der Lanthan-Strontium-Manganoxid-Elektroden aufgezeigt werden. In den Arbeiten, welche sich auf die Redoxstabilität der Anode konzentrieren, wurden mikrostrukturelle Veränderungen im Nickel-Keramik-Netzwerk beobachtet. Die Resultate aus diesem Projekt fliessen zwar nicht unmittelbar in die aktuellen Produktverbesserungen der beteiligten Firmen ein, sind jedoch mittelfristig wichtige Erkenntnisse zur Erhöhung der Langzeitstabilität der SOFC-Stapel.

Dasselbe Projektkonsortium arbeitet in dem im Jahr 2008 gestarteten ERA-Net-Projekt *AccelenT* zusammen. Der Schweizer Anteil an diesem europäischen Projekt wird durch das BFE unterstützt. Europäische Partner sind das Forschungszentrum Jülich und das Europäische Zentrum für Energieforschung Eifer (DE), das finnische Forschungszentrum VTT sowie die Industriepartner Plansee (AT) und Kerafol (DE). Ziel dieses Projektes ist es, beschleunigte Testverfahren für SOFC zu entwikkeln, um die Degradation effizient studieren zu können. Auf diese Weise können kostspielige Langzeitstudien minimiert werden.

Im Berichtsjahr startete an der EPFL eine vom BFE unterstützte Doktorarbeit [28], welche die Machbarkeit einer Kathoden-getragenen mikrotubularen SOFC-Brennstoffzelle aufzeigen soll, wobei gleichzeitig ein neues Kathodenmaterial entwickelt wird. Planare Konzepte sind heute normalerweise Anoden-getragen und erreichen grosse Leistungsdichten (Fig. 12). Jedoch bestehen hier

weiterhin zum Teil Probleme im Bereich der Reoxidation der Anode und der Dichtung der Systeme. Tubulare Systeme sind allgemein einfacher zu dichten und operieren zuverlässiger, besitzen jedoch kleinere Leistungsdichten. Das Konzept der mikrotubularen SOFCs soll Vorteile von tubularen und planaren Systemen in sich vereinigen. Im Berichtsjahr wurden poröse Kathoden-Röhrchen durch Pressen und Extrusion hergestellt. Die Mikrostruktur der gefertigten Röhrchen wurde eingehend analysiert, um Parameter wie Tortuosität und Porosität zu extrahieren. Erste elektrochemische Messungen an einzelnen Röhrchen wurden bereits durchgeführt.

Die Kleinfirma Fiaxell aus Lausanne, welche Materialien für SOFC-Brennstoffzellen entwickelt, wurde im Berichtsjahr vom BFE mit zwei verschiedenen Projekten unterstützt, wobei die EPFL und die Hexis ebenfalls Projektpartner sind. Im ersten der beiden Projekte wird eine glasfreie kostengünstige Dichtungspaste für SOFC-Stapel entwickelt [29]. Die Dichtung von Hochtemperaturbrennstoffzellen ist allgemein problematisch. Erste Tests an Hexis-Stapel zeigten Erfolg versprechende Ergebnisse. Im zweiten Projekt von Fiaxell werden Anoden-getragene Zellen weiterentwickelt und validiert, welche mindestens zehn Redox-Zyklen unbeschädigt überstehen sollen [30]. Auch hier sind die Resultate viel versprechend.

Mikrobielle Brennstoffzelle

Das BFE unterstützte im Berichtsjahr zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt eine technische Machbarkeitsstudie an der Fachhochschule in Sion (HES-SO Valais) zur Rückgewinnung von Phosphat aus ausgefaultem Klärschlamm mit Hilfe einer mikrobiellen Brennstoffzelle [31]. Es handelt sich hier nicht um ein wirkliches Energieprojekt im Sinne der effizienten Energieumwandlung, jedoch muss hier zur Remobilisierung des Phosphats von aussen keine elektrische Energie aufgewendet werden. Die produzierten Konzentrationen reichen aus, um zu einem Dünger weiterverarbeitet zu werden.

Brennstoffzellen für portable Anwendungen

Die aus einem BFE-Projekt entstandene Entwicklung eines PEM-Ministapels für den Leistungsbereich um 50 W wird auf privater Basis weitergetrieben (Fumey Fuel Cell Technology, Steffisburg). Ebenfalls auf den Anwendungsbereich der portablen Stromversorgung abzielend läuft an der ETH Zürich weiterhin das CCEM-Projekt ONEBAT, in welchem eine mit Flüssiggas betriebene SOFC-Mikro-Brennstoffzelle im Leistungsbereich um 2,5 Watt entwickelt wird.

Nationale Zusammenarbeit

Die nationale Zusammenarbeit zwischen Projektnehmern wurde auch im Berichtsjahr 2009 weiter gepflegt. In vom BFE unterstützen Projekten bestehen verschiedene Arbeitsnetzwerke zur solaren Wasserstoffproduktion mittels Photoelektrochemie (PEChouse, pechouse.epfl.ch), zu Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEF-CH) sowie zu Feststoffoxid-Brennstoffzellen: SOF-CH. Das PEChouse-Konsortium organisierte im Berichtsjahr einen «PEC-Industry Day», an welchem die Forschungsarbeiten interessierten Industrievertretern aus dem Technologiebereich *Wasserstoff und Brennstoffzellen* vorgestellt und erste Kontakte für eine weiter führende Zusammenarbeit geknüpft wurden.

Die meisten Schweizer Akteure im Bereich Wasserstoff- und PEM-Brennstoffzellentechnolgie – sowohl aus der Forschung als auch aus der Umsetzung – sind in der nationalen Wasserstoffvereinigung Hydropole (www.hydropole.ch) organisiert. Hydropole repräsentiert regelmässig die Schweizer Wasserstoff- und PEM-Brennstoffzellen-Aktivitäten weltweit mit eigenen Ständen an wichtigen Konferenzen und Ausstellungen, so etwa an der *Fuel Cell Expo 2009* in Japan und am *World Future Energy Summit* in Abu Dhabi.

Im Berichtsjahr fand in Braunwald bereits zum dritten Mal das Symposium *Hydrogen and Energy* statt, welches sich als Informationsplattform für Themen aus der Grundlagenforschung und der Technologie im Bereich Wasserstoff etabliert hat.

Internationale Zusammenarbeit

Die Schweiz beteiligt sich am Implementing Agreement (IA) *Advanced Fuel Cells AFC* (www.ieafuelcell.com) der Internationalen Energie Agentur (IEA). Das Implementing Agreement beinhaltet sechs verschiedene Tasks, welche technologische und anwendungsspezifische Themen in den Bereichen Polymer Fuel Cells (PEFC), Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) und Molten Carbonate Fuel Cells (MCFC) abdecken. Momentan sind 18 Länder an diesem IA beteiligt. Im Berichtsjahr wurde das Implementing Agreement durch das Governing Board der IEA (CERT) für eine weitere Laufzeit von fünf Jahren bewilligt.

Neben der Mitarbeit im Executive Committee des IEA-AFC durch das BFE beteiligt sich die Schweiz aktiv in Task 18 (neu Task 25) *Solid Oxide Fuel Cells* [24], vertreten durch die Firma HTceramix (Yverdon), sowie im Task 19 (neu Task 26) *Fuel Cells for Stationary Applications* [25], vertreten durch *Beratung Renz Consulting* (Basel). Hier leitet die Schweiz den Subtask 1 *Market Outlook*, welcher sich zum Ziel setzt, im Bereich stationäre Anwendungen wichtige Märket, länderspezifische Bedürfnisse betreffend Produkt- und Sevicedesign, sowie Kostenstrukturen und Business-Konzepte zu analysieren. Im Berichtsjahr wurde hier mit Unterstützung des BFE ein Report publiziert [32].

Das Wasserstoffprogramm (HIA) der IEA (www.ieahia.org) bildet eine Hauptplattform der internationalen, vorkommerziellen Forschungszusammenarbeit im Bereich Wasserstoff. Die Schweiz beteiligt sich seit 1977 in diesem Implementing Agreement und ist mit entsprechenden Projekten in diversen Tasks aktiv. Anfang 2009 wurde das IA vom CERT ebenfalls für eine weitere Laufperiode bewilligt mit einem entsprechend überarbeiteten *Strategic Plan*. Neben der Vertretung im Executive Committee durch das BFE forschen Schweizer Akteure in den folgenden Tasks: Task 22 *Fundamental and Applied Hydrogen Storage Materials Development*, vertreten durch die EMPA Dübendorf; Task 24 *Wind Energy and Hydrogen Integration*, vertreten durch die Firma IHT; Task 25 *High Temperature Processes for Hydrogen Production*, vertreten durch das PSI; sowie Task 26 *Advanced Materials for Hydrogen Waterphotolysis*, vertreten durch die EPFL und die EMPA.

Joint Technology Initiative Fuel Cell and Hydrogen (FCH JTI)

Die Anfang 2008 von der EU-Kommission und der Industrie (European Industry Grouping) lancierte *Fuel Cell and Hydrogen Joint Technology Initiative* (FCH JTI, ec.europa.eu/research/fch) hat eine geplante Laufzeit bis Ende 2017. Hauptthemen sind Grossdemonstrationsprojekte im Mobilitätsbereich inklusive Wasserstofflogistik sowie die Entwicklung eines standardisierten europäischen Brennstoffzellenstapels. Auf angewandte Forschung und Demonstration fokussiert sind die Aktivitäten im stationären Bereich. Zudem sollen vorteilhafte Marktkonditionen (Codes and Standards) aufgebaut und etabliert werden.

In der Industriegruppe mit 58 Firmen sind die Schweizer Firmen Hexis und HTceramix (SOFC Power) als Mitglieder dabei. Im *European Research Grouping* (N.ERGHY, www.nerghy.eu) ist die Schweiz durch die EMPA und das PSI vertreten. Über die *States Representatives Group* wird versucht, die Forschungsprogramme der einzelnen Länder einzubinden. Die FCH JTI versucht, die Zusammenarbeit mit einzelnen Regionen und Gemeinden zu verstärken, welche seit 2008 im Netzwerk HyRaMP *Hydrogen Regions and Municipalities Partnership* koordiniert sind (www.hy-ramp.eu). Aktuell gibt es hier noch keine Schweizer Beteiligung. Allgemein ist die FCH JTI im Berichtsjahr spürbar aktiv geworden. Neben dem Aufbau eines offiziellen Offices in Brüssel wurden auf der Basis des *Multi-Annual Implementation Plan 2008–2013* [33] zwei Ausschreibungen realisiert. In den Jahren 2008 und 2009 standen hierfür 28 bzw. 70 Mio. Euro zur Verfügung, 2010 werden es 90 Mio. Euro sein. Aus der Schweiz haben sich verschiedene Insitutionen besonders im Brennstoffzellenbereich stark an den Ausschreibungen beteiligt. Von der ersten Ausschreibung 2008 her sind sechs Brennstoffzellenprojekte mit Schweizer Beteiligung am anlaufen (DEMMEA, Auto-Stack, NextHyLights, ROB-ANODE, GENIUS, ASSENT). In der zweiten Ausschreibung 2009 wurden acht Projekte mit Schweizer Institutionen als Partner oder Projektleader in einer ersten Evaluationsrunde gutgeheissen. Diese Projekte befinden sich jetzt in der Verhandlungsphase (FITUP, MobyPost, Asterix 3, Lotus, Ramses, SOFC life, SOFC design, Adel).

EU-Forschungsrahmenprogramme

Schweizer Projektpartner beteiligten sich ebenfalls aktiv an Projekten aus den EU-Forschungsrahmenprogrammen. Im SOFC-Bereich laufen die Projekte *FlameSOFC*, *SOFC600* und *FCTESQA* aus dem 6. Rahmenprogramm mit Schweizer Beteiligung weiter. Im Wasserstoffbereich sind dies die Projekte EU-*SOLZINC*, *NESS-HY*, *SOLHYCARB*, *NanoPEC* und *SOLARH2*.

Tagungen

Im Berichtsjahr fand in Luzern wiederum das internationale *European Fuel Cell Forum* statt. Die Zukunft dieses Anlasses ist momentan noch offen, es laufen jedoch Bestrebungen, diese wichtige Veranstaltung künftig weiterhin in Luzern durchführen zu können. Weiter fand im Frühjahr 2009 in Karlsruhe die sechste Ausgabe der vom BFE initiierten Symposiumsreihe *Fuel Cell Research Symposium: Modelling and Experimental Validation* mit reger Schweizer Beteiligung statt.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Demonstrationsprojekte in den Bereichen Wasserstoff und Brennstoffzellen sind aus Gründen hoher Investitionskosten und limitierter Verfügbarkeit von Wasserstoff schwierig zu realisieren. Trotzdem wurden im Berichtsjahr ein paar wenige Umsetzungsprojekte erfolgreich weitergeführt oder neu gestartet.

Figur 13: (oben) Wasserstoff-Kommunalfahrzeug «Bucher CityCat H2». (unten) Mobile Wasserstofftankstelle auf dem Werkhofareal in Basel [33].

Wasserstoff

Anfang 2009 konnte das im CCEM-Projekt *hy.muve* unter der Leitung der EMPA entwickelte Wasserstoff-Kommunalfahrzeug *Bucher CityCat H2* fertig gestellt werden, welches im Mai 2009 mit einem grossen medialen Echo der Öffentlichkeit präsentiert wurde (www.empa.ch/hy.muve). Ursprünglich geplant war ein erster Praxiseinsatz ab Mitte Jahr, allerdings wurde dieser auf Grund technischer Probleme auf Ende 2009 zurückgestellt. Insgesamt konnte das Fahrzeug lediglich einzelne Tage im Reinigungsbetrieb eingesetzt werden. Die wenigen Einsätze zeigten allerdings bereits, dass das Konzept von der Auslegung her gut funktioniert und die beabsichtige Halbierung des Energieverbrauchs erreicht wird. Ebenfalls positiv zu werten ist, dass die Wasserstoff-Betankungsanlage von Messer Schweiz und die Gesamtfahrzeugregelung von Anbeginn weg sehr gut funktionierte (Fig. 13) [34].

Im Berichtsjahr wurde die Machbarkeitsstudie *Hydrogène dans les ports (H2port)* [35] an der HEIG-VD in Yverdon abgeschlossen. In dem Projekt wurden die Ressourcen evaluiert, welche für den verbreiteten Einsatz von mit Wasserstoff betriebenen Kleinbooten wie das Hydroxy 3000 notwendig wären. Es konnte gezeigt werden, dass erst ab einem Wasserstoffverbrauch von mehr als 500'000 Nm^3 (~ 1.5 GWh) eine lokale Produktion im Hafen öko-

nomisch sinnvoll ist. Bei einer Antriebsleistung von 9 kW pro Boot würde dies einer Flotte von mehr als 800 Booten entsprechen, welche im selben Hafen betankt würde. Im experimentellen Teil des Projektes wurden kommerziell erhältliche Anlagen zur Produktion von Wasserstoff in kleinem Umfang getestet. Die Tests haben gezeigt, dass zurzeit auf dem Markt keine geeigneten Produkte vorhanden sind, um kleinere Mengen Wasserstoff über Elektrolyse und Druckspeicherung zu produzieren.

Ebenfalls im Berichtsjahr abgeschlossen wurde das an der Luzerner Hochschule für Technik & Architektur (HTA) durchgeführte Projekt zur unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) von GSM/-UMTS-Basisstationen der Swisscom mit Brennstoffzellen und Wasserstoffversorgung [36]. Insgesamt wurden bis im Juli 2009 seit Beginn des praktischen Teil des Projektes im Jahr 2006 rund 350 Start/Stops simuliert bzw. gemessen mit einer totalen Betriebszeit von 95 h. Sowohl bei geplanten wie auch ungeplanten (Unwetter) Unterbrüchen hat sich die USV-Anlage sehr gut bewährt und der Funktionsnachweis kann als 100 % zufrieden stellend gewertet werden. Die Hydrogenics-Brennstoffzelle zeigte im Laufe des Projektes (3 Jahre) eine zu erwartende Degradation von 3 % auf. Momentan ist ein Nachfolgeprojekt in Planung und es wurde zusammen mit europäischen Partnern ein entsprechender Antrag (FITUP) auf einen Call des *JTI Fuel Cell and Hydrogen* eingereicht.

An der EMPA wurde im Projekt *SELF* ein energieautarker Wohncontainer entwickelt, an welchem innovative Technologien und Materialien für Gebäudehüllen praktisch erprobt werden. Der Container wurde im Berichtsjahr fertig gestellt und an Ausstellungen der Öffentlichkeit präsentiert. Um eine energetische Langzeitautarkie zu erreichen, wird mit solarem Überschussstrom durch Elektrolyse Wasserstoff produziert, welcher in Metallhydriden zwischengespeichert und bei Bedarf zum Kochen benutzt wird. Bei dem dabei eingesetzten katalytischen Brenner, welcher aus einer Platin-beschichteten porösen Keramik besteht, wird Wasserstoff ohne zusätzliche Zündquelle verbrannt, wobei im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen keinerlei schädliche Abgase entstehen (Fig. 14). Die Entwicklung des katalytischen Wasserstoffbrenners und die Anwendung von Wasserstoff als Langzeitspeicher im *SELF*-Projekt werden vom BFE unterstützt [37].

Figur 14: In der an der EMPA entwickelten SELF-Raumzelle wird der überschüssige Strom aus der Photovoltaikanlage benutzt, um elektrolytisch Wasserstoff zu erzeugen, welcher in einem katalytischen Brenner zum Kochen benutzt wird. Durch die saisonale Energiespeicherung mit Wasserstoff wird eine grosse Autarkie erreicht [37, www.empa.ch/self].

Brennstoffzellen

Im Bereich der stationären Anwendung von Feststoffoxid-brennstoffzellen (SOFC) besteht auf Grund des grossen technologischen Fortschrittes (Robustheit und Langzeitstabilität) ein vermehrtes Interesse an Stapel höherer Leistungen von 2,5 bis 10 kW, welche nicht für Wärme–Kraft–Kopplungssysteme in Eigenheimanwendungen eingesetzt werden sollen, sondern eher für industrielle Anwendungen konzipiert sind. Aufbauend auf Arbeiten im europäischen Projekt *Flame-SOFC* arbeitet die Firma HTceramix in Yverdon in einem vom BFE unterstützten Pilotprojekt daran, einen bestehenden 2,5-kW-Stapel zu einem 5-kW_{el}-

System aufzuskalieren [38]. Hierzu wird in dem Projekt ein geeigneter Teststand aufgebaut und validiert, um die Leistungsmerkmale des aufskalierten Stacks unter verschiedenen Betriebsbedingungen testen zu können. Im Berichtsjahr wurde das Testsystem aufgebaut und mit einem 20-Zellenstapel von 1,85 kW betrieben und validiert.

Seit Ende 2008 läuft in Deutschland der breit angelegte Praxistest *Callux* (www.callux.net) für Brennstoffzellensystemen fürs Eigenheim. Am Projekt beteilligt sind diverse Energieversorgungsunternehmen und Hersteller sowie das deutsche Bundesbauministerium. Über einen deutschen Ableger kann sich die Firma Hexis hier als einer von vier Herstellern beteiligen (Baxi Innotech, Hexis, Vaillant und Viessmann). Insgesamt werden 800 Anlagen installiert und mindestens bis 2015 betrieben. Der Firma Hexis eröffnet dies die Möglichkeit, bis Ende 2012 mehr als 200 Brennstoffzellensysteme des Typs Gallileo 1000N auszuliefern und Praxiserfahrungen zu sammeln. Um die Servicedienstleistungen für die geographisch weit gestreuten Systeme gewährleisten zu können, ging Hexis eine Zusammenarbeit mit dem Heizungsunternehmen Hoval ein. Mitte 2009 waren in der Schweiz, Deutschland und den Niederlanden insgesamt 17 Gallileo 1000N-Systeme und fünf HXS 1000 Premiere-Systeme in Betrieb. Kumuliert erreichten diese Anlagen 90'000 h Betriebsstunden und produzierten bis anhin 50 MWh Strom (DC).

Im Kanton Zürich befinden sich zwei verschiedene Projekte in Planung, bei denen jeweils eine Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) im Leistungsbereich 230 kW als Blockheizkraftwerk eingesetzt werden soll. Vorgesehen sind MCFC-HotModule der Firma MTU Onsite Energy mit elektrischen Wirkungsgraden bis 50 %. Geplant ist, dass die Anlagen im Jahr 2010 installiert werden.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Im Berichtsjahr konnten in verschiedenen Programmteilen grosse Forschritte beobachtet werden. Im Bereich der Forschung und Entwicklung seien hier insbesondere die herausragenden Resultate bei der photoelektrochemischen Produktion von Wasserstoff hervorgehoben, ein Themenbereich, welcher seit vielen Jahren ein Bestandteil des Forschungsprogramms *Wasserstoff* bildet und wo in den letzten Jahren durch zielgerichtete Forschungsplanung massive Verbesserungen – sechsfache Erhöhung des Photostroms in fünf Jahren – erzielt werden konnten. Weiter seien hier erwähnt: die Entwicklungserfolge im Bereich der Anoden-getragenen SOFC-Brennstoffzellen bei der Firma HTceramix, sowie die fundamentalen Beiträge und neuen Messmethoden am PSI zum besseren Verständnis der PEM-Brennstoffzellen.

Allgemein sind im Bereich Brennstoffzellen- und Wasserstofftechnologie materialtechnische Fragestellungen weiterhin von grösster Wichtigkeit und bildeten daher auch im Berichtsjahr nach wie vor einen zentralen Bestandteil im Forschungsprogramm. Resultate aus diesen Forschungsaktivitäten tragen vorerst zum Erkenntnisgewinn bei und fliessen nur zum Teil direkt in bestehende Produkte ein, sind aber für die Weiterentwicklung der Technologie – Erhöhung der Lebensdauer und damit verbundene Kostenreduktion – unabdingbar.

Für die wenigen im Brennstoffzellenbereich tätigen Schweizer Firmen ist die Situation nach wie vor schwierig, da die Technologie heute auf dem Markt noch nicht wirklich konkurrenzfähig ist. Damit sich diese wenigen Firmen nachhaltig entwickeln können, wird es in den kommenden Jahren nötig sein, diese Technologie schrittweise in Pilotmärkte einzuführen. Als kleines Land kann die Schweiz hier von Umsetzungsbemühungen im internationalen Kontext profitieren. Allgemein sind die Forschungskompetenzen hierzulande in diesem Bereich sehr hoch, was auch an der hohen Anzahl internationaler Projekte mit Schweizer Beteiligung abzulesen ist.

Im Bereich der Umsetzung konnte im Berichtsjahr in verschiedenen Projekten aufgezeigt werden, dass der Einsatz von Wasserstoff und Brennstoffzellen in gezielten Anwendungen bereits heute sinnvoll sein kann. Angesichts der eher knappen Förderungsmöglichkeiten der öffentlichen Hand und dem sinnvollen Ansatz, drängende energetische und ökologische Probleme nachhaltig durch die geeignetste Technologie angehen zu wollen, ist in den nächsten Jahren weiter Kreativität gefragt, um Nischen für Brennstoffzellen- und Wasserstofftech-

nologie zu finden, wo keine tauglichen Alternativen vorhanden sind, und daher ein Einsatz der Technologie unter den bestehenden Kosten bereits heute möglich wäre.

Neben der fortlaufenden Unterstützung langfristig angelegter Kernprojekte soll im Jahr 2010 weiter versucht werden, die Vernetzung unter den diversen Akteuren zu intensivieren. Dabei scheint es wichtig, neben dem Erkenntnisgewinn verstärkt noch die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbedürfnisse der Industriepartner zu berücksichtigen.

Referenzen

(JB) Jahresbericht

(SB) Schlussbericht

[1] Deutsche Energie-Agentur: *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie*, März 2005, Download: www.offshore-wind.de

[2] Weinmann O., Vattenfall Europe: *Wasserstoff aus Windenergie*, Oktober 2008.

[3] Bundesamt für Energie, *Energieforschungsprogramme Brennstoffzellen und Wasserstoff für die Jahre 2008 bis 2011*, Januar 2008 (www.energieforschung.ch).

[4] Bundesamt für Energie, *Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011* (www.energieforschung.ch).

[5] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@empa.ch), EMPA: *Neue Membranen für alkalische Elektrolyseure*, KTI-Projekt 8574.

[6] Hydrogen Implementing Agreement der IEA, Task 24: *Wind Energy and Hydrogen Integration* (www.task24.hidrogenoaragon.org).

[7] Chappuis T. et al. (thierry.cahppuis@hefr.ch), EIA-FR: *Développement d'un électrolyseur haute pression destiné à la production domestique d'hydrogène et d'oxygène* (JB).

[8] Graetzel M. et al. (michael.graetzel@epfl.ch), EPFL: *PEChouse: A Competence Centre Devoted to the Photoelectochemical Splitting of Water and Production of Hydrogen* (JB).

[9] Braun A. et al. (arthur.braun@empa.ch), EMPA: *Synthesis and Assessment of Mixed Metal-Oxide Nanoparticles and Films for Solar Photo-Electrochemical Hydrogen Fuel Production* (JB).

[10] Meier A. et al. (anton.meier@psi.ch), PSI: *Solar Thermal Production of Zinc* (JB).

[11] Meier A. et al. (anton.meier@psi.ch), PSI: *Towards Industrial Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation* (JB).

[12] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@empa.ch), EMPA: *Hydrogen Storage in New Complex Hydrides* (JB).

[13] Laurenczy G. et al. (gabor.laurenczy@epfl.ch) EPFL: *Hydrogen storage in formic acid – high pressure hydrogen generator – power supply unit*, KTI Projekt 9777.

[14] Züttel A. et al. (andreas.zuettel@empa.ch), EMPA: «Relevant Physical Aspects of Hydrides for System Integration and Safety» (JB).

[15] Yvon K. et al. (klaus.yvon@unige.ch), Universität Genf: *Hydrogen detectors and sensors for PEM fuel cell and electrolyser systems*, KTI-Projekt 9942.

[16] Scherer G. et al. (guenther.scherer@psi.ch), PSI: *Protonen-Leitende Polymermembranen für Brennstoff- und Elektrolysezellen* (SB).

[17] Gubler L. et. al. (lorenz.gubler@psi.ch), PSI: *Lebensdauer Limitierungen von Brennstoffzellen-Membranen: Mechanismen, Methoden und Innovationen* (JB).

[18] Büchi F. et al. (felix.buechi@psi.ch), PSI: *Gas-Analysis in Polymer Electrolyte Fuel Cells* (JB).

[19] Gubler L. et. al. (lorenz.gubler@psi.ch), PSI: *Enhancing PEFC Durability and Reliability under Application-Relevant Conditions* (JB).

[20] Höckel M. et al. (michael.hoeckel@bfh.ch), BFH-TI: : *IHPoS-E, Modulares Brennstoffzellensystem*, KTI-Projekt 9376.

[21] Büchi F. et al. (felix.buechi@psi.ch), PSI: *Model Based Investigation of PEM Fuel Cell Performance with focus on Porous Layer Properties* (JB).

[22] Büchi F. et al. (felix.buechi@psi.ch), PSI: *X-Ray Micro-Tomography of Polymer Electrolyte Fuel Cells* (JB).

[23] Mantzaras I. et al. (ioannis.mantzaras@psi.ch), PSI: *Modeling of energy conversion processes at the micro-scale with application to PEFCs* (JB).

[24] Höckel M. et al. (michael.hoeckel@bfh.ch), BFH-TI: *Ausbau des Teststandes für Wasserstoff-betriebene Brennstoffzellen* (JB).

[25] Dietrich P. et al. (philipp.dietrich@psi.ch), PSI: *Development of a 25 KW Hydrogen/Oxygen Fuel Cell system*, KTI-Projekt 10050.

[26] Mai A. et al. (andreas.mai@hexis.com), HEXIS: *Enhancing the Lifetime of SOFC Stacks for Combined Heat and Power Applications* (JB).

[27] Mai A. et al. (andreas.mai@hexis.com), HEXIS: *Accelerated Testing of SOFC-Components* (JB).

[28] Luebbe H. et al. (henning.luebbe@epfl.ch), EPFL: *Robust microtubular SOFC design by cheap processing and using a new material* (JB).

[29] Ihringer R. (info@fiaxell.com), Fiaxell: *Development of a low cost and adaptive SOFC glass-free sealing* (JB).

[30] Ihringer R. (info@fiaxell.com), Fiaxell: *A reliable anode supported thin electrolyte SOFC cell resistant to multiple thermal redox-cycles* (JB).

[31] Fischer F. (fabian.fischer@hevs.ch), HES-SO: *Technische Machbarkeitsstudie zur Rückgewinnung von Phosphat aus ausgefaultem Klärschlamm mit Hilfe einer mikrobiellen Brennstoffzelle* (JB).

[32] Renz S. (renz.btr@swissonline.ch), Beratung Renz Consulting: *Market Outlook for stationary fuel cells* (SB).

[33] FCH JU Governing Board: *Multi-Annual Implementation Plan 2008–2013*, Mai 2009 (ec.europa.eu/research/fch)

[34] Bach C. (christian.bach@empa.ch), EMPA: *Hydrogen driven municipal vehicle (hy.muve)* (JB).

[35] Affolter J.-F. et al. (jean-francois.affolter@heig-vd.ch), HEIG-VD: *Hydrogène dans les ports* (SB).

[36] Trachte U. (ulrike.trachte@hslu.ch), HTA Luzern: *USV für GSM/UMTS-Basisstationen mit Brennstoffzellen* (SB).

[37] Vogt U. et al. (ulrich.vogt@empa.ch), EMPA: *Nachhaltige H_2 Synthese und Speicherung für die autarke Energieversorgung von SELF* (JB).

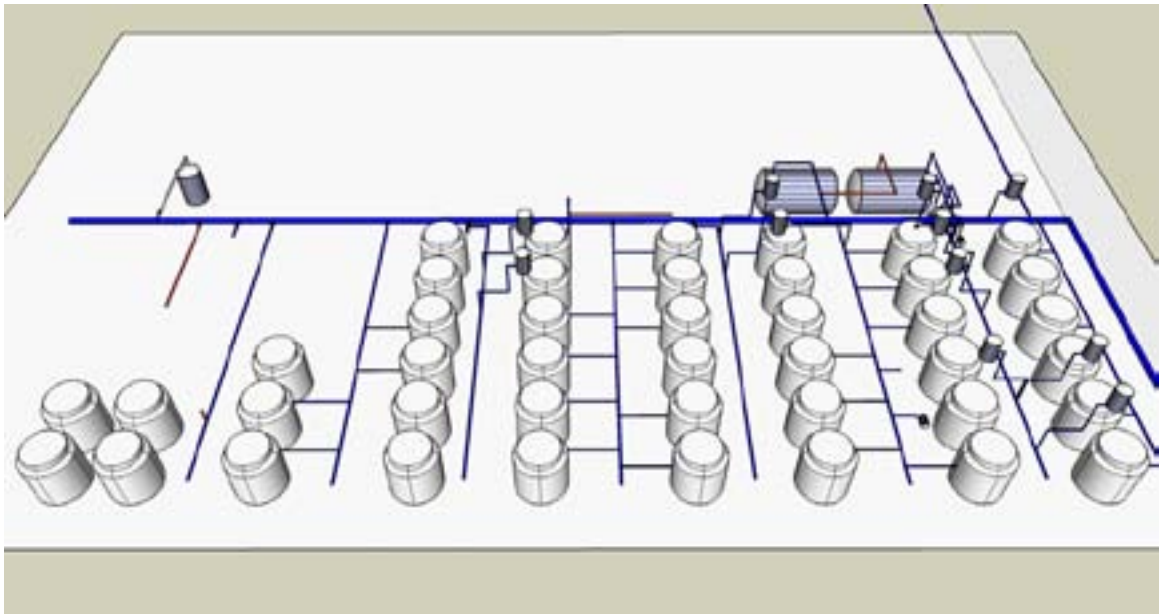
[38] Autissier N. et al. (nordahl.autissier@htceramix.ch), HTceramix: *5 kW SOFC Stack PowerTower Demonstration* (JB).

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Industrielle Prozesse

Martin Pulfer[*)]

martin.pulfer@bfe.admin.ch



Modell eines Batch-Prozesses mit vielen Mehrzweck-Reaktoren

Im Projekt *Monitoring and Optimization Tool for Batch Chemical Industry* [2] wurde ein anwenderfreudliches Vorhersage- und Optimierungstool für chemische Mehrprodukte-Batchbetriebe entwickelt. Der entscheidende Vorteil ist, dass schon mit relativ wenigen Parametern Energieverbrauchsaussagen über Produktionsgebäude und -stufe, sowie über Batches, Reaktoren und Produktlinien machbar sind.

[*)] Der Bericht wurde von Michael Spirig, Fomenta AG, CH-8852 Altendorf, ausgearbeitet, m.spirig@fomenta.ch

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Industrielle Prozesse haben einen Anteil von ca. 15 % am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz. Prozesswärme, mehrheitlich aus fossilen Energieträgern erzeugt, macht etwa 55 % dieses Verbrauches aus, und die Industrie ist der grösste Stromverbraucher in der Schweiz. Um von der CO_2-Abgabe befreit zu werden, sind ca. 1500 Unternehmen über die Energieagentur der Wirtschaft (EnAW) mit dem Bund eine Reduktionsverpflichtung um total 3,8 Mio. Tonnen CO_2 eingegangen. Es wird geschätzt, dass mittels gezielter Optimierung des Ressourceneinsatzes ein beträchtliches Sparpotenzial von 30–50 % realisiert werden kann. Zwar werden schon einige Technologien und Methoden wie die Prozessintegration (Pinch) erfolgreich angewendet, doch sind noch einige energierelevante Fragestellungen systematisch und ganzheitlich anzugehen und das Know-how in der erforderlichen Breite verfügbar zu machen.

Dies ist das Ziel des BFE-Forschungsprogramms *Industrielle Prozesse* (IP) (bisher *Verfahrenstechnische Prozesse*), welches künftig neben der Verfahrenstechnik auch energieintensive, fertigungstechnische Prozesse wie z.B. Giessen, Glühen, Schmieden, Fräsen etc. in den Fokus einschliesst.

Künftige Forschungsprioritäten sind:

- Entwicklung und Anwendung von Methoden und (Entscheidungs-)Tools; z.B. Batch-Prozess-Energie-Modeling und -monitoring, Energie- und Massenflüsse;
- Realisierung **effizienter Verfahren** und Strategien inkl. P&D-Projekte; z.B. Substitutionsverfahren für die Trocknung und Trennung (Destillation), schmutzresistente Wärmeübertrager;
- Integration von **erneuerbaren Ressourcen, inkl. Reststoffverwertung und Abwärmenutzung** bis hin zur Energieträgerproduktion; z.B. Solarenergie, Hochdruckwärmepumpe, Wärmespeicherung, Reststoffreaktoren, Abwärmenutzkonzepte;

Die Ziele auf Programmebene sind:

- Ausbau der nationalen und internationalen **Vernetzung** und Wahrnehmung des Forschungsprogramms inkl. Ausweitung der Forschungsschwerpunkte auch auf die Fertigungstechnik;
- Zielgruppengerechte **Information** zur Sensibilisierung und Motivation der Industrie sowie Erweiterung der Unterstützungsressourcen (heute total ca. 3,7 Mio. CHF/a)
- Langfristig erhöhte **Energie-Kompetenz** der Forschergruppen mittels thematischer Ausbildung und Festigung von überkritischen Gruppen, bis hin zur Initiierung von Kompetenzzentren.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

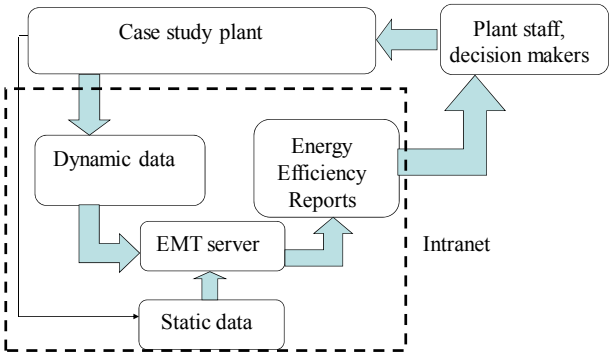
Entwicklung und Anwendung von Methoden und Entscheidungs-Tools

Das Projekt *Advanced Integration of Energy Conversion Production, Processes and Waste Management in Batch Chemical Plants* [1] der ETH Zürich und der EPFL Lausanne hat zum Ziel, einen neuen Ansatz zu entwickeln, der es erlaubt, die Aspekte des Produktionsprozesses, die energetische Ausbeute und das Abfallmanagement in Batch-Chemieanlagen in gegenseitiger Abhängigkeit zu betrachten und zu optimieren. Natürlich werden auch Randbedingungen wie variable Produktportfolios, Verfügbarkeit der Anlage und Prozessauslegung berücksichtigt.

Die Methode, basierend auf mehrdimensionaler Regressionsanalyse, welche eine Minimierung der zu erfassenden Daten erlaubt, wurde im Rahmen eines Projektes des Schweizerischen Nationalfonds (SNF) entwickelt [9]. Im BFE-Projekt wurde diese mittels Fallstudien – u.a. mit dem Industriepartner Syngenta – validiert und die Integration der drei Aspekte durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine gemeinsame Analyse der Fragestellungen für Planung, Entwicklung und Betrieb erforderlich ist, und damit die Anwendung von Life-Cycle-Assessment-Tools (LCA-Tools) resp. LC-Indikatoren neben reinen Kosten basierten Vorgehen künftig Ziel führender sein wird.

Das Projekt *Monitoring and Optimization Tool for Batch Chemical Industry* [2] des Institutes für

Chemie- und Bioingenieurwesen (ICB) der ETHZ ist ein weiteres vom BFE über mehrere Jahre und Stufen unterstütztes Vorhaben. Ziel ist es, ein verlässliches, anwenderfreundliches Vorhersage- und Optimierungsinstrument für den Energiebedarf chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe zu entwickeln, besonders auch um rein kostengetriebene Analysen, Planungen und Betriebsstrategien essentiell zu ergänzen.

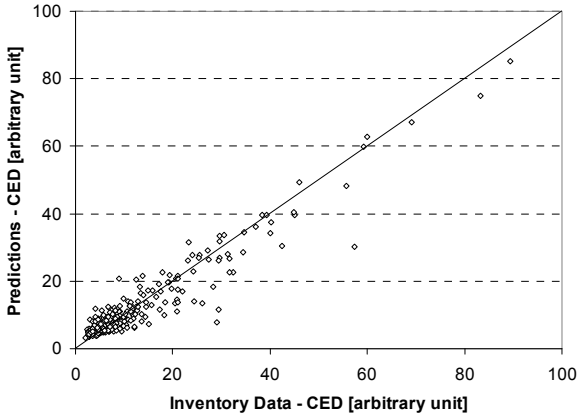


Figur 1: Anwendungskonzept des «Energy Monitoring Tools» (EMT) in einer Fallstudie in einem Batch-Betrieb der ehemaligen CIBA in Grenzach, heute BASF

Eine wesentliche Erkenntnis bei der Entwicklung des so genannten «Energy Monitoring Tool» (EMT) war, dass verlässliche Aussagen nur mit Bottom-up-Modellen möglich sind. Die Methode besteht daher aus der energetischen Modellierung und der detaillierten Energiebilanzierung der wichtigen Einheitsoperationen. Spezielles Augenmerk wurde auf die möglichst reale Bestimmung der thermischen Verluste der Reaktoren gelegt, hingegen wurde auf eine Aufsplitterung der Modellierung nach Produkten verzichtet.

Die Validierung erfolgte anhand diverser Direktmessungen an über 1000 Messstellen in über 100 Reaktoren auf Stufe Prozessanlagen und Gebäude. Aktuell geht es darum, in einer Fallstudie in einem Batch-Betrieb der ehemaligen Ciba in Grenzach, heute BASF, das Tool real anzuwenden (Fig. 1). Mittels graphischer Benutzer-Oberflächen (GUI) sowie einem innovativen Interface für systematische Prozessdokumentation ist es zudem auf optimalen Kundennutzen sowie breite Einsetzbarkeit hin zu verbessern.

Der entscheidende Vorteil des benutzerfreundlichen EMT ist, dass auf der Basis von relativ wenigen bekannten, äusseren Parametern Energieverbrauchsaussagen über das Produktionsgebäude hinaus bis auf Produktionsstufe, auf Batches und Reaktoren, sowie auf Produktlinien gemacht werden können. Dadurch lassen sich energetisch suboptimale Prozessstufen detektieren und gezielt optimieren. Künftig werden beim Betrieb, bei der zeitlichen Abstimmung, dem Unterhalt und der Einhaltung der Rezeptur, sowie sogar im Designstadium Optimierungsmassnahmen realisierbar sein.



Figur 2: Vergleich der Modellprognosen mit den bekannten Daten des CED für die 338 Chemikalien. Die Diagonale ist die Ideallinie, welche die Lage von perfekten Vorhersagen anzeigt

Bereits die während der Entwicklung des EMT erkannten Reduktionsmassnahmen führten schon zur Einsparung von 3500 t Dampf, bzw. 390 t CO_2. In Anbetracht der vielen chemischen Batch-Prozesse besteht ein hohes Anwendungs- und Einsparpotenzial. Industrieinteressen am EMT sind zunehmend vorhanden, und es muss sich zeigen, wie und wo ein entsprechender Provider für das EMT gefunden werden kann. Eine EMT Demo-Version ist verfügbar unter: http://emtool.ethz.ch.

Das Institut für Chemie und Bioingenieurwissenschaften der ETH Zürich hat sich im Projekt Finechem – *an Inventory Estimation Tool for Fine Chemicals* [3] zum Ziel gesetzt, verlässliche Methoden für die Abschätzung von Ökobilanzdaten für die Produktion von Chemikalien zu entwickeln. Dazu wurden drei verschiedene Ansätze geprüft. Derjenige der Molekülstruktur-basierten Modelle (MSMs) wurde priorisiert, da er erlaubt, Einsichten und Abschätzungen von Ökobilanzen über die vielen tausend Chemikalien zu gewinnen, von denen keine detaillierten Prozessdaten verfügbar sind. Zudem werden dadurch Daten für die *Ecoinvent*-Datenbank generiert und Lücken in existierenden und zukünftigen Ökobilanzen geschlossen. Entsprechend diesem hohen Mehrwert sind auch

renommierte, nationale und internationale Projektpartner aus der Chemieindustrie, wie etwa BASF, Ciba (inzwischen Teil von BASF), Hoffmann – La Roche, GlaxoSmithKline, Lonza und Syngenta ins Projekt eingebunden. Zudem beteiligten sich auch das *Ecoinvent*-Zentrum sowie das BAFU am Projekt.

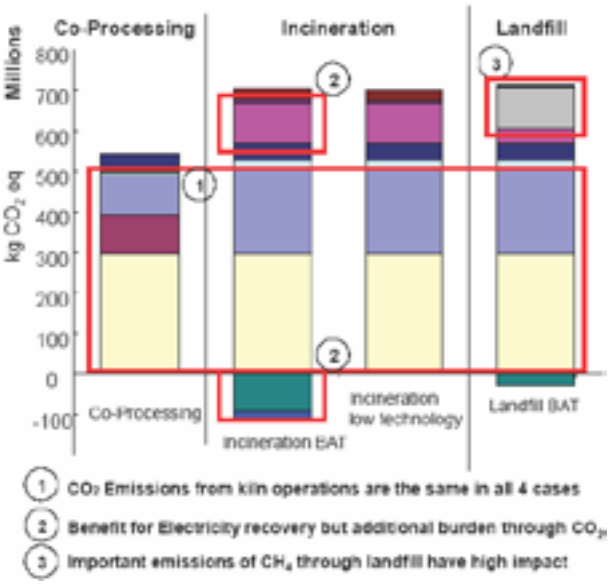
Die Haupt-Ausgabewerte sind der kumulierte Energiebedarf (CED), das *Global Warming Potential* (GWP) und der *Eco-Indicator 99-Punkte* (H/A – eine Life Cycle Assessment Methode zur Bestimmung eines aggregierten Umweltschadens). Zum heutigen Zeitpunkt liegen 392 einzelne Inventardaten vor, welche 338 Chemikalien abdecken. Fig. 2 zeigt den Vergleich der Modellprognosen mit den bekannten Daten des CED für die 338 Chemikalien. Die Prognosen sind in den meisten Fällen sehr gut.

Ein weiteres Ziel, das erreicht wurde, war die Entwicklung eines Tools für die einfache Anwendung. Auf www.sust-chem.ethz.ch/tools/finechem ist dieses genauer beschrieben, und es lassen sich dort auch die Modelle selbst herunterladen. Das Finechem-Tool wird international bereits von Experten rege angewendet. Aus dem Projekt resultierten zudem zwei Publikationen und eine Dissertation [10,11].

Da viele Chemikalien über ähnliche Reaktionen hergestellt werden, wurde in der Folge nun eine Methode mit Reaktionsmodellen als erfolgversprechende Ergänzung identifiziert. Im Folgeprojekt *„Abschätzung von Massen- und Energieflüssen in der chemischen Industrie"* ist es das Ziel, Massen- und Energieflüsse in chemischen Produktionsprozessen anhand von prozessbasierten Modellen vorherzusagen, und auf diese Weise eine Energieallokation in Mehrzweck-Produktionsgebäuden zu ermöglichen.

Das Institut für Umweltingenieurwissenschaften der ETH Zürich schloss das Projekt *Decision-Support Tool to Optimize Co-Prozessing of Waste in the Cement Industry (LCA4AFR)* [4] ab. Das Projektziel war die Entwicklung eines Ökobilanzmodells, welches die Umweltauswirkung der Abfallmitverwertung in der Zementindustrie bewertet. Mittels Abfallmitverwertung können bis zu 50 % an teuren, hochwertigen Energieträgern eingespart werden. Es ist jedoch unklar, ob sich die Abfälle nicht nachhaltiger auch in anderen Branchen verwenden liessen.

Auf der Basis von input- und technologiespezifischen Massenflussmodellen wurden flexible Ökobilanzmodelle von den verschiedenen Zementöfen erstellt. Die Flexibilität bezüglich Abfallcharakteristiken sowie technologischen Standard der betreffenden Anlagen erlaubt Analysen mit höherem Detaillierungsgrad und geringerem Zeitaufwand, als dies mit konventionellen Ökobilanzdatenbanken möglich ist. Die Vorhersagen für Treibhausgase, Stickstoff- und Schwefeloxide sind relativ exakt, während die Genauigkeit für die Schwermetallemission geringer ist. Dies kann durch Ungewissheiten bezüglich der Konzentration der Schwermetalle in den Betriebsmitteln (Eingang) und in den Luftemissionen (Ausgang) erklärt werden, da diese Konzentrationen oft nahe an- oder unterhalb der Nachweisgrenze liegen.



Figur 3: CO_2-Äquivalent-Vergleich verschiedener Abfallmitverwertungsmöglichkeiten in der Zementindustrie

Die Modelle zu Kehrichtverbrennungsanlagen und Deponien wurden entwickelt, um die Abfallmitverwertung in der Zementindustrie mit traditionellen Abfallverwertungs- und Entsorgungsoptionen zu vergleichen. Die Hauptaussagen sind, dass die Abfallmitverwertung eher eine erhöhte Schwermetallemission erzeugt, sonst aber ökologischer ist als das Deponieren, besonders weil dadurch Methanbildung verhindert wird, und – wegen der Verminderung von CO_2- und NO_x-Emissionen – auch ökologischer als das Einäschern mit Low-tech-Anlagen. Die High-tech-Einäscherung mit Stromgeneration ist dagegen ähnlich ökologisch, wenn dadurch CO_2-belasteter Strom aus Kohle ersetzt werden kann (Fig. 3).

Mit dem entwickelten Computerwerkzeug für die Lebenszyklus-Einschätzung (LCA) kann also die Entscheidungsfindung zur optimalen Verwertungsart von Abfällen in Regionen mit unterschiedlich ausgerüsteten Zementwerken unterstütz werden. Tool und Beschreibung sind unter www.ifu.ethz.ch/-ESD/research/TEDST/cement/index_EN zu finden.

Die Projektpartner sind zur Etablierung der Tools noch an der Ausarbeitung von konkreten Fallstudien (Kleberanlage), um dann eine weltweite Anwendung anzustreben. Das Modell kann auch als Basis zur ökobilanziellen Bewertung von Baumaterialien wie Zement oder Beton verwendet werden. Ein Modell für die Stahlindustrie wird in einem Folgeprojekt entwickelt. Für die Co-Verarbeitung des getrockneten Abwasserschlamms in den Schweizer Zementöfen wurde eine Studie durch das BFE und das BAFU in Auftrag gegeben.

Die Resultate zeigen, dass ein erheblicher Klima- und Umweltnutzen an der Kleberanlage erzielt werden kann.

Realisierung effizienter Verfahren

In der Schweiz spielen Trocknungsanlagen u.a. eine wichtige Rolle bei der Sicherstellung der Tierversorgung mit Trockenfuttermitteln. Das in derartigen Trocknungsanlagen produzierte hochwertige Trockenfutter ist beispielsweise für die Produktion traditioneller schweizerischer Käsesorten, wie z.B. den Emmentaler Käse, unentbehrlich. Thermisch betriebene Trocknungsprozesse sind sehr energieintensiv (Wasserverdunstung) und das energetische Verbesserungspotenzial zum Beispiel durch mechanische Entwässerung vorab entsprechend gross. Das dabei als Nebenprodukt anfallende Presswasser bzw. der Presswassersaft ist zudem energiereich und kann durch Integration biotechnologischer und chemischer Verfahren effizient und lukrativ verwertet werden.

Mit der Fortsetzung des Projektes *Effizienzsteigerung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen für Futtermittel* [5] der FH Nordwestschweiz konnten im Berichtsjahr die aus den Vorjahren in diesem Bereich erarbeiteten guten Resultate präzisiert und damit umsetzungsreif gemacht werden.

An einer für die Schweiz relativ kleinen Trocknungsanlage in Zell LU (ca. 1560 MWh/a für die Produktion von 774 Normtonnen Trockengut aus 400 t Gras und 915 t Mais) wurde hierzu der Einfluss einer mechanischen Vortrocknung mit Schneckenpresse auf den Energieverbrauch und auf die Futtermittelqualität untersucht.

Figur 4: Durchschnittliche Schweizer Trochnungsanlage mit 3000 MWh/a,1000 Normtonnen Trockengut

Bei der Gras- und Maispelletherstellung in Zell konnte im Schnitt ein Effizienzgewinn von 27 %, d.h. von 258 auf 190 Liter Heizöl extraleicht pro Normtonne Trockengut, gezeigt werden. Nur schon für die in der Schweiz betriebenen rund 65 Anlagen in diesem Bereich mit durchschnittlich 3000 MWh/a für die Produktion von 1000 Normtonnen Trockengut (Fig. 4) ergibt dies hoch gerechnet ein Einsparpotenzial von etwa 53 GWh Heizöl resp. 14'000 tCO_2/a (Endenergie). Ebenso resultiert Dank den Einsparungen an Öl- und CO_2-Kosten eine Pay-Back-Zeit von lediglich etwa 3 Jahren für die Investitionskosten – im Fall Zell ca. 250 kCHF. Es konnte zudem im Projekt gezeigt werden, dass sich die Durchlaufzeit für die Produktion von 1,7 t Futtermittel von 60 auf 45 Minuten verkürzt und die Qualität der Futtermittel sogar gesteigert wird. Zudem vermindert sich die Trocknungstemperatur um ca. 15 °C und damit die Schadstoffbildung von z.B. polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK). Durch die Vorpressung werden zudem wetterbedingte Schwankungen der Trocknungskosten abgefedert, da der Restfeuchtegehalt des Futtermaterials nach der Pressung praktisch konstant ist. Weiterer Vorteil ist, dass bei z.B. verregnetem Gras grosse Mengen Presswasser (200 l Saft pro t Trockenfutter) anfallen, was für eine passend terminierte, ökologisch sehr effiziente Alternative zur Anreicherung des Bodens mit Nährstoffen wie Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium genutzt werden kann. Im Vergleich zur Düngung mit Gülle ist das Risiko der Anreicherung des Bodens mit Schadstoffen wie Veterinärpharmaka deutlich reduziert.

In einer letzten Phase des Projektes wird daher noch die Nutzung der Prozessabfälle, d.h. der Pflanzenpresssäfte als Ressource genauer untersucht (Fig. 5). Unter Berücksichtigung verschiedenster Fermentationsprozesse werden die Prozessabfälle auf ihre Eignung zur Biogasproduktion, Bio-Ethanolgewinnung oder Herstellung von organischen Säuren überprüft. Letztere, z.B. Milchsäureherstellung, ist allenfalls sogar sehr lohnend; für die Anlage in Zell z.B. resultiert ein geschätzter Mehrwert von bis zu 700'000 CHF/a. Dabei gilt es, Schwankungen für die Vorort-Herstellung auszugleichen, indem vor allem frisches Grüngut verarbeitet wird. Die Ergebnisse zeigen, dass es sehr lohnend ist, das Verbesserungspotenzial bei Trocknungsprozessen zu untersuchen und zu realisieren. Im Speziellen kann bei überregionaler Produktion von Trockenfuttermitteln mit Vorpressung eine energetische, ökologisch nachhaltige und ökonomische Effizienzsteigerung der Landwirtschaft erzielt werden. In der Umsetzung besteht zudem ein grosses Potenzial weit über die Schweiz hinaus.

Figur 5: Mittels Vorpressen wird der Energieaufwand bei Trocknungsverfahren vermindert, die Qualität des Outputs sogar gesteigert und je nachdem ein ökologisch und ökonomisch verwertbares Nebenprodukt (Presssaft) erzeugt.

Energieintensive, meist mit fossilen Energieträgern betriebene, thermische Trocknungsprozesse werden auch bei der Herstellung von Faserplatten eingesetzt (Fasern herstellen, in Wasser lösen, Lösung entwässern und Platten trocknen). Die Trocknung ist ein erheblicher Kostenfaktor, denn sie benötigt etwa 80 % des gesamten Wärmeverbrauchs und ist damit auch bezüglich des CO_2-Ausstosses dominierend. Die Firma Pavatex ist über die EnAW mit dem Bund eine verpflichtende CO_2-Reduktionsvereinbarung eingegangen. Als Massnahme sollte, neben dem Einbau eines Biomassenkessels im Werk Cham und dem partiellen Ersatz von schwerem Heizöl durch Knochenfett in Fribourg, auch die thermodynamisch noch ungenügend verstandene Trocknung verbessert werden.

Im 2006 gestarteten Projekt *Prozessanalyse Trockner und Dampferzeugung in den Werken Cham und Fribourg* [6] ging es daher darum, die Trocknungsprozesse, welche stark unterschiedliche Verbräuche und unbefriedigende Wärmeverläufe aufweisen, auszumessen, das Effizienzpotenzial über ein Prozessmodell zu eruieren, neue Technologieansätze zu prüfen sowie Massnahmen und Empfehlungen abzuleiten.

Die Messungen haben gezeigt, dass die Wandwärmeverluste der Trockner insgesamt unbedeutend, die Abwärmeverluste in der Abluft jedoch dominierend sind. Die Abluft ist zudem durch hochsiedende Komponenten stark verschmutzt und trocken. Für die Nutzung des grossen Rückgewinnungspotenzials wären daher robuste Wärmetauscher nötig und/oder genügend kühle Verbraucher bzw. Abluftverdichtung, so dass durch deutliche Taupunktunterschreitung an den nassen Wärmetauscher-Oberflächen der Schmutz weniger gut haftet bzw. abgeschwemmt werden kann.

Der vorgeschlagene Einbau einer dritten Trocknerstufe in Cham reduzierte den spezifischen Wärmeverbrauch von ca. 1700 auf 1000 kWh/t-Platte aufgrund besserer Effizienz dieser Stufe, tieferer Temperaturen und wärmerer Platten am Einlauf sowie kleinerer spezifischer Abluftverluste.

Weitere Empfehlungen sind: Wärmerückgewinnung an den Kaminen; Isolation der Dampfarmaturen; Einsatz von Strahlungsschutz für die Trocknertüren prüfen und Regelung des Trockners für höhere Abluftfeuchte. Zudem ist es sinnvoll, eine Pinch-Analyse durchzuführen, so dass systematisch noch brauchbare Abwärmequellen und Wärme aufnehmende Stoffströme inkl. Zuluft eruiert werden können.

Die technisch-ökonomische Machbarkeit des Ersatzes der Hallenheizung durch Nutzung der Trocknerabwärme wäre zudem noch zu untersuchen.

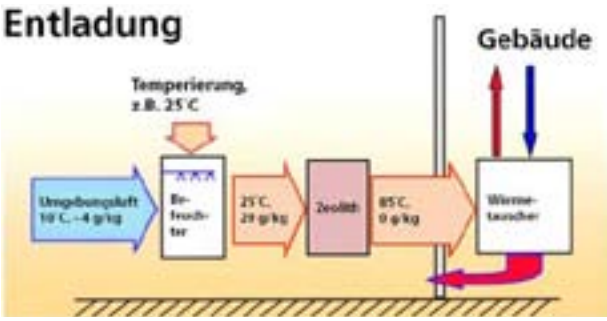
Abwärmenutzung

Die Zwischenspeicherung und der Transport von Wärme können zu energietechnisch interessanten Lösungen führen. Wärmespeicher werden u.a. mit Silicagel oder Zeolith als so genannte Sorptionsspeicher realisiert, wie z.B. beim selbstkühlenden Bierfass. Insbesondere bei der Adsorption von Wasser, das heisst dem Einlagern neutraler Verbindungen in die Mikroporen der Kristallstruktur des Zeoliths, resultiert eine hohe nutzbare Adsorptionswärme, bzw. ist eine solche zum Austreiben des Wassers erforderlich. Vom ZEA in Garching DE wurde in Zusammenarbeit mit der IEA die mögliche Rentabilität einer Zeolith-Akkumulatoren-Anwendung u.a. in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) gezeigt und eine technische Anlage mit dem Alu-Werk Grevenbroich realisiert. Die ZAE-Studie hat jedoch den Endverbraucher und damit die Vollkosten noch nicht berücksichtigt.

Im BFE-Projekt *Abwärmenutzung mittels mobilen Zeolith-Wärmespeichern* [7] wird daher die technische, ökologische und volle ökonomische Machbarkeit an verschiedenen konkreten Fällen (Papierfabrik Utzenstorf, Stahlwerk Gerlafingen, AEK Solothurn, Easysten (Transitgas-Contractor), Kronospan Menznau, Fenaco) von 4 bis 140 GWh/a geprüft, d.h. bezüglich Energieeffizienz, Rentabilität und sinnvoller Abwärmeverwertung. Variablen und zugleich spezielle Herausforderungen sind:

- die Optimierung der Bedingungen zur Aufladung des Zeolith-Akkumulators (trockener, sauberer Energiestrom mit einer Temperatur von 230 – 270 ºC) und zur Entladung (feuchter Kaltluftstrom, richtige Zieltemperatur durch Wärmetauscher, Fig. 6);
- beim ökonomischen Modell die langfristig anzusetzende Einsatzdauer (25 Jahre) und die daraus resultierende Amortisationsdauern von 10 bis 15 Jahren;
- der (interne) Einstandspreis der Abwärme;
- Speichercontainerzahl und Transporteinheit (z.B. 100/Tag) sowie diverse lokale Verhältnisse.

Figur 6: Die Entladung mobiler Zeolith-Akkumulatoren verlangt einen feuchten Kaltluftstrom und einen Wärmetauscher, um die richtige Zieltemperatur zu erreichen.



Als ideale Anwendungsfälle wurden Schwimmbäder, Treibhäuser, Nachtclubs und Sägereien mit Heiz-, Kühl- oder Trocknungsbedarf identifiziert.

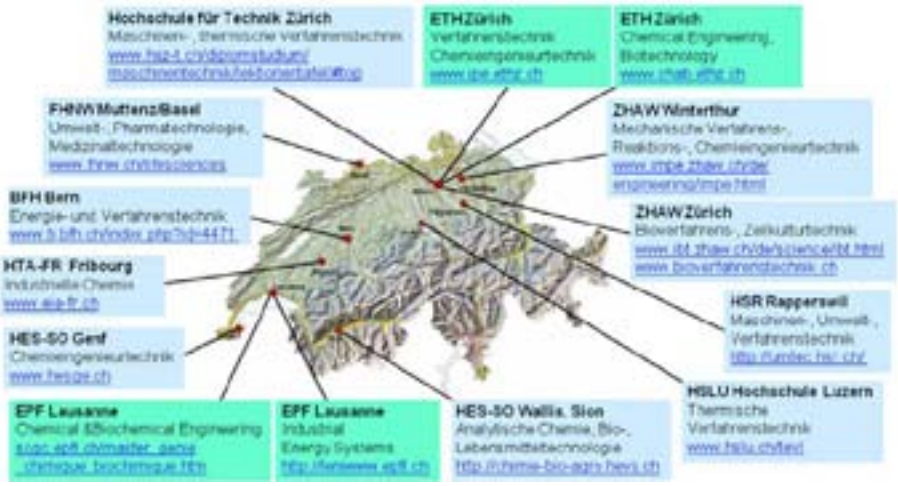
Das Projekt *Marktübersicht in energieintensiven Bereichen der Schweizerischen Industrie* [8] wurde erst vor kurzem gestartet und es liegen daher noch keine publizierbaren Ergebnisse vor. Ziel der Arbeit ist es, das Zusammenspiel von industriellen Abwärmequellen und Abwärmenutzern an drei ausgewählten Standorten zu untersuchen (Fig. 7) und die verfügbaren industriellen Abwärmemengen sowie die entsprechenden Temperaturniveaus zu quantifizieren. Darauf aufbauend sollen die verfügbaren Technologien und Lösungsvarianten für eine anwendungsnahe, industrielle oder kommunale Nutzung evaluiert und eine Kostenrechnung für die Wärmebezüger durchgeführt werden. Parallel sollen zudem potenzielle F&E-Bedürfnisse sowie Pilot- und Demonstrationsprojektmöglichkeiten aufgedeckt werden.

Nationale Zusammenarbeit

Einen groben Überblick über die nationalen Akteure der verfahrenstechnischen Forschung und Ausbildung gibt Fig. 8. Die ETHZ und die EPFL sowie die 10 Fachhochschulen (keine Universität) sind in losem Austausch, besonders über Fachverbände, Tagungen und zuweilen auch über Projekte. Ein analoger Überblick fehlt im Bereich Fertigungstechnik, da dieser bisher nicht aktiv in den Programmfokus eingeschlossen war. Im Berichtsjahr wurde ein erster Ansatzpunkt gemacht, indem das Zentrum für Werkzeugmaschinen und Fertigung, das ETH Institut IWF www.iwf.mavt.ethz.ch, bzw.

das daraus hervorgegangene Unternehmen Inspire – «AG für mechatronische Produktionssysteme und Fertigungstechnik», www.inspire.ethz.ch, über die Programmaktivtäten und Ziele informiert wurde. Es zeigt sich, dass auch in diesem Bereich unter den Titeln «Ressourcen für die Produktion» und «Produktion für die Ressourcen» bereits einige energierelevante Projekte am Laufen sind.

Über alles besteht jedoch sowohl in der Verfahrenstechnik als auch in der Fertigungstechnik noch keine auf Energie fokussierte Gemeinschaft, die die Verbesserungspotenziale in den industriellen Prozessen breit, systematisch und vernetzt angeht. Um hier einen starken Impuls zu geben, ist für 2010 u.a eine Impulstagung «Energie- und Kosteneffizienz in industriellen Prozessen» in fortgeschrittener Planung. Besonders wichtig für die nationale Zusammenarbeit ist auch der aktive Austausch mit den bestehenden Vereinigungen und Verbänden, allen voran mit der Energieagentur der Wirtschaft (EnAW) und der Interessengemeinschaft energieintensiver Branchen (IGEB), so dass u.a. künftige Forschungsthemen möglichst frühzeitig erkannt und in Projekte umgesetzt werden können.



Figur 7: Nationale Akteure in der Verfahrenstechnik

Im Berichtsjahr unterstützte das BFE Programm insgesamt vier Projekte aus dem ETH-Bereich (EHTZ, EPFL) und zwei (weitere drei geplant) der Fachhochschulen (FHNW, HSLU, HSW, ZHAW) sowie drei der Industrie (BMG Engineering, BSB + Partner, Pavatex). Eine starke Industriebeteiligung inkl. Finanzierung bestand in allen Projekten und widerspiegelt das industrielle Interesse am Thema sowie das Potenzial, welches es künftig noch intensiver zu involvieren bzw. zu realisieren gilt. Aktuell beteiligte Firmen sind: AEK-EBAG Solothurn, BASF, Chemiewerke Schweizerhalle BL, Ciba (inzwischen Teil von BASF), Easysten (Transitgas-Contractor), Emmi, Fenaco, Hoffmann – La Roche, Holcim Group Support, GlaxoSmithKline, Kronospan Menznau, Lonza, Misapor, Papierfabrik Utzenstorf, Pavatex, Perlen Papier, Stahlwerk Gerlafingen, AEK Solothurn, ITZ InnovationsTransfer Zentralschweiz, Syngenta und weitere.

Von der öffentlichen Hand ist vor allem das BFE und teilweise auch das BAFU im Forschungsbereich der industriellen Prozesse aktiv. Wichtiges Ziel ist es, durch langfristige Planung und geschäftsrelevante Lösungsansätze mit markantem Return of Investment (RoI) auch vermehrt Projektunterstützung von anderen Förderern zu erreichen (z.B. SNF, KTI, private Fonds). Auszunützen ist hierbei auch die gross Palette der Zusammenarbeitsmöglichkeiten mit den Forschungsprogrammen *Elektrizität*, *Industrielle Solarenergienutzung*, *Solarwärme*, *Energie in Gebäuden*, *WKK* und *Umgebungswärme*. Auch eine künftig stärkere Überschneidung mit Forschungsbereichen der Chemie, Biotechnologie, Maschinentechnik, Landwirtschaft etc. ist anzustreben und wird sich positiv auf die Anzahl neuer Lösungsoptionen auswirken.

Internationale Zusammenarbeit

Die in der Schweiz laufenden Aktivitäten sind branchenspezifisch und orientieren sich in erster Linie an den Bedürfnissen der inländischen Industrie. Bei gewissen Themen beteiligen sich jedoch auch international aktive Grossfirmen. International Beachtung finden vor allem die an der ETH entwickelten Tools für das «Energy Monitoring» (EMT) zu Analysen und Planungen chemischer Mehrprodukte-Batchbetriebe [2] und das Tool für die Abschätzung von Ökobilanzdaten für die Produktion von

Chemikalien (Finechem) [3]. Das Finechem-Tool ist bereits heute international im Einsatz, was auch Ziel für das EMT und die Folgeentwicklungen für die Abschätzung von Massen- und Energieflüssen ist.

Eine vertiefte direkte internationale Zusammenarbeit mit der EU fand wegen bisher noch nicht identifizierter gemeinsamer Themen bis heute kaum statt. Vom BFE aus wurde der Kontakt mit dem Implementing Agreement der Internationalen Energieagentur (IEA) *Industrial Energy-Related Technologies and Systems* (IETS) aufgenommen. Aufgrund von vorhanden Kompetenzen in der Schweiz könnten u.a. die Annexe *Energy efficient drying and dewatering technologies* (Annex X, [5]), *Membrane Technologies* (Annex XII) und *Process integration* (in Diskussion) zu einer förderlichen Zusammenarbeit führen. Eine Teilnahme wurde bis jetzt noch nicht angepeilt.

Eine zunehmende Beteiligung an den Ausschreibungen des 7. Forschungsrahmenprogramms z.B. in spezifischen Materialtechnologien, Anwendungen mit Erneuerbaren Energien etc. muss künftig vermehrt geprüft werden.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Die Fragestellungen vieler Projekte sind meist sehr industriebezogen und umsetzungsnahe und haben daher stets einen prinzipiellen Demo-Charakter. Ein eigentliches PuD Projekt ist jedoch aufgrund der oft sehr individuellen Lösungen nicht lanciert worden. Aufgrund ihres grossen Multiplikationspotenzials sind aber in nächster Zeit eigentliche Demoprojekte bei Trocknungsanlagen und zur Implementierung des *Energy Monitoring Tools* (EMT) durchaus sinnvoll.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

2009 hat sich das noch relativ junge Forschungsprogramm *Industrielle Prozesse* weiter etablieren und im Rahmen der beschränkten Mittel einige wichtige Resultate erreichen können. Neben praktischen, 1:1 sichtbaren Ergebnissen im Bereich der Trocknungsanlagen (FHNW) sind besonders auch die Erfolge im Bereich der Analyse- und Entscheidungstool-Entwicklung der ETHZ zu bemerken. Solche Tools ermöglichen es, künftig ohne grossen physischen Eingriff und daher mit moderatem Aufwand wirksam Energie und Kosten einzusparen. Diese Vorhaben sind aber langfristige Entwicklungen, die eine entsprechend langfristige Strategie sowie Durchhaltewillen aller Beteiligten erfordern und zudem mit anderen ähnlichen Aktivitäten einhergehen müssen. Ein weiterer wesentlicher Erfolgsfaktor ist auch die Mobilisierung und das Engagement der Industrie, die ein realitätsnahes Vorgehen und eine künftige Umsetzung erst ermöglichen. Diese soll 2010 dann auch erreicht werden.

Im Sinne obiger Schlüsselfaktoren – Kompetenz, Langfristigkeit, Konstanz, Zusammenarbeit, Industriebeteiligung – wurde das Detailkonzept mit den einleitend beschriebenen Forschungsprioritäten und Programmzielen ausgearbeitet und im Berichtsjahr von der CORE angenommen. Zudem wurde eine Begleitgruppe vorgeschlagen, welche sich im Laufe des Jahres 2010 treffen wird.

Den Kommunikations- und Informationszielen entsprechend wurde auch die Website für das Forschungsprogramm erstellt und auf der offiziellen Website des BFE aufgeschaltet, so dass Inhalt und Fördermöglichkeiten jetzt öffentlich zugänglich sind.

Zu den Schwerpunkten für das Jahr 2010 gehören neben den oben genannten Umsetzungs- und P&D-Zielen auch neue Verfahren zur Integration von erneuerbaren Ressourcen inkl. Reststoffverwertung und Abwärmenutzung. Hierzu sind auch bereits Projektideen vorhanden und Anträge eingereicht worden. Wichtige Vernetzungsziele werden die Ausweitung der Aktivitäten auf die Fertigungstechnik, die möglichst frühzeitige Involvierung von umsetzungsstarken Fachhochschulen, die Zusammenarbeit mit anderen Forschungsprogrammen und dem BAFU, die Erreichung von EU FP7-Projekten und die allfällige Teilnahme in einem der IEA-Annexe sein.

Darüber hinaus soll eine Gemeinschaft um das Programm herum entstehen, die die Verbesse-

rungspotenziale möglichst gezielt eruiert, entsprechende, künftige Forschungsthemen zusammenträgt und Projekte lanciert. Grosse Schritte in diese Richtung sollen mit dem auf den 15. Juni 2010 angesagten Impulstag «Energie- und Kosteneffizienz in Industriellen Prozessen» gemacht werden, welcher in Zusammenarbeit mit der EnAW und IBM Schweiz organisiert wird. Zudem ist eine etwas kleinere Veranstaltung zum Thema «Effizient Trocknen» unter kräftiger Mitarbeit des Verbandes Schweizerischer Trocknungsbetriebe VSTB auf Herbst in Planung.

Liste der F+E-Projekte

[1] F. Maréchal (francois.marechal@epfl.ch), EPFL/LENI-ISE-STI: **Energy modeling an Integration at Syngenta chemical batch plant** (Jahresbericht Projekt 102250).

[2] K. Hungerbühler (konrad.hungerbuehler@chem.ethz.ch) und A. Szíjjarto, ETH Zürich**: Monitoring and optimization tool for batch chemical industry** (Jahresbericht Projekt 102999).

[3] G. Wernet (gregor.wernet@chem.ethz.ch), ETH Zürich: **Finechem – An Inventory Estimation Tool For Fine Chemicals** (Schlussbericht Projekt 101711).

[4] S. Hellweg, M. Boesch (stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch), ETH Zürich: **Development of an environmental decision support tool to optimize co processing of waste in the cement industry** (Schlussbericht Projekt 102176).

[5] L. Sandoval (lisseth.sandoval@fhnw.ch), FHNW, Muttenz: **Effizienzsteigerung von landwirtschaftlichen Trocknungsanlagen**
– Phase I: Evaluation eines Vorpressverfahrens zur Energieeinsparung (Jahresbericht Projekt 102251)
– Phase II: Nutzung der Prozessabfälle Pflanzenpresssäfte als Ressource (Jahresbericht Projekt 103335).

[6] H. Christen Pavatex AG, Cham, E. Kalbermatter (erich-.kalbermatter@enaw.ch): **Prozessanalyse Trockner und Dampferzeugung in den Werken Cham und Fribourg** (Schlussbericht Projekt 101518).

[7] A. Kohli (alexander.kohli@bsb-partner.ch), BSB + Partner, Grenchen: **Abwärmenutzung mittels mobilen Zeolith-Wärmespeichern** (Jahresbericht Projekt 102617).

[8] R. Müller (reto.mueller@bmgeng.ch), BMG Engineering AG, Schlieren: **Marktübersicht in energieintensiven Bereichen der Schweizerischen Industrie** (Jahresbericht Projekt 103188).

Referenzen

[9] Bolliger, Raffaele and Becker, Helen and Maréchal, François: **New generic approach for the analysis of energy conversion system models**, PSE 2009 conference, Brazil, august 2009, Salvador de Bahia, Brazil.

[10] Wernet, G., S. Papadokonstadakis, S. Hellweg, and K. Hungerbühler. 2009: **Bridging data gaps in environmental assessments: Modeling impacts of fine and basic chemical production**. Green Chemistry 11: 1826–1831.

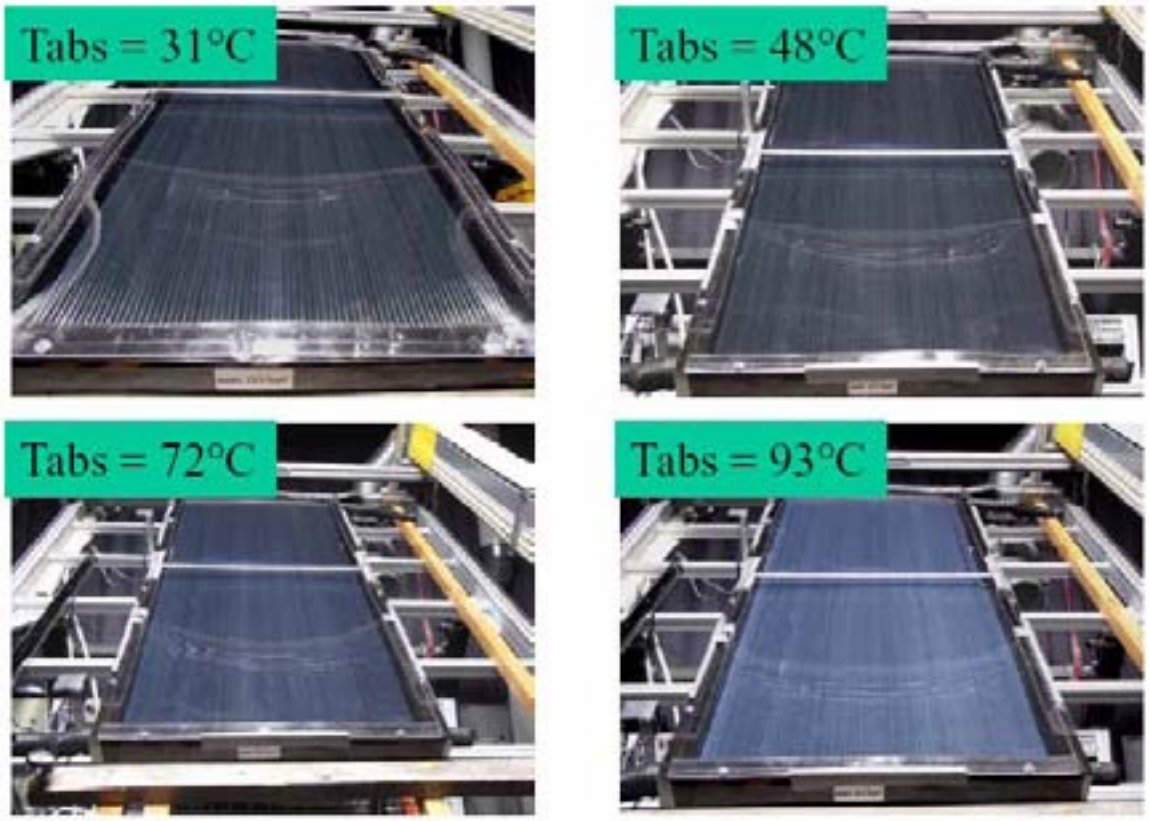
[11] Wernet, G. **Environmental Assessment of Chemical Production**, Dissertation ETH No. 18391, 2009, ISBN 3-906734-55-2.

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche
Chaleur solaire et Stockage de chaleur

Jean-Christophe Hadorn

jchadorn@baseconsultants.com



Test d'un prototype de capteur en polymère au SPF à Rapperswil (photo : SPF)

L'absorbeur en polymère est recouvert d'une couche également en polymère à propriété thermochromique. Avec l'augmentation de température on voit progressivement le coefficient d'absorption du rayonnement diminuer. Les nanocouches vont jouer un rôle grandissant dans le solaire thermique.

Centres de gravité du programme et buts fixés

Le programme de recherche traite de la chaleur solaire à température comprise entre 0 et 150 °C et s'adresse à la couverture des besoins en chaleur dans les bâtiments par des solutions solaires actives. Le solaire peut contribuer à une part importante des besoins en énergie de la Suisse, et notamment entre 10 et 60 °C.

Les axes de recherche et développement du programme pour 2008 – 2011 sont :

- amélioration des performances et de la durabilité des capteurs et des composants ;
- nouvelles couches pour les capteurs, basées sur des nanomatériaux ;
- systèmes et composants standardisés pour la chaleur et le froid ;
- intégration dans les bâtiments et dans les systèmes de chauffage existants ;
- stockage ;
- outils de calcul.

Les buts poursuivis en 2009 ont été :

- la réalisation d'une première nanocouche thermochromique sur un support métallique ;
- le développement d'un nouveau capteur entièrement en plastique ;
- la mise en place d'un projet international d'intégration architecturale des capteurs en couleur, ;
- le transfert à l'industrie de la technologie du verre solaire de couleur ;
- l'étude des transferts thermiques autour des échangeurs immergés dans les cuves solaires ;
- la mise sur pied de la Tâche 44 «Solar and heat pump systems» de l' Agence internationale de l'énergie (AIE) dans le programme Solar Heating and Cooling (SHC) ;
- la continuité des recherches au SPF avec le changement de direction ;
- la convergence des outils de simulation du solaire thermique et du bâtiment pour permettre la planification du solaire thermique au plus tôt dans un projet.

Travaux effectués et résultats acquis en 2009

Amélioration des performances et de la durabilité des capteurs et des composants.

Les *tests de capteurs* et de composants de la technique solaire réalisés par le SPF à Rapperswil permettent au marché d'avoir une assurance de qualité des produits et aux industriels d'améliorer leurs conceptions. C'est un service fondamental du développement des produits, matériaux et une source d'innovation permanente.

Mesure des performances et test de qualité des capteurs solaires

Tous les tests se font désormais selon la norme européenne «Solar Keymark» valable pour le capteur seulement. Les tests de systèmes pré câblés d'usine, réalisés sur banc d'essai au SPF depuis plus de 5 ans, ont enfin une norme européenne (EN 12976), ce qui va permettre leur augmentation. Les tests de systèmes sur mesure ne sont pas encore normalisés (EN 12977 en cours). Le SPF peut depuis 2009 effectuer également les tests selon la norme américaine SRCC et la norme australienne, ce qui pourrait aider notre industrie à exporter en évitant la barrière de 2 ou 3 ans que ces pays imposent en ayant que peu de centres de tests [1].

Beaucoup de capteurs ont encore des problèmes de qualité. Les industriels n'apprennent pas assez du passé et ne se documentent pas assez [1].

Il y a un regain d'intérêt pour les capteurs, surtout non vitrés, connectés à une pompe à chaleur. Le domaine n'est pas vraiment nouveau mais une norme manque pour caractériser les aspects d'échange avec l'atmosphère et de condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Le SPF a du modifier son banc pour mesurer plusieurs de ces

capteurs en condition d'utilisation à basse température [1].

De même pour les capteurs à haute température (200 °C), le SPF doit adapter un banc pour satisfaire la demande des industriels sur ce segment de marché qui renaît [1].

De nouveaux entrants sur le marché du solaire (sous traitants de l'industrie automobile) développent de nouvelles idées. Les connaissances du SPF sont importantes pour les assister dans le choix des composants et pour tester les prototypes [1].

Les *capteurs hybrides photovoltaïques et thermiques*, dits «PVT», sont souvent demandés par les consommateurs. Aucun bon produit n'est pour le moment disponible mais ils arrivent. Le SPF a préparé un banc d'essai permettant de certifier un capteur PVT selon la «Solar Keymark» qui a développé un protocole pour des hybrides. Le SPF a ainsi monté une mesure de performance électrique des modules PV placés dans le simulateur solaire. Les résultats montrent que les performances thermiques des capteurs testés sont peu affectées par le PV. Le simulateur solaire deviendra pour ceci d'année en année de plus en plus chargé et la compétence du SPF en photovoltaïque se renforcera [1].

Le *test de grêle* 25 mm demandé pour les assurances et la sécurité des constructions de certains cantons est réussi par tous les capteurs plans testés. Par contre il est fréquent que les capteurs à tube sous vide ne résistent pas sauf une exception à 40 mm [1].

thermiques et leurs composants a été reconduite, ce qui demande des efforts constants de maintien des infrastructures et de qualité de travail [1].

Matériaux

Le test «*Solarglas*» et le test des *isolants* imaginés par le SPF n'ont pas d'équivalent dans le monde et sont très demandés par les fabricants. Le SPF a fait œuvre de pionnier dans ce domaine depuis maintenant 10 ans. D'autres tests SPF de composants, comme par exemple celui des raccords entre capteurs, une source fréquente de fuite, ne sont pas dans des normes internationales. Ceci est dommage pour la qualité des capteurs vendus dans le monde mais bénéfique pour notre industrie d'exportation qui en bénéficie [1].

Le rapport sur les *20 ans de tests de matériaux de couverture transparente* en extérieur est très demandé et une nouvelle campagne de mesures de longue durée a débuté avec des échantillons de divers matériaux. La campagne a montré quelle couverture pouvait résister dans le temps. L'ETFE est un matériau qui n'a pas pu être récupéré totalement en transparence solaire même après nettoyage à l'éthanol, et l'analyse microscopique n'a pas révélé de face privilégiée [3]

La *durabilité de peintures sélectives (émissivité de 0,4)* développées depuis plusieurs années en Slovénie a été étudiée par le SPF. Un test de vieillissement accéléré a été proposé par le SPF sur la base de celui mis au point pour un absorbeur plastique. Après quelques adaptations nécessaires qui ont enrichi la méthodologie du SPF, celui-ci

Figure 1 : Tests de capteurs au SPF en conditions extrêmes (à gauche) et sous charge (à droite) (Photos : SPF)

L'accréditation EN 12976 et 12975 du SPF en tant que organisme d'essais pour capteurs solaires

conclut que la peinture sur support cuivre peut durer 45 ans [3].

Le SPF travaille depuis 2 ans, en partenariat avec un grand industriel suisse de la chimie des plastiques, au développement d'un *absorbeur en polymère,* extrudé en continu, et doté d'une couche superficielle polymérique capable de résister à la surchauffe. En 2009 les travaux ont porté sur le vieillissement accéléré du capteur prototype conçu avec ce type d'absorbeur et tout en plastique. Seule la couverture est pour le moment en verre. Un tel capteur peut être produit au mètre (figure 2). Les premiers résultats montrent que le capteur peut avoir une durée de vie acceptable si il est protégé par la couche thermochromique, qui rend possible le recours à des polymères bon marché comme absorbeur [3].

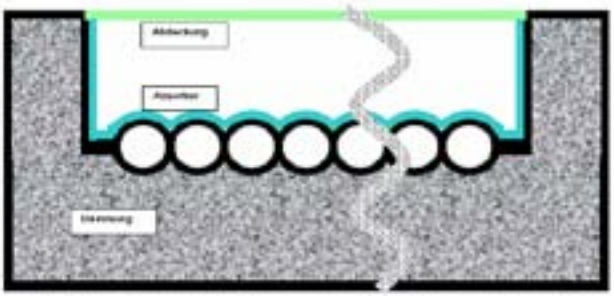


Figure 2 : Coupe d'un absorbeur en polymère extrudé protégé de la surchauffe par une couche thermochromique. Le capteur peut être extrudé et produit au mètre (Doc. : SPF)

Le *dégazage des isolants sous vide,* qui font petit à petit leur apparition dans les capteurs plans pour en réduire l'épaisseur, peut être étudié avec un dispositif réalisé au SPF [4].

Nouvelles couches pour les capteurs, basées sur des nanomatériaux

Le Leso de l'EPFL après avoir découvert les nanocouches interférentielles permettant les verres solaires de couleur s'attaque à une autre application que nous souhaitons de longue date pour les nanocouches : la *thermochromie*. La phase II du projet a débuté. Elle consiste en la mise au point d'une couche ayant les propriétés requises pour la protection contre la surchauffe des capteurs solaires, propriétés définies avec le SPF durant la phase I. Le Leso a adapté dans ce but un équipement d'évaporation sous vide, reçu de Asulab, pour pouvoir évaporer deux oxydes simultanément. Il a aussi adapté une installation de «magnetron sputtering» pour pouvoir déposer des films métalliques. Les paramètres de déposition ont été calés avec de très nombreux essais, suivis de mesures par spectrophotométrie des propriétés des couches déposées. La déposition sous vide sur une surface de 10 cm^2 environ est désormais maîtrisée par les chercheurs. Le Leso a ainsi réalisé des mesures optiques de films d'oxydes métalliques à propriété thermochromique déposés par évaporation Joule sur divers substrats, qui ne sont pas documentés dans la littérature. La description des propriétés optiques de films ternaires apparaît comme une nouveauté mondiale. Outre cette caractérisation réussie, les films ont des qualités thermochromiques de changement d'émissivité et d'absorption à des températures prévisibles, qui laissent entrevoir la solution que nous cherchons pour les capteurs solaires à absorbeur métallique, peut-être pour 2010 [10, 20, 21, 22, 23, 24].

Le Leso de l'EPFL travaille sur les possibilités d'intégration des *capteurs solaires en couleur* dans une phase III. La phase précédente a démontré la validité du concept, la faisabilité des couches «filtre» et a identifié au moins une option possible de traitement diffusant nécessaire pour donner une apparence homogène à la couleur, quel que soit l'angle de vue. Grâce à un nouvel équipement qui vient concurrencer, pour de petites surfaces, le procédé sol-gel précédent, la qualité des filtres réfléchissants a été améliorée, quant à l'augmentation de la transmission énergétique globale «g». De bons résultats ont également été obtenus avec un nombre de couches plus faible qu'en 2008 (2 au lieu de 3, figure 3). Quant au verre, la recherche 2008 n'avait pas permis de trouver de verre industriel meilleur que le SatenGlas extraclaro de Sevasa, mais il est nettement moins performant que celui avec traitement manuel de Fällander Glas.

Figure 3 : Nouvelles couleurs de vitrages réalisées par l'équipement d'évaporation sous vide (Photo: Leso)

En 2009 de nouveaux verres ont été trouvés. L'un d'eux possède des caractéristiques très intéressantes, avec un g de 0,912. Et il est disponible en 6 m × 3 m. En outre, le Leso a découvert un nouveau traitement qui pourrait s'appliquer à tout type de verre et éviter le verre spécial diffusant. Ce traitement pourrait faire l'objet d'un brevet. Or un partenaire industriel pour la production de verres solaires de couleur pour le solaire thermique a été trouvé. Il s'agit de la société Swissinso SA, nouvellement formée dans ce but, et qui a levé des capitaux pour réaliser une usine en Suisse. La découverte imprévue du Leso modifie quelque peu les contrats et l'évaluation des conséquences est en cours [6, 20].

Systèmes et composants standardisés pour la chaleur et le froid.

La répartition du débit dans les *grands champs de capteurs solaires* est souvent inconnue. Le SPF a débuté une étude de configurations usuelles en faisant varier tous les paramètres possibles (forme d'absorbeur, type de fluide antigel, températures, débit) avec le logiciel «Absorber-Master» développé par le SPF depuis plusieurs années et disponibles publiquement (figure 4). Les résultats seront disponibles dans la prochaine livraison du logiciel sur le CD Rom Info-CD du SPF [4].

cuve de stockage ou le serpentin en inox de gros diamètre placé dans la cuve et à faible contenance. L'eau froide du réseau doit ainsi être rapidement réchauffée, elle est moins stagnante et donc plus «fraîche» au sens de sa qualité. Cet engouement est en partie dû au risque de légionellose, qui n'est pas spécialement avéré dans le solaire. Toutefois certains clients en ont peur et les normes se sont fait l'écho en imposant en Allemagne que l'eau sanitaire stagnante atteigne au moins une fois par jour 60 °C dans les grandes installations centrales. Cette contrainte prétérite les performances de la partie solaire hors été. Pour une installation solaire, la difficulté est de fournir une forte puissance durant quelques minutes ou de fournir une température à la demande. Le SPF a débuté en 2009 une étude large sur ses dispositifs afin d'évaluer leurs performances respectives. Le problème de l'entartrage est aussi évalué. Après une étude de marché approfondie, un banc d'essai piloté par «Labview» a été réalisé et présenté à trois occasions. Intéressés, six industriels participent aux tests. L'influence du design et de la contenance du circuit externe à la cuve doit aussi être évaluée par la procédure de test qui est en développement. Ce travail pourrait avoir un effet sur les prochaines normes SIA 385, ce qui est important pour les installations solaires [5].

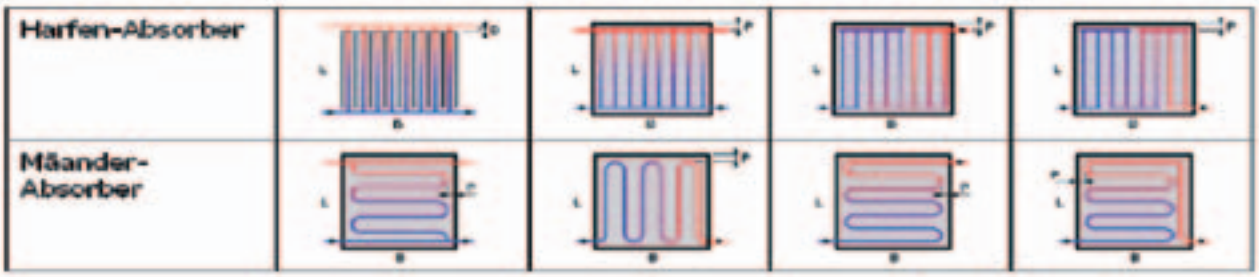


Figure 4 : typologie d'absorbeurs considérés dans les comparaisons (Doc.: SPF)

En ce qui concerne les *chauffe-eau solaires*, le SPF a testé plus de thermosiphons pour les marchés du Sud de l'Europe que de systèmes actifs (9 contre 1). A noter que la norme de test de systèmes EN 12976 est enfin disponible depuis octobre 2009, ce qui est une très bonne chose pour la qualité des systèmes [1].

Le marché solaire de la *préparation d'eau chaude* s'est orienté depuis 2 ans vers des solutions dites «d'eau fraîche», c'est-à-dire sans stockage de l'eau consommée. Ceci n'est pas nouveau mais une tendance qui revient. Il y a différents dispositifs, les plus connus étant l'échangeur externe à la

Au SPF, le projet *étude des transferts de chaleur dans les échangeurs* immergés dans une cuve de stockage se poursuit. Une étude de marché des systèmes montre que trois types d'échangeur immergé dominent (figure 5). Le dimensionnement moyen sur 36 systèmes du marché montre des valeurs de 1,4 à 2 m^2 d'échange pour 4 à 10 m^2 de capteurs. Par simulation, il a été montré que le «low flow» dans la boucle solaire est légèrement meilleur que le «high flow» et que le coefficent de transfert varie selon la différence de température entre fluide et cuve de 50 à 300 W/m^2 K environ. Grâce à un système de mesures de vitesses par la méthode dite «PIV» (Particle Image Velocimetry)

associée à celle dite Laser Induced Fluorescence (LIF), les conditions de convection naturelle autour des échangeurs immergés les plus représentatifs du marché pourront être étudiées. Ce dispositif réalisé depuis 2 ans au SPF permettra en outre de quantifier la qualité de la stratification dans la cuve et de valider un modèle de simulation de tels échangeurs, car actuellement les modèles sont très grossiers du fait de la méconnaissance des transferts thermiques de base dans de telles configurations [13].

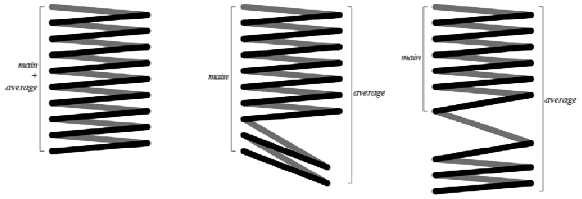


Figure 5 : Les trois types d'échangeurs immergés du marché solaire étudiés par le SPF. Le plus rencontré est le type II avec des hauteurs de 30 à 75 cm avec un rapport distance entre spire sur diamètre de tube de 0,2 à 0,4. (Doc.: SPF)

Climatisation solaire

Sur la base des mesures faites au banc test de l'installation de *climatisation solaire* par absorption de Rapperswil, le SPF a développé un modèle de simulation dans Polysun et effectué une étude comparative : machine à absorption alimentée par des capteurs solaires thermiques à tubes sous vide, machine à compression alimentée par du solaire PV et machine à compression raccordée au réseau électrique suisse, sans solaire. Trois cas de bâtiments ont été considérés : villa de 100 m^2, immeuble de 26 bureaux, et usine de production de 25 m × 80 m, placés dans 3 climats : Lugano, Athènes et Dubaï. Les résultats sont très intéressants : sans considérer les émissions de CO_2 comme critère ou taxées, la machine connectée au réseau est la plus économique. Le solaire thermique est le plus intéressant dans le cas de l'usine si il y a une récupération de chaleur sur les rejets, mais reste 3 à 5 fois plus cher que la climatisation par le réseau. Le solaire PV n'est justifiable que pour la villa vu le prix du PV. Mais ceci peut changer vu l'évolution des prix du solaire. La climatisation solaire thermique est donc surtout destiné aux grands bâtiments aux toits disponibles [2].

Le rapport intermédiaire du projet *SolCool («climatisation et chauffage par combisystèmes»)* débuté en 2008 par le Lesbat de la HEIG-VD d'Yverdon a été publié. Le projet est une contribution suisse à la Tâche IEA SHC 38. En 2009 les travaux ont été: tests en conditions stabilisées de la machine Sortech Version 05, tests de reproductibilité du stand de mesures (avec machines Version 05 et 08), remplacement de la machine Version 05 par la machine Version 08 (couple silicagel – eau, 8 kW), remplacement que nous avons demandé au fournisseur du fait des mauvaises performances obtenues avec la version 05 achetée en 2008, tests en conditions stabilisées de la machine Version 08, premiers tests complets de la machine Version 08, développement du modèle de simulation, analyse de cycle de vie pour un système de climatisation solaire à adsorption en conditions réelles et pour un système de référence. Un gros travail a été fourni par le Lesbat en devant changer de machine. Les tests en laboratoire vont permettre de valider un modèle d'une installation complète de climatisation solaire thermique pour une villa et analyser par simulation les configurations optimales et l'importance du climat dans la solution. Une étude très détaillée de l'analyse du cycle de vie d'une installation avec machine de froid à adsorption en comparaison avec une pompe à chaleur sur sonde montre que cette dernière est nettement plus intéressante en termes d'impact des matériaux et de l'énergie pour la faire fonctionner, ce qui ne milite pas en faveur d'une solution Sortech à ce stade sous nos climats [15].

Intégration dans les bâtiments et dans les systèmes de chauffage existants.

Intégration d'une installation solaire dans un réseau de chauffage à distance

Sur le toit d'un bâtiment de l'école HS Rapperswil, on projette une installation solaire pour injecter de l'eau chaude dans le *réseau de chauffage à distance* de l'école. L'étude détaillée sur la base de mesures de températures, que nous avons demandée au SPF avant toute réalisation, montre qu'une installation solaire sur le bâtiment 4 de l'école entre en concurrence avec une récupération d'énergie locale sur des rejets. Sur un autre bâtiment, la place pour poser les 40 m^2 de capteurs manquent. Enfin le coût du solaire dans un tel cas de rénovation sur un réseau urbain apparaît prohibitif. Le rapport final tentera de rechercher une solution plus attractive [9].

Energie solaire et architecture : intégration des capteurs solaires

Une nouvelle Tâche IEA SHC («Solar Heating and Cooling Programme») a débuté en 2009 pour 4 ans, à laquelle la Suisse a décidé de participer. La Tâche 41 «*Solar energy and architecture*» dirigée par la Suède s'intéresse aux conditions d'intégration des produits du solaire et notamment thermiques. C'est le Leso qui assure la direction de la sous-tâche intitulée «Criteria for architectural integration» et qui a largement contribué en 2009 à parfaire la définition et l'organisation de l'ensemble de la Tâche vu ses connaissances et compétences dans le domaine. Un questionnaire aux architectes de tous les pays membres a été préparé et un format de description de produits d'intégration a été élaboré pour une enquête à venir. La Tâche devra apporter aux concepteurs de produits des idées nouvelles et aux projeteurs des produits et méthodes nouvelles pour mieux faire appel au solaire en général dans un bâtiment [12, 26].

Le stockage

Une norme de *test des cuves solaires* est disponible (EN 12977-3, en liaison avec SIA 385/1) depuis octobre 2009. Il est à prévoir que les tests vont être désormais demandés par les industriels. Le SPF a monté deux bancs tests et demandera une accréditation [1].

Stockage amélioré par des dispositifs de stratification

Pour améliorer la *stratification dans les cuves*, beaucoup de dispositifs sont proposés sur le marché, et vendus comme des atouts surtout promotionnels. Leur efficacité est toutefois très controversée dans le domaine scientifique. Le SPF teste divers systèmes pour des industriels. En marge de ces travaux de service, le SPF effectue une comparaison par simulation et mesure d'un système parfaitement stratifié et du même système sans stratification favorisée. Les résultats seront publiés lors d'une conférence à venir [4].

Stockage avec matériaux à changement de phase (PCM)

Le SPF participe à la Tache IEA SHC 4224 sur les *matériaux pour le stockage de chaleur,* issue de la Tâche 32 que nous avons dirigée. La modélisation de boules remplies de PCM est une activité qu'effectue le SPF pour la Tâche, en utilisant les travaux précédents du Lesbat à Yverdon dans le projet Power PCM. Il s'agit de rechercher les zones de température les plus efficaces pour le PCM dans une installation solaire, le Lesbat ayant montré que la transition à 58 °C n'apporte qu'un avantage marginal par rapport à l'eau du fait de la large gamme de températures couvertes par une cuve solaire de stockage diurne [2].

Stockage par sorption

Le projet *NaOH pour le stockage saisonnier* de l'Empa vise à atteindre une haute densité de stockage thermique. Le prototype de laboratoire rencontre toujours durant les essais deux types de problème : la corrosion et la cristallisation du matériau. La corrosion des tubes est maîtrisable par le choix du matériel mais la cristallisation est pour le moment difficile à combattre. Les pertes thermiques sont également importantes à tout niveau de cette installation. Un deuxième prototype améliorant tout ce qui a été faible dans le premier a été construit. Il devrait permettre d'atteindre enfin de plus hautes concentrations de la solution sans cristallisation mais ceci n'est pas garanti. Le modèle de simulation développé permettra de fixer les zones possibles de performance d'une installation solaire avec un stock optimal. La recherche pour remplacer l'eau s'avère encore difficile et nos moyens vraisemblablement trop limités pour les nombreux essais nécessaires [14, 25].

Stockage et transport de froid

Une boucle de froid basée sur le *coulis d'hydrates de CO_2* produit avec succès à l'IGT de la HEIG-VD d'Yverdon depuis 2006 dans notre programme, a été construite par l'IGT grâce à un financement hors OFEN d'une fondation et d'un partenaire industriel. Il est montré que la boucle fonctionne et avec un taux stable d'hydrates de 20 %, que le coefficient de transfert s'améliore au fur et à mesure que la phase solide est créée, et que le comportement en est prévisible par simulation. La boucle va être intensément testée dans une phase à venir pour pouvoir augmenter le taux d'hydrates et améliorer encore la capacité de transport de froid du fluide biphasique. Nous suivons ce projet comme expert externe. Il devrait déboucher sur une application industrielle importante dans les années à venir [31].

Les outils de calcul

Gestion des données

La gestion des *bases de données internes du SPF* est un point important pour la conservation des données de mesures sur les capteurs solaires, et la mise à disposition des résultats intégraux sur le site Internet www.solarenergy.ch, très apprécié au niveau international du fait de la mise à disposition d'une fiche de mesure pour chaque collecteur testé depuis plus de 10 ans [4].

permettre des appels externes et exporter des données en XML et E4tech prépare les appels à Polysun depuis Lesosai. La limitation des lots de travail de chaque acteur a été une tâche consommatrice de ressources mais nécessaire. L'objectif du projet devrait permettre des études de variantes solaires thermiques très tôt dans une phase de projet de bâtiment Minergie ou non, Lesosai devenant une référence en Suisse dans le domaine et ayant des ambitions européennes [12, 28, 29].

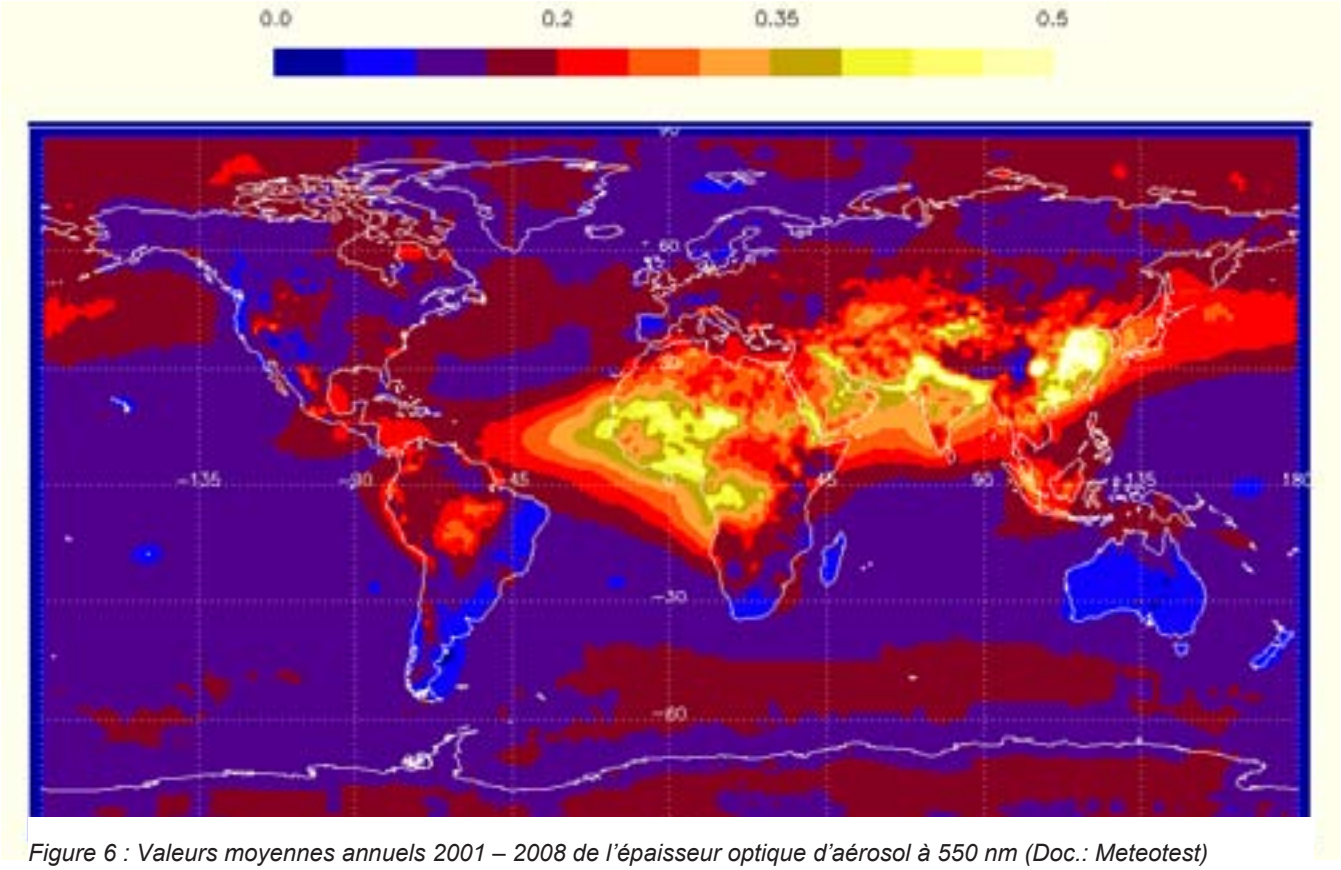


Figure 6 : Valeurs moyennes annuels 2001 – 2008 de l'épaisseur optique d'aérosol à 550 nm (Doc.: Meteotest)

Simulation

Un nouveau projet intitulé «*Lesosai – Polysun Simulation Tools for Architects*» a débuté en 2009. Il consiste à porter des éléments de Polysun dans Lesosai de telle sorte que les utilisateurs de Lesosai puissent effectuer rapidement des calculs intégrant des installations solaires thermiques dans leur projet de bâtiment. En outre, l'interface de Lesosai sera profondément modifié pour devenir plus graphique et plus convivial dans l'entrée des données. Il repose sur la collaboration de 3 partenaires : le Leso EPFL, E4tech éditeur de Lesosai et Vela Solaris éditeur de Polysun. Le Leso a réalisé une enquête utilisateurs pour définir le nouvel interface, Vela Solaris a modifié Polysun pour

Evaluation de la ressource solaire

Le but du projet *Solar Ressource Knowledge Management* qui est la Tâche 36 du programme SHC de l'IEA, est de rendre accessibles aux utilisateurs potentiels les données de gisement solaire sous une forme unifiée. Dans ce projet, Meteotest travaille sur la prévision du rayonnement solaire et son évolution passée, et sur la climatologie des aérosols. Quatre algorithmes de prévision ont été comparés sur la base des données satellitaires et des mesures au sol. Les meilleurs selon les conditions ont pu être remarqués. Le logiciel Meteonorm peut ainsi les intégrer pour être plus précis dans toutes les zones du globe. L'épaisseur optique de

l'atmosphère a pu en outre être calculée pour diverses longueurs d'onde afin de faciliter la prévision du rayonnement global au sol (figure 6). L'analyse de la tendance du rayonnement solaire depuis 40 ans a montré que celui-ci a diminué durant les années 1950 à 1985 en Europe de 1,88 W/m2 par décade puis augmente depuis 1985 de 4,13 W/m2 par décade. La même tendance mais amplifiée est décelable au Japon. En Inde par contre il diminue depuis 1950 de plus 5 W/m2 par décade. Il en a été conclu que le trouble atmosphérique lié à la pollution industrielle et automobile par des aérosols est le facteur prépondérant de ces variations, ceci étant en accord avec les théories du «global dimming» et «global brightening» [8, 19].

L'Université de Genève collabore à la tâche 36. Sa part est entre autre la *validation intensive de modèles d'évaluation du rayonnement* global et direct en comparant les mesures terrestres sur le globe et les données satellitaires. Le résultat le plus important de 2009 consiste en la détermination de l'épaisseur optique sur la base du rayonnement global au sol et hors atmosphère. Après avoir développé une version simplifiée du modèle ciel clair Solis, l'Université de Genève a en effet mis au point une méthode d'analyse du rayonnement global permettant la détermination du trouble atmosphérique. Cette méthode sera publiée et vraisemblablement appliquée à une majorité des sites de mesures d'Europe et des Etats-Unis. Elle permet un pas important dans la connaissance et la prédiction du rayonnement solaire sur terre sur la base de données satellitaires auxquelles nous avons accès grâce à la coopération internationale. Trois publications de niveau international ont été réalisées en 2009 dans ce projet [7, 16, 17, 18].

Communication

Le SPF a donné 4 conférences techniques dans divers cadres en Suisse contribuant à la dissémination du savoir (Energie-Apéro à Bern 8.4.2009 : Dr. Elimar Frank, «Neuheiten der thermischen Solarnutzung»; Fachtag Energie Bern 19.6.2009 : Dr. Elimar Frank, «Innovative Energiekonzepte für Gebäude»; nC2 Nano-Cluster Meeting : Dr. Paul Gantenbein, «Hochleistungs-Solarabsorber basierend auf einem Keramik-Metall Verbund – Cermet Schichten als Solarabsorber»; Energietag der Stadt Rapperswil-Jona 24.10.2009 : Prof. Matthias Rommel, «Nutzung der Solarthermie») [4].

Le site Internet du SPF est constamment mis à jour en 5 langues et est un outil de dissémination des résultats de mesures et de recherche très utilisé [4].

Le site Internet de notre programme a été transféré avec succès vers les serveurs de l'OFEN et est désormais accessible sous :
www.bfe.admin.ch/recherche/chaleursolaire.

Nous avons présenté les travaux de la Tâche 44 et un grand projet possible de stockage de chaleur à Genève lors de la conférence internationale Effstock 09 à Stockholm [30].

Collaboration nationale

Le SPF est membre du comité de normalisation national NK144 mais constate un certain désintérêt de l'industrie solaire suisse pour les questions de norme pourtant si importantes pour vendre sur les marchés. Swissolar devrait s'en préoccuper plus.

Le SPF est invité 2 fois par an pour présenter ses travaux techniques à la commission technique de Swissolar qui regroupe les industriels suisses.

En début d'année 2010 aura lieu la journée annuelle de l'industrie solaire suisse préparée par le SPF, cette année sur le solaire et les pompes à chaleur, le thème de la future Tâche IEA SHC 44. L'audience est de près de 60 personnes chaque année.

Le SPF participe au réseau Brenet regroupant des écoles techniques supérieures de Suisse, et a préparé sa participation à la Tâche IEA SHC 44 dans ce cadre.

Le SPF et le Lesbat coordonnent, via des réunions ad hoc, leurs efforts pour la climatisation solaire

afin de limiter les redondances vu les moyens financiers limités à disposition.

Le Leso a signé une collaboration avec la société Swissinso SA qui a mené à un important contrat de développement et d'assistance technique pour la réalisation d'une installation industrielle de production de verres colorés par magnétron sputtering. Ce contrat finance 2 thèses de doctorat complémentairement au financement OFEN. La société Glas Trösch accepte également de collaborer avec le Leso pour la dépose de couches interférentielles sur des verres de grande taille dans leur installation industrielle.

Le Leso travaille à la promotion de l'intégration architecturale des capteurs solaires de couleur en collaboration avec le Supsi au Tessin et la HSLU à Lucerne dans le cadre de la Tâche IEA SHC 41.

La collaboration Leso – Vela Solaris – E4tech pour créer un logiciel «Lesosai-Polysun», qui pourrait être Lesosai 7.0, a démarré à l'initiative du Leso et nous pensons qu'elle donnera un produit très utile aux architectes et planificateurs de bâtiment, pour mieux considérer le solaire thermique et photovoltaïque ainsi que les pompes à chaleur dans un avant-projet puis un projet. Ce projet est aussi discuté avec d'autres acteurs du domaine en Suisse dans le cadre de la Tâche 41.

Collaboration internationale

Le SPF est membre du comité de normalisation TC312 et peut donc s'adapter rapidement à la demande européenne. Il tente aussi de jouer un rôle dans la définition des normes pour imposer son expérience des tests et des composants solaires de 25 ans. Il anticipe que le logo CE devra être sur tous les capteurs d'ici 2 à 3 ans [1].

Le SPF participe à l'organisation du symposium OTTI qui a lieu en Allemagne chaque année et qui est la conférence la plus pointue dans le domaine du solaire thermique au monde. Les communications sont en langue allemande [4].

Le SPF fait partie du groupe européen «Combisol» (www.combisol.eu) qui examine les conditions de tests des systèmes combinés. C'est une occasion d'apprendre et d'influencer les normes européennes qui découlent de tels travaux [4].

Nos groupes de compétences participent activement aux tâches IEA SHC 36 (Solar resource knowledge management), 39 (Polymeric materials), 41 (Solar energy and architecture), 42 (Heat storage materials), et le SPF a été un des auteurs de la nouvelle Tâche 43 (Solar rating and certification procedure).

Nous avons initié et créé la Tâche 44 «Solar and heat pump systems» qui débutera pour 4 ans en 2010 et dont nous avons été accepté comme «Operating Agent». La Tâche est conjointe au programme «Solar Heating and Cooling» et au programme «Heat Pump Programme», ce qui est une première. Des travaux dans le domaine existent déjà en Suisse et sont un apport à la Tâche [27].

Le Lesbat d'Yverdon a initié une collaboration avec le centre de recherche Eurac de Bolzano quant aux mesures d'une installation de climatisation à adsorption, suite aux rencontres de préparation de la Tâche IEA SHC 44.

Projets pilotes et de démonstration

Le projet du complexe sportif Guillamo est terminé. Comme souvent dans les projets solaires, il est confirmé que si les températures de retour aux capteurs ne sont pas assez faibles et ceci souvent dans l'année, la performance d'une installation solaire est à risque. Ceci doit inciter dans les cas de rénovation solaire à mesurer les températures de retour que l'installation solaire va rencontrer et d'agir pour les diminuer. Si ceci n'est pas objectivement possible il est préférable de renoncer au solaire. Une décision en 2009 a été prise : l'installation devrait être améliorée en 2010 [32].

Le projet «Nahwärmenetz – Solarthermische Anlage» du SPF a reçu une aide P+D pour les mesures mises en œuvre. Ses résultats ont été discutés précédemment. Il est soumis au même risque que

le projet précédent vu les températures de retour du réseau existant. La décision de réalisation n'est pas encore prise [9, 33].

A Genève, la société Colas projette de chauffer le bitume produit pour les routes par des capteurs à concentration d'un type spécial développés au Cern depuis 7 ans. Ce projet a été accepté en décembre 2009 et sera suivi par le programme «Utilisation industrielle de l'énergie solaire».

Évaluation de l'année 2009 et perspectives 2010

Nous soulignons avec satisfaction la nomination au SPF du Professeur Matthias Rommel, expert solaire international, et la continuité du travail du SPF durant 2009. Les infrastructures de tests du SPF sont maintenues à la pointe et constamment développées pour suivre ou précéder le marché (bancs tests de capteurs qui apportent énormément d'information sur les matériaux et les problèmes de la pratique, simulateur solaire, mesure capteurs hybrides, test de grêle,…), de même pour l'infrastructure informatique et de gestion de données très importantes en volume et en traitement que cela suppose.

En 2010 on peut s'attendre au SPF à plus de tests de systèmes actifs sur les bancs du fait de la nouvelle norme européenne qui était attendue par les fabricants.

La qualité des antigels sous haute température et avec les absorbeurs aluminium qui se développent devrait être testé sérieusement par exemple au SPF si les moyens le permettent. L'interconnexion des grands champs de capteurs est un domaine où les connaissances manquent et que travaillera le SPF.

Les tests de vieillissement sont importants pour évaluer la durabilité des matériaux du solaire. On manque cependant de recul pour garantir la fiabilité des tests, notamment du fait des UV solaires. Le SPF effectuera en parallèle des mesures longue durée sur les couvertures transparentes.

Le Leso a remarquablement réussi à maîtriser ses outils de déposition d'oxydes métalliques sous vide. Ceci laisse entrevoir la possibilité de réussir la découverte d'une couche thermochromique pour les absorbeurs solaires peut-être en 2010 déjà.

Au Leso également, une opportunité supplémentaire d'utilisation des verres solaires de couleur se profile grâce à l'activité dans le cadre d'une nouvelle thèse portant sur le développement d'un produit solaire thermique pour l'habitat groupé et le tertiaire d'hébergement (financement EDF). Un test de capteur équipé d'un verre coloré devrait pouvoir être fait durant l'été.

Au Leso toujours, la valorisation de la découverte de l'équipe sur le traitement diffusant devra s'effectuer le plus rapidement possible, par souci de protection et d'efficacité, et pour permettre plus de liberté dans les contacts industriels.

La tâche IEA SHC 36 a produit d'importants résultats quant à la prévision du rayonnement solaire au sol à partir de données satellitaires. C'est la coopération internationale qui a permis ces résultats très utiles pour les utilisateurs du logiciel Meteonorm que l'OFEN soutient depuis 20 ans. Ces résultats sont utiles non seulement pour l'énergie solaire thermique lorsqu'il faut calculer la production possible d'une installation en tout point du globe, mais aussi pour le photovoltaïque et la climatologie dont on connaît l'importance pour comprendre le réchauffement climatique.

En climatisation solaire thermique, le Lesbat d'Yverdon devrait produire un rapport final montrant les optimums possibles pour une installation à adsorption pour une villa, sur la base de simulations validées grâce au banc d'essai réalisé. La viabilité économique sera également attendue en comparaison à des solutions plus classiques (compresseur et solaire photovoltaïque).

En stockage alternatif à l'eau, les difficultés sont énormes et après avoir renoncé aux PCM pour le moment, l'alternative NaOH paraît également compromise avec les moyens limités que nous pouvons investir dans cette recherche de stockage dense pour le solaire thermique malgré l'importance de ce domaine pour la pénétration du chauffage solaire en Europe.

La société Vela Solaris, éditrice du logiciel *Polysun*, participera activement à la future Tâche IEA SHC 44 sur le solaire et les pompes à chaleur. Ceci devrait permettre d'intégrer rapidement des

résultats de cette tâche dans l'outil Polysun, pour un usage par les planificateurs, et de renforcer un avantage compétitif du logiciel.

Polysun est bien implanté au niveau international grâce à nos efforts de 20 ans. La société Vela Solaris se développe. Le rapprochement avec Lesosai devrait être très bénéfique à Lesosai qui deviendrait ainsi le premier logiciel de calcul de bâtiment à intégrer une vraie simulation solaire thermique. Nous pensons que ces outils logiciels suisses (outre PVsyst) qui s'exportent bien, créent des emplois, et participent aux économies d'énergie, peuvent également être un support du savoir-faire et de la qualité des produits industriels suisses. C'est une stratégie délibérée de notre part de soutenir ces outils au sein du programme de recherche et il faut continuer.

Liste des projets R+D

(RA) Rapport annuel 2009 existant (voir www.bfe.admin.ch/recherche/chaleursolaire sous «projets», RA ou JB)

(RI) Rapport intermédiaire existant (voir www.bfe.admin.ch/recherche/chaleursolaire sous «projets», RI ou ZB)

(RF) Rapport final existant (voir www.recherche-energetique.ch sous le numéro de projet indiqué, RF ou SB)

Chaleur solaire

[1] A. Bohren, S. Laipple, F. Flückiger, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **SPF Testing**, SB Projekt 153799/102956, www.solarenergy.ch

[2] E. Frank, P. Gantenbein, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **Solares Kühlen, Speicher, Systeme**, SB Projekt 153803/102060, www.solarenergy.ch

[3] S. Brunold, E. Franck, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **Neue Materialien in der Solarthermie**, JB Projekt 153802/102959, www.solarenergy.ch

[4] E. Frank, P. Gantenbein, R. Haberl, S. Brunold, A. Bohren, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **Applied research und internationale Dissemination und Vernetzung**, JB Projekt 153800/102957, www.solarenergy.ch

[5] F. Ruesch, E. Frank, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **Untersuchung und Bewertung angepasster Lösungen zur Trinkwasserbereitstellung**, JB Projekt 153795/102955, www.solarenergy.ch

[6] C. Roecker, M.-C. Munari Probst, M. Edelman, A. Schüler, S. Mertin, A. Paone, EPFL Leso-PB, Lausanne : **Capteurs solaires en couleur – Phase III: Intégration architecturale**, RA projet 153309/100506, http://Leso.epfl.ch

[7] P. Ineichen, Cuepe Uni GE, Genève : **IEA SHC Task 36 Solar resource knowledge management**, RA projet 101498/151761, www.unige.ch/energie, www.iea-shc.org/task36/index.html

[8] J. Remund, Meteotest, Bern : **IEA SHC Task 36 Solar resource knowledge management – Global radiation short term forecast and trends / aerosol climatology**, RA projet 101498/151784, www.meteotest.ch, www.iea-shc.org/task36/index.html

[9] P. Gantenbein, E. Frank, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **Integration solarthermischer Anlagen in ein arealbezogenes Nahwärmenetz – Energiefluss & Kosten**, JB Projekt 102695/153486, www.solarenergy.ch/

[10] A. Paone, A. Schüler, EPFL Leso-PB, Lausanne : **Advanced switchable selective absorber coatings for overheating protection of solar thermal collectors**, RA Projet 102016, http://Leso.epfl.ch

[11] C. Roecker, EPFL Leso-PB, Lausanne : **IEA SHC Task 41 Solar energy and Architecture**, RA projet 154148/103154, http://Leso.epfl.ch

[12] C. Roecker, EPFL Leso-PB, Lausanne, F. Foradini, E4tech sarl, Lausanne, A. Witzig, Vela solaris AG Rapperswil : **LesoSAI – Polysun simulation tools for architects – Optimisation of active and passive solar use**, RA projet 153815/102962, http://Leso.epfl.ch

Stockage de chaleur

[13] W. Loggie E. Frank, SPF/HS-Rapperswil: SPF Forschungsaufgaben im Bereich Aktive Sonnenenergie : **Experimental und Numerical Investigations on Thermal Energy Storages – Indirect charging and discharging via immersed coil heat exchangers**, JB Projekt 102958/153801, www.solarenergy.ch

[14] R. Weber, Empa : **NAOH-Speicher für saisonale Wärmespeicherung**, JB Projekt 153000/102000

[15] S. Citherlet, C. Hildbrand, J. Bony, A. Kleijer, M. Bunea, Lesbat, HEIG-VD, Yverdon : **Solcool – Climatisation et chauffage par combisystème**, RI Projet 152645

Références de publications des projets

[16] P. Ineichen, Cuepe Uni GE, Genève : **Conversion function between the Linke turbidity and the atmospheric water vapor and aerosol content.** Solar Energy, Volume 82, Issue 11 November 2008, pages 1095 – 1097

[17] P. Ineichen, Cuepe Uni GE, Genève : **Comparison and validation of three global-to-beam irradiance models against ground measurements**. Solar Energy, Volume 82, Issue 6 June 2008, pages 501 – 512

[18] P. Ineichen, Cuepe Uni GE, Genève : **A broadband simplified version of the Solis clear sky model**. Solar Energy, Volume 82, Issue 8 August 2008, pages 758 – 762

[19] E. Lorenz, J. Remund, S. C. Müller, W. Traunmüller, G. Steinmaurer, D. Pozo, J. A. Ruiz-Arias, V. Lara Fanego, L. Ramirez, M. Gaston, C. Kurz, L. M. Pomares, C: G. Guerrero : **Benchmarking of different approaches to forecast solar iradiance**, Proc. 24th EUPVSEC, 21.9 – 25.9.2009, Hamburg, Germany.

[20] A. Paone, M. Joly, R. Sanjines, A. Romanyuk, J.-L. Scartezzini, A. Schüler : **Thermochromic films of VO2:W for**

«smart» solar energy applications, Proc. SPIE 7410, 74100F (2009)

[21] A. Paone, M. Joly, R. Sanjines, A. Romanyuk, J.-L. Scartezzini, A. Schüler : **Thermochromic films of VO2:W for «smart» solar energy applications**, Proceedings of the Cisbat International Scientific Conference, 2 – 3 September 2009

[22] M. Joly, M. Python, Y. Antonetti, J.-P. Rossy, A. Schüler : **Optical selective coating for solar absorbers**, Proceedings of the Cisbat International Scientific Conference, 2 – 3 September 2009

[23] A. Schüler : **Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion**, extended abstract, Proceedings of the Cisbat International Scientific Conference, 2 – 3 Septembre 2009

[24] D. P. Gruber, G. Engel, H. Sormann, A. Schüler, W. Papousek : **Modeling the absorption behavior of solar thermal collector coatings utilizing graded a-C:H/TiC layers**, Applied Optics, Vol. 48, No. 8, 2009

[25] Weber R. : **Long-term heat storage with NaOH**, Cisbat 2009, 2 – 3 Septembre 2009, EPFL Lausanne, Proceeding, pages 513 – 518

[26] MC. Munari Probst, Ch. Roecker : **Photovoltaics vs solar thermal: very different building integration possibilities and constraints**, Cisbat 09, Lausanne, 2 – 3 September

[27] S. Citherlet, J. Bony, B. Nguyen, Lesbat, HEIG-VD, Yverdon : **SOL-PAC Analyse des performances du couplage d'une pompe à chaleur avec une installation thermique pour la rénovation**, RF Projet 102321, 30 June 2008, programme «Chaleur ambiante, CCF, froid»

[28] A. Witzig, U. Stöckli, S. Geisshüsler, J. Thaler : **Solarsimulation in verschiedenen Anwendungsbereichen: Polysun als universelles Plugin**. Publikation im Tagungsband des 19. Symposiums für Thermische Solarenergie des OTTI, 6. bis 8. Mai 2009, Kloster Banz, Bad Staffelstein/D, www.velasolaris.com/vs2/files/2009-05-otti-solarthermie-polysun-plugin.pdf

[29] A. Witzig, F. Foradini, M.-C.Munari Probst : **Simulation Tool for Architects: Optimization of Active and Passive Solar Use**. Published in the proceedings of the international conference Cisbat, 2 – 3 September 2009, Lausanne/CH, www.velasolaris.com/vs2/files/2009-09-cisbat-polysuninside.pdf

[30] D. Pahud, J.-C. Hadorn, C. Cornu, S. Commend : **System sizing of a new central solar heating plant with a seasonal duct storage in Geneva**, Effstock 2009, Stockholm, June 2009

[31] Jin Hu, Sara Eicher, Osmann Sari, Paul Homsy, IGT HEIG-VD, Yverdon : **Formation of CO_2 Hydrate Slurry by Cooling CO2 Solution through to Heat Exchanger,** August 2009, RI Projet Geber Rüft Stifung, GRS 032/08

Liste des projets P+D

[32] Energie Solaire SA, Sierre : **Complexe sportif Guillamo**, janvier 2008, RF projet 100503

[33] SPF Rapperswil, **Solarthermische Anlage HSR**, Projekt 102695

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Photovoltaik

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch

Hocheffiziente Solarzellen

Am Institut de microtechnique (IMT) der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) am Standort Neuchâtel werden im Rahmen einer umfangreichen Forschungspartnerschaft mit der Firma Roth & Rau hoch effiziente Solarzellen auf der Grundlage von Heteroübergängen zwischen kristallinen und amorphen Schichten entwickelt (Quelle: IMT).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungsprogramm *Photovoltaik* setzte im Jahr 2009 seine Ausrichtung auf die industrielle Umsetzung, die Qualitätssicherung und die internationale Wettbewerbsfähigkeit fort. Gleichzeitig wurden neue, mittel- und längerfristig aussichtsreiche Forschungsthemen verstärkt. Laufende Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sowie Projekte im Bereich von Pilot- und Demonstrationsanlagen umfassen im Berichtsjahr 2009 rund 55 Projekte, wobei alle der Programmleitung bekannten Projekte mit einer Förderung der öffentlichen Hand berücksichtigt sind. Das Forschungsprogramm verfolgt in der Periode 2008–2011 die folgenden Ziele [32]:

- Senkung der Kosten der Solarzellen und -module;
- Steigerung des Wirkungsgrades (Solarzellen);
- Senkung des Material- und Energieeinsatzes;
- Vereinfachung und Standardisierung der elektrischen Systemtechnik; Steigerung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Wechselrichtern;
- Erhöhung der Verfügbarkeit und der Vielfalt industrieller Produkte.

Dazu ist das Forschungsprogramm Photovoltaik in folgende fünf Bereiche aufgeteilt:

Solarzellen

Verschiedene materialspezifische Ansätze zu Dünnschichtsolarzellen stellen hier den wichtigsten Schwerpunkt dar (Silizium, Verbindungshalbleiter, Organische Materialien). Verstärkt wurden Heteroübergänge zwischen Dünnschicht- und kristallinen Schichten bearbeitet. Organische und Polymersolarzellen als mögliche langfristige Technologieoptionen gewinnen gesamthaft an Bedeutung. Neu findet Grundlagenforschung auch an elektrochemisch abgeschiedenen Schichten statt.

Module und Gebäudeintegration

Das Gebiet der Solarmodule ist im Forschungsprogramm Photovoltaik eng mit der Anwendung der Gebäudeintegration verbunden. Im Vordergrund stehen Modultechnologien, welche mit den in der Schweiz entwickelten Solarzellen einhergehen.

Elektrische Systemtechnik

Bei der elektrischen Systemtechnik, insbesondere bei Wechselrichtern, steht die Qualitätssicherung im Vordergrund, einschliesslich entsprechender Normen. Ein in Zukunft wichtiger werdendes Thema ist die Wechselwirkung der Photovoltaik mit dem elektrischen Netz und ihre Integration ins elektrische Netz.

Begleitende Themen

Zum einen geht es hier um relevante technische und nicht technische Themen zur Marktentwicklung (z.B. Hilfsinstrumente, Monitoring, Umweltaspekte). Andererseits sind hier auch auf andere Energiethemen übergreifende Projekte (z.B. Gebäude, Mobilität, Speicherung) angesiedelt.

Institutionelle internationale Zusammenarbeit

Sie erfolgt einerseits projektbezogen auf allen Gebieten und andererseits im Rahmen des Photovoltaik-Programms (PVPS) der Internationalen Energieagentur (IEA), der Europäischen Photovoltaik-Technologieplattform (EU PV TP), der europäischen PV-ERA-Net-Kooperation (ERA: European Research Area) und der Normen und Standards festlegenden Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC).

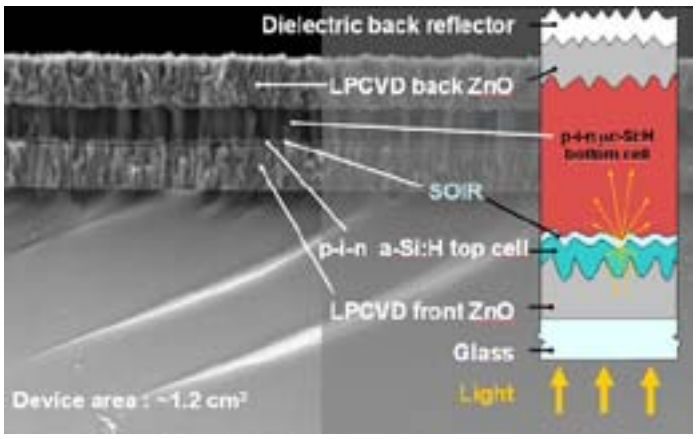
Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Solarzellen

Die grosse Vielfalt an Themen in der Schweizer Solarzellenforschung konnte im Berichtsjahr 2009 dank der breiten Abstützung dieser Forschung mit Erfolg fortgesetzt und ausgebaut werden. Nebst der Projektförderung durch das BFE erfolgen hier zahlreiche EU- und KTI-Projekte sowie Projekte im Rahmen des Competence Center Energy and Mobility (CCEM) des ETH-Bereichs, Swisselectric Research und weiteren Förderstellen.

Dünnschichtsilizium

Die wesentlichen Entwicklungen im Bereich des Dünnschichtsiliziums finden an der EPFL in



Figur 1: Transmissionselektronenmikroskop-Bild und Schema einer mikromorphen Tandemsolarzelle mit einem SiO_x-Zwischenreflektor (Quelle: IMT).

Figur 2: Neue PECVD-Cluster-Depositionsanlage zur Entwicklung der Heteroübergangs-Solarzelle (Quelle: IMT).

Neuchâtel (IMT, vormals Universität Neuenburg), und Lausanne, sowie bei den Unternehmen Oerlikon Solar (Trübbach und Neuchâtel) und VHF-Technologies (Yverdon) statt. Diese Aktivitäten bilden nach wie vor den zentralen Schwerpunkt des Forschungsprogramms. Das Paul Scherrer Institut (PSI) und die EMPA Thun ergänzen diesen Themenbereich mit neuen Ansätzen.

Das IMT setzte im Berichtsjahr das Projekt zu *Silizium-Dünnschichtsolarzellen und -modulen* [1a] fort. Die Ziele dieses vierjährigen BFE-Projektes bestehen darin, die Kosten von Silizium-Dünnschichtsolarzellen weiter zu senken, wobei amorphes Silizium, SiGe-Verbindungen und mikrokristallines Silizium Gegenstand der Forschung sind. Es sollen diejenigen Fortschritte erzielt werden, welche Herstellungskosten < 1 €/Wp bei einem Wirkungsgrad von > 10 % erlauben. Die Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgte primär mit den Unternehmen Oerlikon Solar und VHF-Technologies. Neu hinzugekommen ist die Firma Roth & Rau, welche mit dem IMT eine umfangreiche Forschungspartnerschaft eingegangen ist. Folgende Resultate aus dem Berichtsjahr seien hier erwähnt:

- *Materialien*: Im Berichtsjahr wurden die Materialeigenschaften von SiO_x-Schichten als optische Zwischenschichten analysiert (Fig. 1). Weiter erfolgten Arbeiten zu den transparenten und leitenden Oxidschichten (TCO), welche für die Lichtstreuung und -absorption in der Solarzelle und damit für den erzielbaren Strom von Bedeutung sind.
- *Prozesse*: Ein Schwerpunkt war die Herstellung von mikrokristallinem Silizium bei hohen Abscheideraten, wobei der Depositionsprozess und die Materialeigenschaften untersucht wurden. Es wurde zudem ein neues Lasersystem für die Laserstrukturierung und -verschaltung der Solarzellen implementiert.
- *Komponenten*: Die erwähnten Schichten wurden auf verschiedenen Substraten für amorphe sowie mikromorphe Solarzellen optimiert. Dabei wurden kleine aber stetige Fortschritte im Wirkungsgrad der verschiedenen Material- und Substratkonfigurationen erzielt.
- *Zuverlässigkeit*: Es wurden Laminierungsversuche an einem Laborgerät und einem kommerziellen Gerät der Firma 3S Swiss Solar System durchgeführt.

Das KTI-Projekt *Flexible photovoltaics – next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules* [1b] wurde im Berichtsjahr zwischen dem IMT und VHF-Technologies abgeschlossen. Durch Strukturierung der Kunststoffsubstrate wurde die Lichtabsorption erhöht und es wurden erste Module mit Tandemzellen realisiert. Ein weiteres KTI-Projekt des IMT befasst sich mit *transparenten leitenden Oxyden auf der Grundlage von ZnO* [1c].

Das durch den Axpo-Naturstromfonds unterstützte Projekt *Thific – Thin film on crystalline silicon* [1d] wurde am IMT fortgesetzt. In diesem Vorhaben werden extrem effiziente Solarzellen mit 20–22 % Wirkungsgrad angestrebt. Dabei kommt das bekannte Konzept eines Heteroübergangs zwischen verschiedenen Schichten aus kristallinem und amorphem bzw. mikrokristallinem Silizium zur Anwendung (HIT-Zelle). Zusammen mit dem Forschungspartner Roth & Rau wurde in einer industriekompatiblen Anlage auf texturierten Wafern ein Wirkungsgrad von 18,5 % realisiert.

Im EU-Projekt *Hetsi: Heterojunction solar cells based on a-Si/c-Si* [1e] arbeitet das IMT auch international auf dem Thema der Heteroübergang-Solarzelle. Das Projekt konzentriert sich auf das Verständnis und die Prozessphysik dieser Hocheffizienzzelle. In Hinsicht auf die industrielle Nutzung der Projektergebnisse wurde am IMT ein neues automatisiertes grossflächiges Depositionssystem (410 × 520 mm^2) aufgebaut (Fig. 2). Ein neues KTI-Projekt *Ultra-high conductivity metallization pastes for heterojunction solar cells TCOC* [1f] hat im Berichtsjahr begonnen.

Das EU-Projekt *Athlet* [1g] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Die Arbeiten des IMT konzentrierten sich hier ergänzend zum BFE-Projekt auf mikromorphe Solarzellen und deren Produktion in industriellen Anlagen von Oerlikon Solar. Mit der mikromorphen Solarzelle wurde dabei ein stabilisierter Wirkungsgrad von 10,2 % erzielt.

Die Industriepartner des IMT erzielten ihrerseits wichtige Technologiefortschritte. Als Beispiel sei der Wirkungsgrad von grossflächigen (1,3 x 1,4 m^2) mikromorphen Solarmodulen von Oerlikon Solar aufgeführt, welcher 2009 einen Anfangswert von 11 % erreichte und damit seit 2008 um rund 20 % erhöht werden konnte [33]. Roth & Rau weihte im Herbst 2009 ihr Schweizer Forschungslabor am IMT ein [34].

Ein KTI-Projek am CRPP der EPFL befasst sich mit der Entwicklung eines neuen Reaktors für die Plasma-unterstützte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD) von Dünnschichtsolarzellen [2].

Ein weiteres BFE-Projekt am PSI geht der Frage nach optimalen Ansätzen für zweidimensionale optische Beugungsstrukturen auf Silizium-Dünnschichtsolarzellen nach [3]. In einer ersten Phase werden diese numerisch modelliert. Später sollen solche Strukturen experimentell realisiert und ausgemessen werden. Im Berichtsjahr wurde die Entwicklung eines zwei-dimensionalen numerischen Modells vorangetrieben.

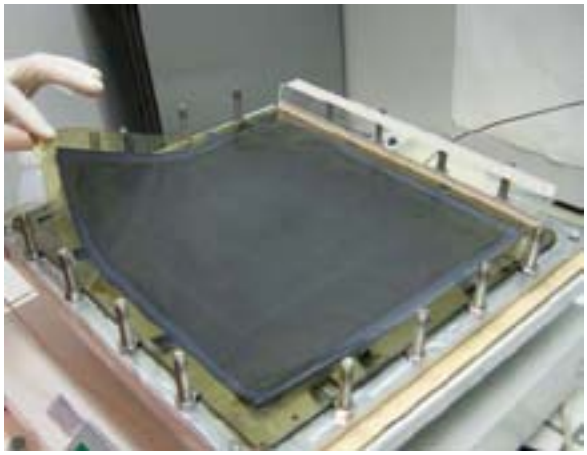
Die EMPA Thun arbeitet im EU-Projekt *High-Ef – Large grained, low stress multi-crystalline silicon thin film solar cells on glass by a novel combined diode laser and solid phase crystallization process* [4a] mit. Der neue Prozess verbindet eine durch Laserschmelzen verursachte Kristallisation einer amorphen Siliziumschicht mit dem Verfahren der Festphasenepitaxie. Daraus soll ein wettbewerbsfähiger Prozess für Dünnschichtsolarzellen mit einem Wirkungsgrad grösser 10 % erreicht werden. Die Technologie soll durch den deutschen Hersteller CSG Solar genutzt werden. Im Berichtsjahr wurden die Mikrostruktur und die mechanische Festigkeit der erzeugten Siliziumschichten charakterisiert.

II-VI Verbindungen (CIGS)

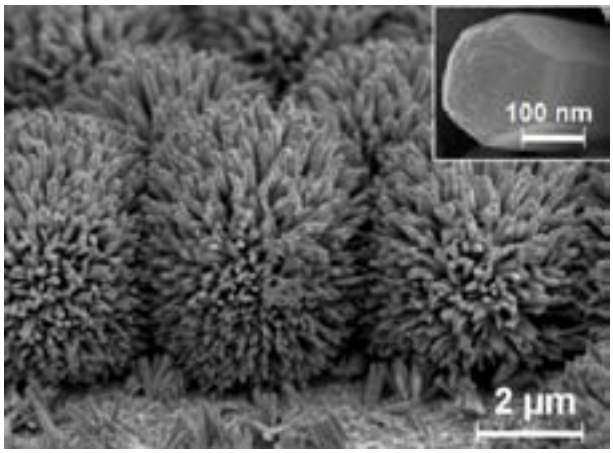
Die neu an der EMPA (vormals ETH Zürich) angesiedelte Forschungsgruppe zu Dünnschicht-Solarzellen auf der Basis von Verbindungshalbleitern (CIGS, CdTe) hat im Jahr 2009 ihr Labor an der EMPA neu aufgebaut. Das BFE-Projekt *Flexible CIGS solar cells on large area polymer foils* [5a] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen (Fig. 3). Mit dem Ziel eines effizienten und gleichmässigen roll-to-roll-Prozesses zur Herstellung von flexiblen CIGS-Solarzellen wurden optimierte Eigenschaften der Verdampfungsprofile der einzelnen Schichtmaterialien sowie die Identifizierung geeigneter Materialien für die rückseitige Kontaktierung der Zellen angestrebt. Diese Arbeiten werden im neuen Projekt *Febulas* [5b] fortgesetzt, wobei das bisher verwendete Cadmium (Cd) durch Materialien mit ähnlichen Eigenschaften ersetzt und die Prozesstechnologie insgesamt verbessert werden soll.

Das neue BFE-Projekt *Impucis* [5c] befasst sich mit dem Einfluss von Verunreinigungen auf die Eigenschaften von CIGS Solarzellen. Ziel des Projektes ist es, die für gute Resultate notwendige Reinheit der Ausgangsmaterialien der CIGS Solarzellen, insbesondere von Indium, zu bestimmen. Im Rahmen dieses Projektes, welches in einer bilateralen Zusammenarbeit mit flämischen Partnern erfolgt, wird ein neues CIGS-Depositionssystem aufgebaut.

Im BFE-Projekt *Thin film CIGS solar cells with a novel low cost process* [5d] hat die EMPA die Grundlagen einer durch einen Vakuum freien Prozess hergestellten CIGS-Solarzelle entwickelt. Der Prozess wurde soweit konkretisiert, dass ausgehend von organischen Lösungen CIGS-Solarzellen mit 4 % Wirkungsgrad hergestellt werden konnten. Ein Thema ist dabei die Verhinderung einer unerwünschten organischen Zwischenschicht, welche die Eigenschaften der Solarzelle beeinträchtigt. Das Projekt wurde im Berichtsjahr abgeschlossen und soll in einem neuen EU-Projekt fortgesetzt werden.



Figur 3: Grossflächige CIGS-Solarzelle auf einem Kunststoffsubstrat (Quelle: EMPA).



Figur 4: Elektronenmikroskop-Aufnahme von Zinkoxid-Nanostrukturen, die durch elektrochemische Abscheidung hergestellt wurden (Quelle: EMPA).

Das im Berichtsjahr abgeschlossene EU-Projekt *Larcis* [5e] befasste sich mit grossflächigen Prozessen zur industriellen Produktion von CIGS-Solarzellen. Dabei untersuchte die EMPA einerseits die Optimierung der Zellrückkontakte auf der Grundlage von Molybdän bzw. TiN und ZrN sowie andererseits den Einfluss einer Natrium-Behandlung auf die Eigenschaften der CIGS-Solarzellen. Im Berichtsjahr wurde der Bezug zwischen dem Schichtwachstum und der Stabilität der Solarzellen untersucht.

Im Ende 2009 abgeschlossenen EU-Projekt *Athlet* [5f] war die EMPA an zwei Arbeitspaketen zu CIGS-Solarzellen beteiligt. Im Berichtsjahr standen für dabei mittels Ultraschall Spray Pyrolyse (USP) hergestellte In_2S_3-Schichten im Vordergrund. Damit konnten CIGS-Solarzellen mit 10,8 % Wirkungsgrad erzielt werden.

Das KTI-Projekt *Laser patterning of CIGS solar cells on flexible foils for monolithic integration* [5g] in Zusammenarbeit mit der Start-up Firma Flisom und der Berner Fachhochschule für Technik und Informatik (Institut für angewandte Laser Technologie) wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Dabei wurde die Laser-Strukturierung von flexiblen CIGS-Solarzellen für die monolithische Verschaltung zu Solarmodulen untersucht. In einem mit dieser Technik hergestellten Prototypmodul konnte ein Wirkungsgrad von 8,4 % erzielt werden.

Ein neues KTI-Projekt befasst sich mit multifunktionalen Rückkontakten für flexible Dünnschichtsolarzellen [5h].

Farbstoff und organische Solarzellen

Organische Solarzellen – Farbstoffsolarzellen und insbesondere neuartige Konzepte – gewinnen derzeit national und international rasch an Bedeutung. Auch in der Schweiz befasst sich eine Reihe von Forschungsinstituten und vermehrt auch die Industrie mit diesen Themen.

Die Entwicklung von farbstoffsensibilisierten, nanokristallinen Solarzellen [6a] wurde an der EPFL fortgesetzt. Wichtige Arbeiten dazu erfolgen auch im EU-Projekt *Robust DSC* [6b] mit dem Ziel, Materialien und Herstellungsprozesse für ein Solarmodul mit 7 % Wirkungsgrad zu entwickeln. Parallel dazu werden grundlegendere Untersuchungen durchgeführt, welche einen Laborwirkungsgrad von 14 % zum Ziel haben. Im Berichtsjahr wurde unter Verwendung neuer Farbstoffe ein Wirkungsgrad von 12 % erreicht.

Mit Unterstützung der Gebert-Rüf-Stiftung arbeitet das *Institute of Computational Physics* an der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) mit der EPFL am neuen Projekt *ModSol – Modelling, simulation and loss analysis of dye sensitized solar cells* [7]. Mittels verschiedener Modelle soll hier das optische, physikalische und elektrochemische Verhalten der Farbstoffsolarzelle modelliert werden. Im Berichtsjahr wurde ein optisches Modell entwickelt, welches Lichteinkopplung, Absorption und Ladungserzeugung abbildet. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erreicht werden.

Im Vorhaben *Organic Photovoltaic Devices* [8a] befasst sich die EMPA im Labor für funktionale Polymere mit stark fluoreszierenden Squarain-

Farbstoffen. Es konnten damit Farbstoffsolarzellen mit einem Wirkungsgrad von 5,4 % erzielt werden. In einem neuen KTI-Projekt entwickelt die EMPA auf dieser Basis *neuartige Sensibilisatoren für Farbstoffsolarzellen* [8b].

Die EMPA Dübendorf baut ihre Kompetenz auf dem Gebiet der organischen Solarzellen weiter aus. Das neue BFE-Projekt *HIOS-Cell* [8c], welches als europäische Zusammenarbeit im Rahmen des PV-ERA-NET Netzwerkes stattfindet, verwendet Heteroübergänge zwischen Cyanin und PCBM Blends zur Erzeugung neuer Nanostrukturen. Im Berichtsjahr wurde die Dynamik des unterliegenden Prozesses untersucht. Ein neues KTI-Projekt *FABRI-PV Transparent fabric electrodes for organic photovoltaics* [8d] findet in Zusammenarbeit mit Sefar statt und befasst sich mit elektrisch leitenden Polymer Fasern als Ersatz für TCO als Elektrodenmaterial.

Das BFE-Projekt *Apollo* [9] verbindet europäische Kompetenzen auf dem Gebiet der Plastikelektronik, um dadurch einfach herstellbare organische Solarzellen zu entwickeln. Aus der Schweiz beteiligen sich nebst der ZHAW, welche das Projekt leitet, das Chemieunternehmen Ciba und das Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM). Im Berichtsjahr konnten auf der Grundlage neuer Polymere der Ciba rasche Projektfortschritte erzielt werden, welche bereits zu einem Wirkungsgrad von 6 % geführt haben. Mit einem Tintenstrahldrucker erzeugte organische Zellen erreichten mehr als 4 % Wirkungsgrad.

Das EU-Netzwerkprojekt *OrgaPvNet* [10a], welches europäische Akteure auf dem Gebiet der organischen Solarzellen zusammenführt, wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Die Firma Solaronix beteiligte sich als eines von insgesamt vier KMUs an diesem Projekt. Die Aktivitäten konzentrierten sich auf Workshops und Praktika, in denen organische Solarzellen sowohl wissenschaftlich-technisch wie marktbezogen thematisiert wurden. Das im Berichtsjahr abgeschlossene EU-Projekt *Napolyde* [10b] steht für interdisziplinäre Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der nanostrukturierten Polymer-Deposition mit Anwendungen allgemein im Energiebereich und «smart devices», inklusive der Photovoltaik. Auf Laborgrössen von 0,6 cm^2 wurde ein Wirkungsgrad von 5,9 % erreicht während monolithisch verschaltete Farbstoffzellen-Kleinmodule (10 × 10 cm^2) einen Wirkungsgrad von 4,8 % erreichten. Solaronix beteiligt sich am neuen EU-Projekt *Innovasol – Innovative materials for future excitonic solar cells* [10c].

Das KTI-Projekt *Development of efficient luminescent concentrators based on inorganic/organic nanomaterials for applications in solar energy conversion* [11] wird durch das Institut für anorganische Chemie der Universität Zürich in Zusammenarbeit mit der Firma Optical Additives durchgeführt. In diesem Projekt werden Farbstoff-Zeolithen eingesetzt, welche durch ihre supramolekulare Organisation eine effiziente Konzentration sicherstellen sollen.

Im neuen BFE-Projekt *Eta Solar Cell* [4b] untersucht die EMPA Thun extrem dünne Absorber (ETA) auf der Basis von Zinkoxid-Nanostrukturen durch elektrochemische Deposition (Fig. 4). Es konnten geordnete, Igel-ähnliche Nanodrähte erzeugt werden, welche eine hohe optische Reflektion vorweisen und damit als Bausteine für künftige Solarzellen in Frage kommen.

Übergreifende Projekte

Das durch die EMPA Dübendorf koordinierte CCEM-Projekt *ThinPV* [8e], welches auch durch Swisselectric Research unterstützt wird, führt die verschiedenen Akteure der Schweizer Dünnschichtsolarzellen-Forschung in einem Projekt zusammen. Die Projektarbeiten betrafen im Berichtsjahr die schnelle Deposition von Siliziumschichten, neue Tandemzellen auf der Grundlage von CIGS- und Farbstoffsolarzellen sowie die optische Modellierung dieser Zellen. Eine wichtige Aufgabe erfüllt das Projekt auch hinsichtlich des wissenschaftlichen Austauschs, insbesondere für junge Nachwuchswissenschafter, wozu verschiedene internationale Workshops stattgefunden haben.

Solarmodule und Gebäudeintegration

Gebäudeintegrierte Anlagen stellen nach wie vor das aus Sicht der Entwicklung primär angestrebte Anwendungsgebiet der Photovoltaik in der Schweiz dar.

Swiss Solar Systems (3S) hat das BFE-Projekt *Smarttile* [12] eines neuen photovoltaischen Dachelelements weiter verfolgt. Die Projektziele wurden im Berichtsjahr angepasst und verfolgen die Weiterentwicklung des MegaSlate-Systems, insbesondere die Sicherstellung der Kompatibilität mit den relevanten Normen, sowie die Ergänzung mit gut

Figur 5: Brandschutztest am Modul MegaSlate II (Quelle: 3S).

Figur 6: Mechanische Belastungstests für Modulprüfungen für IEC-Tests (Quelle: SUPSI).

integrierten thermischen Kollektoren und Dachfenstern. Dabei fliessen die Erkenntnisse aus dem bisherigen Projekt ein (Fig. 5).

An der EPFL begann im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit Flexcell das materialorientierte KTI-Projekt *Profiled photovoltaic modules* [13]. Dabei sollen einerseits durch neuartige texturierte Nanokomposit-Beschichtungen der Wirkungsgrad erhöht und andererseits leichte Polymer-Kompositstrukturen zur mechanischen Befestigung der Module entwickelt werden.

Ergänzend zu diesen Entwicklungsprojekten verfolgt das neue Projekt *Bisol* [14a] an der Tessiner Fachhochschule SUPSI in Lugano eine stärkere Vernetzung mit Baufachleuten, um das Thema der gebäudeintegrierten Photovoltaik zusammen mit Baufachkreisen zu vertiefen und so die vorhandenen Lücken zwischen diesen Fachgebieten zu schliessen. Dazu erfolgten im Berichtsjahr in Zusammenarbeit mit Swissolar zwei Workshops. Vereinzelte neue Konzepte und Produkte zur Photovoltaik-Gebäudeintegration wurden im Rahmen von Pilot- und Demonstrations-Projekten erprobt (siehe entsprechendes Kapitel).

Elektrische Systemtechnik

Das Schwergewicht in der Systemtechnik liegt auf der Qualitätssicherung von Komponenten (Module, Wechselrichter), Systemen (Auslegung, Energieertrag) und Anlagen (Langzeitbeobachtungen).

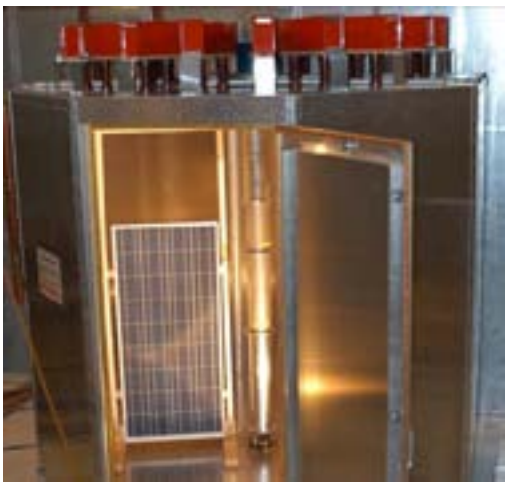
Das am SUPSI angesiedelte Photovoltaik-Forschungs- und Testlabor ISAAC hat im Berichtsjahr seine Infrastruktur deutlich ausgebaut [14b]. Das gemäss der ISO-Norm 17025 für Messungen zertifizierte Labor konnte im November 2009 die Akkreditierung verlängern. Die Anzahl der als Dienstleistung für Dritte ausgeführten Messungen nahm deutlich zu. Der 11. Testzyklus der Aussenmessungen an 13 kommerziellen Modulen mit unterschiedlichen Technologien wurde fortgesetzt. Die Leistungen verschiedener kristalliner Module lagen (bis auf eine Ausnahme) unter Berücksichtung der Anfangsdegradation nach zehn Monaten Messzeit innerhalb der spezifizierten Toleranzen von ±2,5 %. Von den Modulen mit Dünnschichttechnologien liegen noch nicht alle Auswertungen vor.

Das EU-Projekt *Performance* [14c] wurde im Berichtsjahr abgeschlossen. Dieses vom *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme* in Freiburg koordinierte vierjährige Projekt befasste sich in Momentanmessungen und Langzeitanalysen mit allen pränormativen Arbeiten im Bereich Solarzelle bis Gesamtsysteme. Das ISAAC war an der Bestimmung der Leistungscharakteristik und Energieproduktion von Photovoltaik-Modulen auf der Grundlage von Innen- und Aussenmessungen sowie deren Modellierung beteiligt.

Im Berichtsjahr hat das ISAAC ein neues Labor zur Ausführung von *zertifizierten Messungen von Solarmodulen gemäss IEC-Normen* aufgebaut [14d]. Die erforderliche Infrastruktur umfasst Kammern für Temperatur- und Klimaprüfungen, die Geräte für statische mechanische Belastungen (Fig. 6), Hagelprüfungen, UV-Festigkeit und die elektrische Charakterisierung sowie die notwendigen Sonnensimulatoren. Sämtliche Einrichtungen wurden installiert und befinden sich in der Vorbereitung zur Akkreditierung.

Einen anderen, ergänzenden Ansatz zur Prüfung von Solarmodulen verfolgt die ZHAW in Winterthur. Mit Unterstützung der Elektrizitätswerke des

Figur 7: Mobiles Messlabor für Solarmodule (Quelle: EKZ).



Figur 8: Stossstromgenerator für Spannungsprüfungen (Quelle: HTI Burgdorf).

Kantons Zürich wurde hier ein *mobiles Solarlabor* [15a] in einem Kleinbus gebaut (Fig. 7). Die Messeinrichtung besteht aus einem PASAN-Sonnensimulator, einem 5,5 m langen Lichttunnel und dem Modulhalter am Ende des Fahrzeugs. Mit dieser Anordnung ist es möglich, Module bis zu einer Grösse von 2 × 2 m^2 zu vermessen.

In Zusammenarbeit mit der Firma PASAN verfolgt ein neues KTI-Projekt am ISAAC die Entwicklung eines *Multipurpose PV Module Testers* [14e]. Damit sollen flexible Testbedingungen möglich werden, welche sowohl unterschiedlichen Solarmodulen wie vermehrt den realen Betriebsbedingungen gerecht werden sollen. Ein weiteres KTI-Projekt *Inspect* [16] an der EPFL untersucht die Machbarkeit eines inline-Kontrollsystems für Solarmodulhersteller.

Am Photovoltaiklabor an der FH Burgdorf wurde das Projekt *Photovoltaik-Systemtechnik PVSYSTE 2007–2010* [17a] fortgesetzt. Seit 1992 werden von diesem Labor Langzeitmessungen – teilweise ohne Unterbrechung – an rund 70 Photovoltaikanlagen durchgeführt. Im Berichtsjahr wurde die Entwicklung des 100-kW-Simulators eines Solargenerators abgeschlossen und erste Tests durchgeführt. Das Labor beteiligte sich an den Arbeiten zu der Prüfnorme für Wechselrichter prEN50530, welche nun im Wesentlichen akzeptiert ist. Die Untersuchungen bezüglich Blitzstromverhalten von Bypassdioden wurden weitergeführt, und es wurden hierzu für einige Hersteller Testmessungen durchgeführt (Fig. 8). Eine europäische Zusammenarbeit findet im neuen EU-Projekt *PV-Servitor* [17b] statt. Dabei geht es um die Entwicklung eines automatischen Reinigungsroboters für Solarkraftwerke.

Begleitende Themen

Das symbolträchtige Projekt *Solarimpulse* [18] wurde im Berichtsjahr fortgesetzt. Ziel dieses Projektes ist die Weltumrundung mit einem photovoltaisch angetriebenen Flugzeug. Es fanden dazu im Berichtsjahr erste Flugversuche statt. Ein ähnliches Projekt ist *PlanetSolar* [19], welches die Erde als solarangetriebenes Boot umrunden wird. Der Bau von PlanetSolar war Ende 2009 weit fortgeschritten. Beide Projekte stellen primär private Initiativen dar, wobei in konkreten Technologiefragen eine Zusammenarbeit mit Hochschulen erfolgt.

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, sowohl in neuen Projekten mit der KTI als auch in der Form von direkten Mandaten der Industrie an ausgewählte Forschungsinstitute. Auf Programmebene wurde die Zusammenarbeit mit vielen Stellen des Bundes, der Kantone und der Elektrizitätswirtschaft weiter gepflegt. Diese vielfältigen Kontakte erlauben die anhaltend wichtige breite Abstützung des Forschungsprogramms.

Internationale Zusammenarbeit

Die traditionsreiche internationale Zusammenarbeit wurde auch im Berichtsjahr fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene wie im Rahmen der institutionellen Zusammenarbeit innerhalb der IEA, der IEC und den Europäischen Netzwerkprojekten. Auf der Projektebene konnte die erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb der EU in bestehenden und neuen Projekten fortgesetzt werden. Im Jahr 2009 waren es zehn Projekte im 6. bzw. 7. Rahmenforschungsprogramm der EU.

Die Beteiligung am Photovoltaikprogramm der IEA (IEA PVPS) wurde im Berichtsjahr mit Kontinuität fortgesetzt, sowohl auf der Projektebene als auch im *Executive Committee* (ExCo) [35].

Die Firma *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 2008 [36] ausgearbeitet. Auf dieser Grundlage wurde die 14. Ausgabe des jährlichen internationalen Berichtes (*Trends Report*) über die Marktentwicklung der Photovoltaik in den IEA-Ländern erstellt [37].

Im Rahmen der interdepartementalen (SECO, DEZA, BAFU, BFE) Plattform REPIC zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit [39] leistet das Büro *Entec* den Schweizer Beitrag zu IEA PVPS Task 9 über die *Photovoltaik-Entwicklungszusammenarbeit* [21a]. Dieses Projekt befasst sich mit der nachhaltigen Verbreitung der Photovoltaik in Entwicklungsländern [39] und thematisiert auch Aspekte der solaren Wasserversorgung.

Das Ingenieurbüro *Planair* arbeitete in IEA PVPS Task 10 zur *Photovoltaik im urbanen Raum* [22] mit, welcher im Berichtsjahr mit verschiedenen Berichten [40–43] abgeschlossen wurde. Das Unternehmen *Sputnik* beteiligt sich an IEA PVPS Task 11 zu *hybriden Photovoltaik-Systemen in Mininetzen* [23]. *ESU Services* vertritt die Schweiz im IEA PVPS Task 12 zu *Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekten* [24] der Photovoltaik. In diesem Projekt sollen industriell möglichst aktuelle, relevante und international abgeglichene Informationen zu diesem bedeutenden Thema aufgearbeitet und publiziert werden. Die Schweiz war führend am ersten Bericht zu Lebenszyklus-Analysen [44] beteiligt.

Das Unternehmen *Meteotest* [25] und die *Groupe Energie* an der Universität Genf [26] erbringen zusammen den Schweizer Beitrag zum Task 36 *Solar resource knowledge management*. Task 36 ist Bestandteil des Programms *Solare Wärme und Kälte* (SHC) der IHEA, inhaltlich ist es jedoch für alle Solartechnologien relevant. Dementsprechend erfolgt eine Zusammenarbeit mit den weiteren IEA-Programmen zur Solarenergie (IEA PVPS und IEA SolarPACES). Im Projekt wird die Qualität verschiedener Strahlungsmodelle und daraus abgeleiteter Produkte verglichen und optimiert.

Im Berichtsjahr wurden zwei neue IEA PVPS Tasks beschlossen: Task 13 zu *Performance und Zuverlässigkeit von PV Anlagen* [27a] sowie Task 14 zur *hohen Penetration von PV Anlagen in elektrischen Netzen*. Diese Projekte werden 2010 ihre Arbeit aufnehmen.

Swissolar vertritt die Schweiz im TC 82 der IEC zu *Photovoltaik Normen* [28a].

Die Beteiligung am EU-Projekt *PV-ERA-Net* [21b], welches Programmkoordinationsstellen und verantwortliche Ministerien aus 13 Ländern unter dem ERA-Net-Schema zusammenführt, wurde im Berichtsjahr als EU-Projekt abgeschlossen. Es soll in reduziertem Umfang als von den beteiligten Ländern getragenes Netzwerk weiterverfolgt werden [45].

Die Europäische Photovoltaik-Technologie-Plattform publizierte im Berichtsjahr den *Implementation Plan* [46], welcher die zur Erreichung der Forschungsziele notwendigen Projekte und Mittel zusammenstellt. Die Schweiz ist in der Europäischen *Photovoltaik-Technologie-Plattform* [47] sowohl im Steuerungsausschuss als auch in einzelnen Arbeitsgruppen vertreten. Im Rahmen des von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen *Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)* [48] wurde die *Solar Europe Industrial Initiative* vorangetrieben.

Figur 9: 12,5-kW-P&D-Anlage mit fünf verschiedenen Modultechnologien (Quelle: EKZ).

Figur 10: 86-kW-P&D-Anlage von Flexcell (Quelle: VHF Technologies).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Laufende Projekte

Im Berichtsjahr begann ein neues Projekt mit flexiblen Photovoltaik-Gebäudeelementen von *VHF-Technologies* [29a] mit einer Gesamtleistung von 142 kW. Es bietet die Möglichkeit, Bau und Betrieb verschiedener, neu entwickelter flexibler Photovoltaik-Dachelemente auf amorpher Basis pilotmässig zu testen, die Produktionswerte im Detail zu untersuchen und zu vergleichen sowie die Kosten zu optimieren (Fig. 9).

Anlagen

Praxistest Backup-Wechselrichter: Verhalten eines netzgekoppelten Wechselrichters mit unterbruchsfreier Stromversorgung bei Stromausfall im Praxistest; Leitung: Basler & Hofmann [28b].

EKZ-Solarstromdach (Fig. 10): Fünf verschiedene Modultechnologien mit einer Gesamtleistung von 12,5 kW; Leitung: ZHAW [15b].

Messkampagnen

Degradations- und Annealing-Verhalten von Modulen mit amorphen Zellen: Messungen und Analysen auf der Basis der Flachdachintegration CPT Solar; Leitung: ISAAC [14f].

Photovoltaik-Lärmschutzanlage Bahnhof Münsingen: Bifaciale Photovoltaik-Lärmschutzanlage mit einer Nennleistung von 6,5 kW (Frontseite) bzw. knapp 5 kW (Rückseite); Leitung: TNC [27b].

Studien – Hilfsmittel – diverse Projekte

Photovoltaikstatistik der Schweiz 2008; Leitung: Ingenieurbüro Hostettler [30a]

Im Jahr 2009 abgeschlossene Projekte

2-kW-Flexcell-Experimentaldach mit flexiblen amorphen Solarzellen in einem Dachelement aus einer Thermoform; Leitung: VHF-Technologies [29b].

Messkampagne Wittigkofen: Detaillierte Messungen und Auswertungen mit Visualisierung der Daten zur 80-kW-Fassade Wittigkofen; Leitung: Ingenieurbüro Hostettler [30b].

PV-Anlage «Nullenergieschulhaus Ekkharthof», Kreuzlingen: Einbindung einer PV-Anlage ins Energiekonzept eines Nullenergieschulhauses; Leitung: Böhni Energie & Umwelt [31].

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

2009 war für das Forschungsprogramm *Photovoltaik* in verschiedener Hinsicht ein besonderes Jahr. Aus Sicht der Forschungsinhalte wurden mit den Projekten zu organischen Solarzellen und den ETA-Solarzellen Themen verstärkt bzw. neu angefangen, wie es im aktuellen Forschungskonzept [32] vorgesehen ist. Nanostrukturen und -prozesse sind immer häufiger Bestandteil der Forschungsansätze. Aus Prozesssicht bilden Nicht-Vakuumprozesse sowie Cadmium-freie Schichten potenziell wichtige Entwicklungen. Parallel zu diesen inhaltlich neuen Ansätzen wurde die Laborinfrastruktur an verschiedenen Forschungsstätten zum Teil bedeutend ausgebaut (IMT, EMPA, ISAAC, HTI Burgdorf).

Durch das wachsende Interesse der Industrie finden vermehrt direkte Forschungskooperationen zwischen Industrie und Hochschulen statt (Bsp. Roth & Rau mit dem IMT). Seitens der Industrie ist trotz der Wirtschaftskrise eine Erweiterung der Industriebasis festzustellen, auch dies eine erfreuliche Entwicklung, welche den Zielen des Programmkonzeptes entspricht. Dies wird untermauert durch eine wachsende Anzahl von KTI-Projekten. Das Exportvolumen der Schweizer Photovoltaik-Industrie dürfte sich auch 2009 auf mindestens 1,5 Mrd. CHF belaufen.

In dem Mass, wie Industrie und Markt wachsen, gewinnen Qualitätssicherungsfragen laufend an Bedeutung. Auch in diesem Bereich haben neue Projekte begonnen. Für die Praxis von besonderer Bedeutung sind die neuen Messmöglichkeiten an den Fachhochschulen in Lugano und Burgdorf, welche zunehmend in Richtung zertifizierte Messungen gehen, die auch als Dienstleistung für Dritte ausgeführt werden.

Nicht zuletzt hat auch die Anfang 2009 eingeführte kostendeckende Einspeisevergütung ihre Wirkung bis in die Forschung, indem einerseits das Interesse verschiedenster Akteure, aber auch der Medien, an der Photovoltaik laufend wächst, und andererseits, indem Fragen aus der Praxis häufiger zu neuen Forschungsfragen führen (Bsp. Gebäudeintegration der Photovoltaik). Seitens des Marktes konnte eine grosse Dynamik beobachtet werden, die 2009 durch deutliche Preissenkungen begleitet war.

Zusammenfassend kann das Jahr 2009 für das Forschungsprogramm *Photovoltaik* als besonders aktiv beurteilt werden mit vielen neuen Entwicklungen in Forschung, Industrie und Anwendung. Damit wächst die Erkenntnis der Bedeutung der Photovoltaik für die künftige Energieversorgung.

Das Forschungsprogramm *Photovoltaik* wird weiter bestrebt sein, durch die breite Abstützung eine kritische Grösse zu bewahren und eine bedeutende Marktwirkung zu erzielen. Dazu soll von allen möglichen Fördermechanismen Gebrauch gemacht werden und diese gleichzeitig optimal koordiniert und zielführend eingesetzt werden.

Der nationale Informations- und Erfahrungsaustausch bleibt in der Schweiz weiterhin ein wichtiges Thema. Die Photovoltaik-Webseite beinhaltet alle wesentlichen Informationen sowie Berichte und dient damit als wichtiges Informationsinstrument, das laufend unterhalten wird (www.photovoltaik.ch). Die Schweizer Photovoltaik war an der 24. Europäischen Photovoltaik-Konferenz im September in Hamburg mit ihren Beiträgen gut vertreten [49]. Anfang 2010 findet die 8. Nationale Photovoltaik-Tagung in Winterthur statt.

Liste der Projekte

(JB) Jahresbericht

(SB) Schlussbericht

[1] C. Ballif et al. (christophe.ballif@epfl.ch), IMT-PVLAB/-EPFL, Neuchâtel: a) New processes and device structures for the fabrication of high efficiency thin film silicon photovoltaic modules (JB) b) Flexible photovoltaics – next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules (JB) c) Development of a novel surface treatment of LP-CVD ZnO layers used as Transparent Conductive Oxide for thin film silicon solar cells d) THIFIC: Thin film on crystalline Si (JB) e) HETSI: Heterojunction Solar Cells based on a-Si / c-Si (JB) f) Ultra-high conductivity metallization pastes for heterojunction solar cells TCOC g) ATHLET: Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics (JB) pvlab.epfl.ch.

[2] Ch. Hollenstein (christophe.hollenstein@epfl.ch), EPFL - CRPP, Lausanne: A new low ion energy bombardment PECVD reactor for the deposition of thin film silicon for solar cell applications (JB) crppwww.epfl.ch.

[3] D. Gablinger und R. Morf (david.gablinger@psi.ch), PSI, Villigen: Zweidimensionale Nanostrukturen für Silizium-Solarzellen (JB) www.psi.ch.

[4] X. Maeder und J. Michler (Xavier.Maeder@empa.ch), Empa, Thun: a) HIGH-EF – Large grained, low stress multi-crystalline silicon thin film solar cells on glass by a novel combined diode laser and solid phase crystallization process (JB) www.high-ef.eu b) J. Elias et al. (jamil.elias@empa.ch), Empa, Thun: ETA Solar Cell: Extremely thin absorber solar cell based on electrodeposited ZnO nanostructures (JB) www.empathun.ch.

[5] A. N. Tiwari et al. (ayodhya.tiwari@empa.ch), Empa, Laboratory for Thin Films and Photovoltaics, Dübendorf: a) Flexible CIGS solar cells on large area polymer foils with in-line deposition methods and application of alternative back contacts (SB Projekt 100964) b) Febulas: Flexible CIGS solar cells and mini-modules on polymer without – or with alternative buffer layer (JB) c) IMPUCIS: Influence of impurities on the performance of CIGS thin film solar cells (JB) d) Thin film CIGS solar cells with a novel low cost process (JB, SB Projekt 100964) e) LARCIS: Large-Area CIS Based Solar Modules for Highly Productive Manufacturing (JB) f) ATHLET: Advanced Thin-Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics (JB) g) Laser patterning of $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells on flexible foils for monolithic integration (JB) h) Multifunctional back electrical contact for flexible thin film solar cells (JB) www.empa.ch/tfpv.

[6] M. Grätzel (michael.graetzel@epfl.ch), EPFL SB ISIC LPI, Lausanne: a) Dye-sensitised nanocrystalline solar cells (JB) b) Robust DSC: Efficient and Robust Dye Sensitzed Solar Cells and Modules (JB) http://isic2.epfl.ch/page58671-en.html

[7] J.O. Schumacher und M. Schmid, G. Rothenberger und S. Wenger, (juergen.schumacher@zhaw.ch), Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW - ICP, Winterthur EPFL – LPI, Lausanne: ModSol: Modeling, simulation and loss analysis of dye-sensitized solar cells (JB) www.zhaw.ch.

[8] F. Nüesch et al. (frank.nueesch@empa.ch), EMPA, Dübendorf: a) Organic photovoltaic devices Unsymmetrical squaraine dyes for efficient conversion of low energy photons (JB) b) Neuartige Sensibilisatoren für Farbstoffsolarzellen: Squarain- und Heptamethinfarbstoffe mit einer grossen spektralen Vielfalt oberhalb 700nm c) J. Heier et al., R. Brönnimann, J. Groenewold (Jakob.Heier@empa.ch), EMPA, Laboratory for Functional Polymers Dübendorf, EMPA, Electronics, Metrology and Reliability, Physical and Colloid Chemistry, Utrecht University: HIOS-Cell: Nanoscale structuring of heterojunction ionic organic cells by liquid-liquid dewetting (JB) d) FABRI-PV – Transparent fabric electrodes for organic photovoltaics (JB) e) ThinPV - Cost efficient thin film photovoltaics for future electricity generation (JB) www.empa.ch.

[9] B. Ruhstaller et al., C. Winnewisser und T. Offermans, M. Turbiez und M. Düggeli, M. Wienk und R. Janssen, G. Garcia-Belmonte und J. Bisquert, (beat.ruhstaller@zhaw.ch), ZHAW, Winterthur, CSEM, Basel, Ciba Inc., Basel, TU Eindhoven, Netherlands, Universitat Jaume I, Spain: Apollo: Efficient areal organic solar cells via printing (JB) www.zhaw.ch.

[10] T. Meyer et al. (toby.meyer@solaronix.com), Solaronix, Aubonne: a) OrgaPvNet: Coordination Action towards stable and low-cost organic solar cell technologies and their application (JB) b) Napolyde: Nano structured polymer deposition processes for mass production of innovative systems for energy production & control and for smart devices (JB) c) Innovasol: Innovative Materials for Future Generation Excitonic Solar Cells (JB) www.solaronix.com.

[11] D. Brühwiler (bruehwi@aci.uzh.ch), ACI – University of Zurich, Zürich: Development of efficient luminescent concentrators based on inorganic/organic nanomaterials for applications in solar energy conversion (JB) www.aci.uzh.ch.

[12] T. Szacsvay (sz@3-s.ch), 3S, Lyss: Smarttile: Innovative Photovoltaik-Indachlösung (JB) www.3-s.ch.

[13] Y. Leterrier, A. Hessler, D. Fischer, (yves.leterrier@epfl.ch), LTC-IMX-EPFL, Lausanne CIME-EPFL, Lausanne VHF-Technologies, Yverdon les Bains: Profiled photovoltaic modules (JB) http://ltc.epfl.ch.

[14] R. Rudel et al. (roman.rudel@supsi.ch), ISAAC-DACD-SUPSI, Canobbio: a) BiSOL Building Integrated Solar Network – Brenet (JB) www.bisolnet.ch b) Centrale di test ISAAC-TISO: Qualità e resa energetica di moduli fotovoltaici (JB) c) Performance – ISAAC Activities (JB) d) Lifetime, mechanical and security testing for PV module certification (JB) e) MPVT: Multi-Purpose PV Module Tester (JB) f) Analysis of Degradation and annealing effects on a-Si PV Modules (JB) g) BiPV Tools (JB) www.bipv.ch www.isaac.supsi.ch.

[15] F. Baumgartner et al., B. Aeschbach und M. Pezzotti (bauf@zhaw.ch), ZHAW, Winterthur EKZ Zürich: a) Mobiles Solarlabor der EKZ (JB) b) F. Baumgartner und N. Allet, B. Aeschbach und M. Pezzotti, J. Sutterlüti (bauf@zhaw.ch), ZHAW, Winterthur EKZ, Zürich Oerlikon Solar, Trübbach: EKZ Solarstromdach (JB) home.zhaw.ch/~bauf.

[16] J. Jacot (jacques.jacot@epfl.ch), EPFL IMT LPM, Lausanne: Feasibility Study CTI INSPECT: Inline control systems for PV manufacturers lpm.epfl.ch.

[17] H. Häberlin et al. (heinrich.haeberlin@bfh.ch), Berner Fachhochschule, Technik und Informatik, Burgdorf: a) Photovoltaik Systemtechnik 2007-2010 (PVSYSTE 07-10) (JB) www.pvtest.ch b) PV-Servitor http://de.pv-servitor.eu

[18] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com), Solar Impulse, Lausanne: Solarimpulse www.solar-impulse.com.

[19] R. Domjan, (info@planetsolar.org), PlanetSolar, Yverdon-les-Bains: PlanetSolar www.planetsolar.org.

[20] P. Hüsser (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, Aarau: Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm - Task 1 (JB) www.iea-pvps.org, www.novaenergie.ch.

[21] S. Nowak et al. (info@repic.ch), NET, St. Ursen: a) REPIC: Interdepartementale Plattform zur Förderung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz in der internationalen Zusammenarbeit (JB) www.repic.ch b) PV-ERA-NET: Networking and Integration of National and Regional Programmes in the Field of Photovoltaic (PV) Solar Energy Research and Technological Development (RTD) in the European Research Area (ERA) (JB) www.pv-era.net / www.netenergy.ch.

[22] P. Renaud und L. Perret (pierre.renaud@planair.ch), Planair, La Sagne: IEA PVPS Task 10 – Swiss contribution (JB, SB Projekt 101562) www.planair.ch.

[23] M. Ryser, (michel.ryser@solarmax.com), Sputnik, Biel: IEA PVPS Task 11 : Hybride Photovoltaik Systemen in Mininetzen.

[24] R. Frischknecht et al. (frischknecht@esu-services.ch), ESU-services, Uster: IEA-PVPS Task 12: Swiss activities in 2009 – Ökobilanzen von PV Freiflächen- und Grossanlagen (JB) www.esu-services.ch.

[25] J. Remund (jan.remund@meteotest.ch), Meteotest, Bern: IEA SHC Task 36: Solar resource knowledge management (JB) www.meteotest.ch.

[26] P. Ineichen, (pierre.ineichen@unige.ch), UNIGE Groupe Energie, Genève: IEA SHC Task 36: Solar resource knowledge management www.unige.ch/energie.

[27] Th. Nordmann et al. (mail@tnc.ch), TNC Consulting, Erlenbach: a) Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm, Vorbereitung Arbeitsplan IEA PVPS Task 13 (JB) b) Messkampagne Photovoltaik Schallschutzanlage Münsingen (JB) www.tnc.ch.

[28] P. Toggweiler und Ch. Bucher, Th. Hostettler (peter.toggweiler@baslerhofmann.ch), Basler & Hofmann, Zürich, Swissolar, Zürich: a) Normierung für PV-Systeme (JB) www.swissolar.ch. b) Ch. Bucher et al. (christof.bucher@bhz.ch), Basler & Hofmann, Zürich: Praxistest Backup Wechselrichter (JB) www.bhz.ch.

[29] P. Goulpié (pascal.goulpie@flexcell.com), VHF Technologie, Yverdon-les-Bains: a) Application de modules PV

flexibles sur le site de production Flexcell (JB) b) Toiture expérimentale 2kW Flexcell www.flexcell.com.

[30] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.-com), Ingenieurbüro Hostettler, Bern: a) Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2008 (JB) b) Messkampagne Wittigkofen.

Referenzen

[32] Konzept des Energieforschungsprogramms Photovoltaik für die Jahre 2008 - 2011, Bundesamt für Energie, 2008, www.bfe.admin.ch.

[33] High efficiency micromorph tandem development in KAI-M PECVD reactors, J. Meier et al., Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, p. 2398.

[34] Roth & Rau, www.roth-rau.de.

[35] IEA PVPS Annual Report 2009, IEA PVPS, 2010, www.iea-pvps.org.

[36] National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2008, P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), Nova Energie, September 2009.

[37] Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2008, IEA PVPS Task T1-18:2009, www.iea-pvps.org.

[38] IEA PVPS Newsletter, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pius.huesser@novaenergie.ch).

[31] Th. Böhni et al. (info@euu.ch), Böhni Energie und Umwelt, Frauenfeld: Photovoltaik Anlage Nullenergieschulhaus Ekkharthof Kreuzlingen (JB) www.euu.ch.

[39] 10 years IEA PVPS Task 9, IEA PVPS Task T9-10:2009, www.iea-pvps.org.

[40] Promotional Drivers for Grid-Connected PV, Report IEA-PVPS T10-05-2009.

[41] Overcoming PV grid issues in the urban areas, Report IEA-PVPS T10-06-2009.

[42] Urban Photovoltaic Electricity Policies, Report IEA-PVPS T10-07-2009.

[43] Photovoltaics in the Urban Environment, Ed. Bruno Gaiddon, Henk Kaan, Donna Munro, earthscan, 2009, ISBN 978-1-84407-771-7.

[44] Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, Report IEA-PVPS T12-01-2009.

[45] The Photovoltaic European Research Area Network www.pv-era.net.

[46] Implementation Plan for the Strategic Research Agenda of the European Photovoltaic Technology Platform, 2009, www.eupvplatform.org.

[47] European Photovoltaic Technology Platform www.-eupvplatform.org.

[48] Solar Europe Industry Initiative (SEII).

[49] Die 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition Hamburg 21. – 25.09.2009 aus Schweizer Sicht, zu beziehen bei der Programmleitung Photovoltaik, c/o NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, www.photovoltaic.ch

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche
Solaire industriel à haute température

Pierre Renaud

pierre.renaud@planair.ch

Four solaire de 1* mégawatt *(MWSF) faisant partie des installations de recherche de PROMES-CNRS, Odeillo, France

Miroir secondaire parabolique et foyer de l'installation pour les tests sur le réacteur pilote prévus dans le cadre du projet de l'Institut Paul Scherrer (PSI) «Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactor Optimization for Scale-up» [1] (source: wikipedia.org).

Centres de gravité du programme et buts

Les axes principaux du programme sont la thermochimie solaire, la chaleur solaire dans les processus industriels et les centrales solaires thermiques à concentration (CSP). Ces applications ont en commun le fait qu'elles font intervenir des températures supérieures à 100 °C.

Le potentiel au niveau suisse et mondial dans les trois domaines d'utilisation industrielle de l'énergie solaire à moyenne et haute température est considérable. L'implication des instituts de recherche, des acteurs privés et de l'industrie, ainsi que la mise à disposition et la mobilisation de ressources financières (publiques et privées) doivent être intensifiées dans le but de permettre à la Suisse d'occuper une place de premier plan dans ces domaines appelés à jouer un rôle fondamental dans l'avenir énergétique.

Concernant la thermochimie solaire (dans le programme de recherche en question, seule la production de matériaux purs comme le zinc est traitée et non pas la production d'hydrogène), l'objectif global est de trouver le moyen de stocker et transporter facilement l'énergie solaire. La filière prioritaire de la recherche dans ce domaine en Suisse est la production de zinc par cycle thermochimique ZnO/Zn menée par le Paul Scherrer Institut (PSI). Dans ce cadre, les objectifs spécifiques pour 2009 étaient de concevoir le réacteur pilote de 100 kW et ses péripheriques en se basant sur les expériences réalisées avec le prototype de 10 kW, de modifier et adapter le modèle de transfert de chaleur existant à l'échelle du pilote de 100 kW et, en parallèle, de mener des tests complémentaires sur le réacteur de 10 kW.

L'utilisation de la chaleur solaire dans les processus industriels est une technique bien connue mais qui nécessite un effort de recherche supplémentaire au niveau notamment de la performance des systèmes et de ses composants afin d'atteindre une rentabilité qui puisse concurrencer les systèmes classiques alimentés par des énergies fossiles. L'objectif pour 2009 dans le cadre du programme de recherche était de passer à la phase de réalisation d'un projet pilote et démonstration en Suisse.

Les CSP sont des centrales possédant un fort potentiel de production d'électricité appelée à un développement considérable dans les années à venir. L'objectif global du programme au niveau de la recherche et des installations pilotes est, d'une part, d'améliorer les technologies existantes et, d'autre part, d'optimiser chaque composante des centrales. La Suisse, face à la forte concurrence étrangère, doit se concentrer sur un marché de niche. L'objectif spécifique pour 2009 lié au projet *Solair* d'Airlight Energy [4] était de poursuivre l'optimisation du concentrateur avec la construction du troisième prototype en explorant et consolidant la technologie pour l'absorbeur à air.

Travaux effectués et résultats acquis en 2009

Thermochimie solaire

Le projet *Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactore Optimisation for Scale-Up* du PSI est le seul directement soutenu en 2009 par le programme dans le domaine de la thermochimie solaire [1]. L'importance du projet réside dans le fait que le cycle ZnO/Zn est un des processus thermochimiques les plus prometteurs pour le stockage de l'énergie solaire.

Les travaux de recherche de la première phase d'optimisation du prototype de 10 kW se sont conclus avec succès en 2009 (fig. 1). La plupart des objectifs de la recherche ont été atteints. Deux types d'unités de trempage (quench units QU08 et QU09) du Zn–O_2 ont été conçus, construits et couplés au prototype d'absorbeur-réacteur solaire (appelé Zirrus) pour la dissociation thermique du ZnO (fig. 1). Les tests ont été effectués avec le «High-Flux Solar Simulator (HFSS)» du PSI avec différents types d'unités de trempage à de températures maximales entre 1757 et 2028 K. Globalement, le rendement maximal de production de Zn était de 54 % avec une pression partielle du Zn de 144 Pa. Ces résultats prouvent la faisabilité technique permettant d'éviter la recombinaison de Zn–O_2 en trempant les produits gazeux dans un processus solaire continu. Les rendements les plus élevés

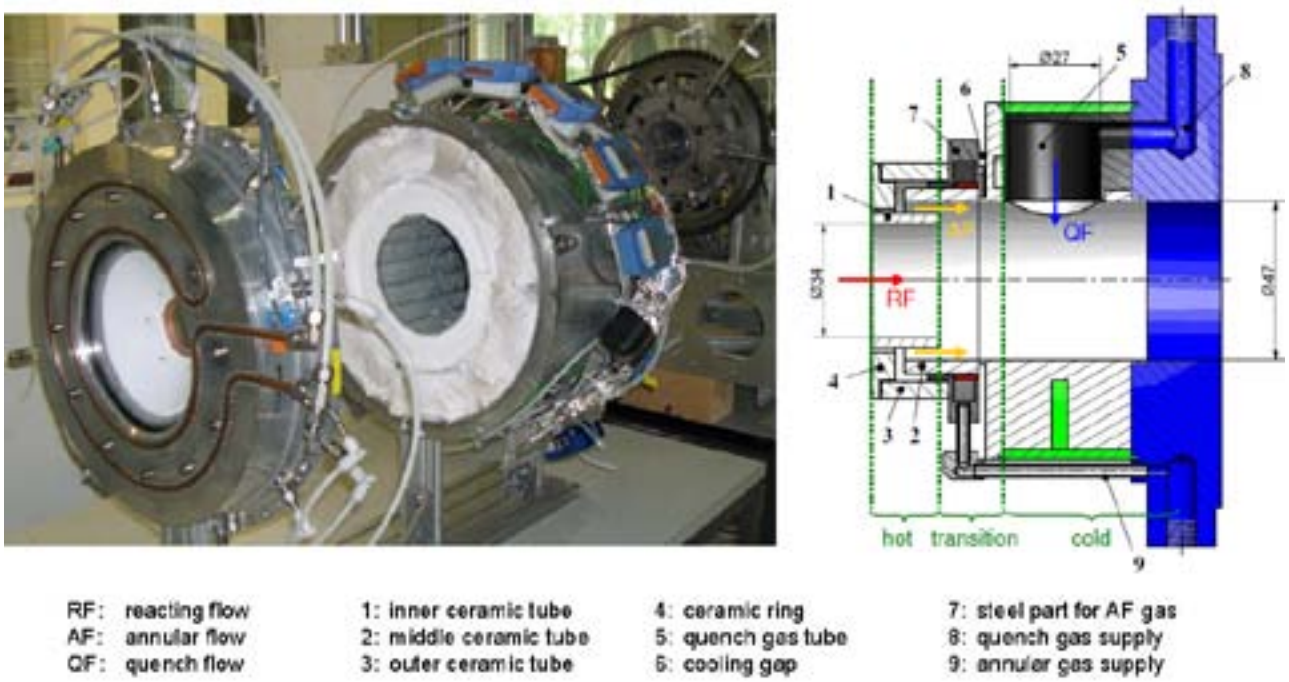


Figure 1: Prototype de réacteur chimique solaire (gauche). Unité de coupage (quench unit) QU09 implémentée à la sortie de la cavité de Zirrus (droite) [1].

ont été obtenus avec la petite unité de trempage. Cependant, l'encrassement et la défaillance mécanique liée aux dépôts solides sont encore des problèmes qui doivent être résolus.

En préparation de la deuxième phase (pilote) du projet, qui se déroulera en parallèle avec la recherche entre 2010 et 2011, une simulation du rayonnement par la méthode «Monte Carlo» a été faite. Dans les étapes suivantes de la simulation, la géométrie du réacteur de 100 kW sera implémentée. Cela permet ensuite de déterminer la distribution de l'irradiation solaire incidente sur le réacteur. En association avec le modèle de transfert thermique numérique, précédemment développé et validé avec le prototype de 10 kW, des informations précieuses pour la conception ont été obtenues au niveau de la répartition des températures et de l'étendue de la réaction (fig. 2).

Le rendement de conversion «solaire – produit chimique» du réacteur prototype peut être augmenté de 3 à 17 % en optimisant la géométrie de la section d'échappement, principalement en raison d'une diminution de pertes par conduction. L'agrandissement du réacteur à 100 kW, voire 1000 kW a le potentiel d'atteindre un rendement de conversion «solaire – produit chimique» excédant les 50 %. Le rendement est atteint principalement suite aux taux de réaction plus élevés, à des températures d'exploitation plus hautes et à une réduction des pertes par conduction.

Chaleur solaire dans les processus industriels

La première partie du projet Einstein goes Swiss : Industry Audits in Schweizer Industriesektoren und Entwicklung eines Plug-Ins für Jahressimulationen zum Solarwärmebeitrag von Industrieprozessen in dem Expertensystem Einstein de l'Institut Technique Solaire (SPF) de la Haute école technique de Rapperswil [2] se concentre sur la réalisation d'audits auprès de quelques industries suisses. Les audits visent à montrer le potentiel au niveau de l'optimisation des procédés et de la récupération des rejets de chaleur ainsi que de l'intégration des énergies renouvelables (dont l'énergie solaire à concentration) dans la production de chaleur pour les procédés.

L'expérience faite en 2009 montre qu'il est possible de motiver un certain nombre d'industries pour un audit. Quelques industries contactées ont refusé de participer pour diverses raisons. Des difficultés se sont notamment présentées dans la collecte des données et dans l'application de l'outil *Einstein*, ce qui entraine des difficultés pour effectuer des analyses approfondies comme prévu dans le cahier des charges.

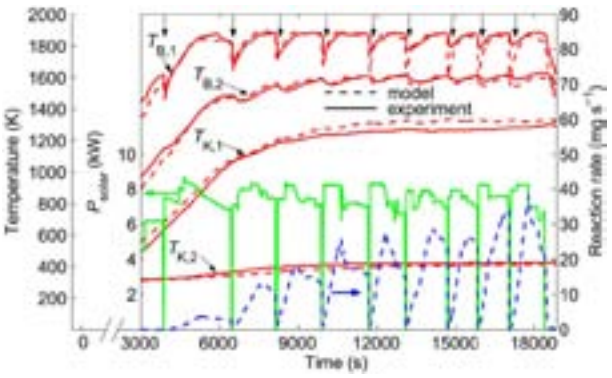


Figure 2: Températures mesurées expérimentalement (courbes pleines) et calculées numériquement (courbes en pointillés) à différents endroits à mi-chemin le long de la cavité du réacteur, input de puissance de rayonnement mesuré P_{solar}, et taux de dissociation du ZnO calculé numériquement en fonction du temps de déroulement des séries d'expérimentation avec neuf cycles d'alimentation. Les flèches en haut montrent les moments où l'alimentation par lots de ZnO a eu lieu [1].

Le calcul de la possible contribution du solaire thermique dans la production d'énergie pour les processus industriels est effectué par une méthode, actuellement en développement dans le cadre de la deuxième partie du projet, se basant sur des simulations annuelles avec l'intégration d'un Plug-In du logiciel *Polysun*.

Dans le cadre de la première phase du projet *Predesign Studie mobiler Teststand für solarthermische Prozesswärmeanlage* du SPF [3] consistant à évaluer et développer un système de mesure du rendement global des collecteurs à moyenne et haute température. Les travaux effectués et résultats suivants sont à signaler :

- Les deux paramètres «types de collecteurs en fonction de la catégorie de température (jusqu'à 120 °C, de 120 à 200 °C et de 200 à 400–500 °C» (fig. 3) et «facteur de concentration» nécessaires pour la caractérisation d'une installation de test ont été définis. Pour les systèmes à concentration, le tracker (appareil d'orientation) et sa précision sont un composant et un paramètre décisifs dans l'évaluation de son rendement. Le rendement peut donc en principe être représenté de façon analogue à la méthode de la norme EN12975 avec une courbe de rendement dépendante de la température et du rayonnement.
- Le SPF participe au groupe de travail TC312 WG1 du Comité Européen de Normalisation (CEN) pour la révision de la norme EN12975 avec notamment l'élargissement aux collecteurs à moyenne température et orientables et suit les travaux de différents projets dans le domaine au niveau européen et international.
- Concernant l'adaptation des programmes de simulation existants (p.ex. *Polysun*), la difficulté majeure est de représenter les conditions réelles de fonctionnement du fait de l'impact important des petites erreurs sur les résultats. Le manque ou même l'absence d'expériences de terrain avec des collecteurs à concentration rend la tâche difficile.
- Le SPF est en contact avec plusieurs fabricants de collecteurs pour la production de chaleur de processus et le nombre de demandes de vérification des performances est en augmentation.

La deuxième phase du projet (évaluation, y compris les coûts, des composants du système, senseurs et régulateurs pour l'implémentation de la procédure de test) est en cours de réalisation dans le domaine d'utilisation jusqu'à 200 °C, avec l'eau comme fluide caloporteur. La conception d'une installation de test (troisième phase du projet) aura lieu en 2010.

Le projet *CST receivers tubes qualification, phase 1 (investigation)* d'Energie Solaire SA a pour objectif principal de définir les paramètres et méthodes de mesure prouvant la performance et la résistance de tubes absorbeur avec couche sélective. Cette démarche pourrait par la suite contribuer à la rédaction d'une norme spécifique et donner l'opportunité aux partenaires du projet, par exemple le SPF, de développer et offrir ce service de certification de la qualité du produit. Des rencontres ont déjà eu lieu en 2009 avec les partenaires du projet (SPF, J.-C. Hadorn, EPFL).

Une requête d'aide financière pour un projet de développement d'un four solaire à concentrateur extra-plat (CEP) et à foyer ponctuel destiné à la fabrication de matériaux de construction et céramique est en cours d'évaluation. Le projet pourrait démarrer en 2010.

Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)

Le projet *SolAir-2 : Innovative solar collectors for efficient and cost effective solar thermal power generation - 2* d'Airlight Energy Holding SA [4] fait

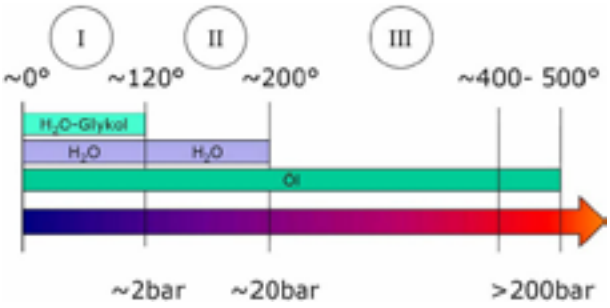


Figure 3: Aperçu des possibles fluides caloporteurs et leur niveau de température [3].

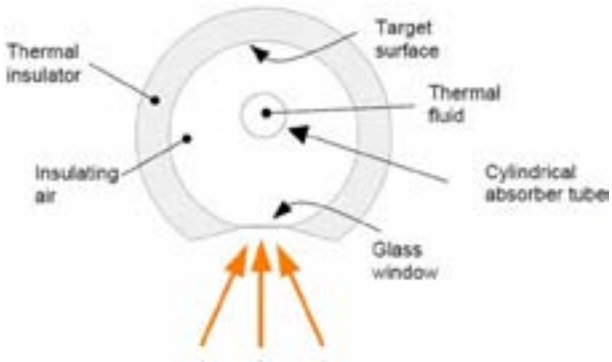


Figure 4: Section du concept d'absorbeur Biasca ; le fluide caloporteur circule dans le tube absorbeur situé à l'intérieur de la cavité. La cavité contient de l'air stagnant à pression atmosphérique, causant une isolation thermique [4].

suite au premier projet finalisé avec succès à fin 2008 [8]. L'objectif est d'explorer et consolider la technologie pour l'absorbeur à air. Ce dernier est un composant déterminant de l'installation et le rendement de la centrale solaire dépend de son efficacité. Les activités menées dans le dernier trimestre 2009 se concentrent sur la modélisation et les simulations détaillées de l'absorbeur à cavité (fig. 4).

Les tests de flux menés par Airlight ont permis de mesurer les pertes de charge dans l'absorbeur en fonction de la vitesse du flux d'air. Les activités de la Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI) se sont concentrées sur la simulation du flux en validant le logiciel et le modèle numérique en fonction des données expérimentales disponibles. Les résultats des simulations asymétriques ont montré une très bonne corrélation avec les résultats des tests effectués sur le site de Biasca. L'expérience des tests numériques 2D ont démontré d'une part qu'une meilleure définition a des effets positifs pour la future conception de modèles 3D plus complexes et, d'autre part, que le modèle relativement simple utilisé permet de réaliser une évaluation prudente de la perte de charge. Une deuxième série de simulations 3D a été effectuée sur des secteurs d'absorbeur de différentes longueurs (3 et 24 m) à combiner pour obtenir le comportement de l'absorbeur complet. Les résultats des simulations 3D avec la variation des paramètres vitesse de la masse d'air et température de l'air entrant ont montré une très bonne corrélation entre les deux modèles avec différentes longueurs des absorbeurs. L'élément plus court de 3 m peut néanmoins être considéré comme le plus représentatif du comportement de l'absorbeur complet et peut être utilisé comme outil de modélisation. Un nouveau modèle actuellement en phase de test permettra d'affiner les résultats, notamment concernant les pertes par rayonnement à travers l'ouverture de la cavité.

Les travaux effectués par l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ) ont permis la mise en place d'un modèle numérique de simulation 2D du transfert de chaleur pour l'absorbeur. Le modèle permet de déterminer l'efficacité thermique de l'absorbeur, les besoins en puissance de pompage et d'examiner les pertes thermiques. Afin de réduire la dissipation d'énergie et augmenter l'efficacité d'absorption, une optimisation de la géométrie de l'absorbeur est nécessaire. Ceci peut impliquer une augmentation de l'isolation de la cavité, l'application d'une couche anti réflective sur l'ouverture et l'incorporation d'un concentrateur secondaire.

Collaboration nationale

Thermochimie solaire

Le *Solar Technology Laboratory* (LST) du PSI travail en collaboration avec le *Professorship of Renewable Energy Carriers* (PRE) de l'ETH Zurich dans la recherche sur les processus solaires chimiques à haute température.

La coopération nationale est menée dans les cadres suivants :

- Hydropole – Swiss Hydrogen Association (représentant du PSI : Dr. Christian Wieckert)
- ALE AirLight (projet industriel) – Absorbeur solaire couple au concentrateur linéaire ALE pour un système de production d'électricité basé sur le cycle Rankine.
- Cycles combinés solaires (projet industriel) – Absorbeur solaire novateur pour le chauffage d'air comprimé aux conditions d'entrée d'une turbine à gaz en tant que partie d'un cycle combiné pour la production d'électricité.

Collaboration actuelle avec des entreprises suisses :

- ALE Airlight Energy SA Biasca.
- Alstom Power Service Baden-Dättwil; Alstom Power Systems Birr.

Collaboration actuelle et synergies avec d'autres laboratoires de recherche :

- ETH Zürich – Particle Technology Laboratory (Prof. S. Pratsinis).

En outre, des contacts sont établis avec deux grandes entreprises suisses pour explorer des domaines possibles de collaboration (noms des entreprises encore confidentiels).

Chaleur solaire dans les processus industriels

Les acteurs issus des milieux académiques et industriels impliqués dans les projets actuellement soutenus par le programme sont les suivants :

- Le SPF avec l'implication d'industries suisses (information encore confidentielle) dans la réalisation des audits du projet *Einstein goes Swiss*.
- Le SPF collabore avec la HSR pour l'évaluation du potentiel du marché et est en contact avec plusieurs fabricants de collecteurs pour la production de chaleur de processus dans le cadre du projet *Predesign Studie mobiler Teststand für solarthermische Prozesswärmeanlage*.
- Dans le cadre de son projet *CST receivers tubes qualification, phase 1 (investigation)*, Energie Solaire SA collabore avec le SPF, J.-C. Hadorn et l'EPFL

Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)

Dans le cadre du projet *SolAir-2*, la societé Airlight Energy Holding SA collabore avec l'*Institute of Computer Integrated Manufacturing for Sustainable Innovation* (ICIMSI) du *Dipartimento Tecnologie Innovative* (DTI) de la SUPSI et avec l'*Institute of Energy Technology* (IET) du *Department of Mechanical and Process Engeneering* l'ETHZ.

Des nouveaux contacts et un réseautage entre d'autres acteurs suisses du domaine solaire industriel à haute température ont eu lieu lors de la conférence nationale du programme qui s'est déroulée le 3 novembre 2009 à Neuchâtel. En plus des organismes déjà mentionnés ci-dessus, les institutions et les sociétés suivantes ont participé à l'événement : Amires Sàrl, BE Netz AG (voir la rubrique «Projets pilotes et de démonstration» du présent rapport), Center of Appropriate Technology and Social Ecology (CATSE) Oekozentrum Langenbruck, Centre suisse d'électronique et microtechnique (CSEM), Energy Center et Laboratiore de l'énergétique indistrielle (LENI) de l'EPFL, FC Consulting, Metatech International, NEP Europe GmbH, NET Ltd., Nolaris SA pour le projet d'îles solaires et Operations Supply Services.

Collaboration internationale

Thermochimie solaire

La coopération internationale est menée dans les cadres suivants :

- IEA's SolarPACES Implementing Agreement (Task 2 – Solar Chemistry Research);
- IEA's Hydrogen Implementing Agreement (Task 25 – High Temperature Hydrogen Production);
- Alliance stratégique entre le PSI et CIEMAT (Espagne) – Roadmap to Solar Hydrogen Production.;
- IPHE – International Partnership for the Hydrogen Economy (Projet: Solar driven high temperature thermochemical production of hydrogen: Participants: CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), U. Colorado (USA), ETH &

PSI (Switzerland), NU & TIT (Japan), WIS (Israel);

- Sollab – Alliance of European Laboratories on solar thermal concentrating systems. Collaboration of five leading European solar research laboratories, namely CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), ETH & PSI (Switzerland);
- EERA – European Energy Research Alliance (CSP). Participants: CEA (France), CESI (Italy), CIEMAT (Spain), CNRS (France), DLR (Germany), ECN (Netherlands), ENEA (Italy), INETI (Portugal), PSI (Switzerland), WIS (Israel);
- EU FP5 Solref – Solar steam-reforming of natural gas;
- EU FP7 Solhycarb – Co-production of hydrogen and carbon black from natural gas cracking.
- EU FP7 HyCycleS – Sulfur-based water-splitting thermochemical cycles for hydrogen generation.
- SynPet (projet industriel) – Solar steam-gasification of petroleum coke (petcoke).

Chaleur solaire dans les processus industriels

Dans le cadre du projet *Predesign Studie mobiler Teststand für solarthermische Prozesswärmeanlage* le SPF participe au groupe de travail TC312 WG1 du Comité Européen de Normalisation (CEN) pour la révision de la norme EN12975. En outre, le SPF suit les travaux menés dans le cadre des projets suivants : QUAIST, projet européen dans le cadre du programme Intelligent Energy Europe IEE ; SRCC (Société de certification états-unienne); AIE Task 43.

La coopération internationale dans le domaine de «la chaleur solaire dans l'industrie» a principalement lieu par l'intermédiaire de l'Implementing Agreement de l'AIE SolarPACES (principalement la Task IV : SHIP – Solar Heat for Industrial Processes, mais aussi Task III : Solar Technology and Advanced Applications, Task V : Solar Resource Knowledge Management et Task VI : Solar Energy & Water Processes and Applications).

Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)

La coopération international dans le domaine des CSP a lieu à travers de SolarPACES (principalement la Task I : Solar Thermal Electric Systems, mais aussi Task III : Solar Technology and Advanced Applications, Task V : Solar Resource Knowledge Management et Task VI : Solar Energy & Water Processes and Applications.

Projets pilotes et de démonstration

Thermochimie solaire

Le projet *Towards Industrial Solar Production of Zinc and Hydrogen – 100 kW Solar Pilot Reactor for ZnO Dissociation* du PSI est une partie intégrante du projet R&D *Solar Production of Zinc and Hydrogen - Reactor Optimisation for Scale-Up* et démarre officiellement le 1er janvier 2010. Dans ce projet, un réacteur pilote de 100 kW sera conçu et construit au PSI. Le réacteur solaire ainsi que son système annexe (transporteur de particules et traitement des gaz produits) seront ensuite testés dans le four solaire de 1 MW (MWSF) à Odeillo, France. Les performances du réacteur pilote seront déterminées expérimentalement par des études de paramètres. Avec les données des tests, un modèle non-stationnaire de transfert de chaleur sera validé. En outre, les résultats de l'essai pilote serviront de base pour l'élaboration d'un concept pour une installation chimique solaire industrielle pour la production de zinc et pour la réalisation d'une analyse économique.

Chaleur solaire dans les processus industriels

Le projet *Prozesswärme mit Vakuumröhrenkollektoren für die Beheizung des Paraffins für Fischer Kerzen AG* de l'entreprise Theo Fischer AG à Root dans le canton de Lucerne prévoit la construction d'une installation solaire thermique pour le chauffage à une température comprise entre 65 et 110 °C de la paraffine pour la production de bougies. Les 92,4 m^2 de collecteurs à tubes sous vide permettront de produire env. 59'000 kWh/an de chaleur équivalente à env. 35 % de la consommation d'électricité. La totalité du matériel a été commandé et

Figure 5: Troisième prototype du concentrateur Airlight mis en fonction à Biasca TI [4].

une partie est déjà sur le chantier. En outre, les travaux de préparation ont été réalisés mais le début du montage a du être repoussé en janvier 2010. La mise en service de l'installation est prévue pour juin 2010 et les mesures sur l'installation sont prévues jusqu'en avril 2012.

Le projet *Chauffage à 160 °C de 80'000 litres de bitume par panneaux solaires à ultra vide* de Colas Suisse SA a reçu le soutien financier de l'OFEN en fin 2009 et les travaux vont démarrer en 2010. Le projet est novateur d'un côté au niveau l'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage du bitume et, de l'autre, au niveau du type de capteur thermique à concentration utilisé. Une fois réalisée, l'installation permettra d'économises l'équivalent de 3,25 tonnes de fuel ou 3'500 m^3 de gaz naturel, soit environ 35'000 kWh d'énergie fossile par an.

Le lancement d'un projet P&D en lien avec la requête d'aide financière pour le projet R&D de *Développement d'un four solaire à concentrateur extra-plat (CEP) et à foyer ponctuel destiné à la fabrication de matériaux de construction et céramique* est envisagé pour 2010.

En outre, des contacts pour d'autres projets d'utilisation de la chaleur solaire dans les processus industriels sont en cours notamment avec des industries du secteur agroalimentaire.

Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)

Le lancement d'un projet P&D en lien avec le projet R&D *SolAir-2 : Innovative solar collectors for efficient and cost effective solar thermal power generation – 2* d'Airlight Energy Holding SA (voir rubrique «Travaux effectués et résultats acquis en 2009 – Centrales solaires thermiques à concentration (CSP)» du présent rapport) est prévu en 2010. L'objectif sera de développer un système de stockage de la chaleur de la centrale pour la production d'énergie lors de périodes d'absence du soleil.

Évaluation de l'année 2009 et perspectives 2010

Dans le domaine de la thermochimie solaire, la première phase du projet du PSI en cours (phase d'optimisation) a été finalisée avec succès en 2009. Deux types d'unité de trempage ont été conçus, construites et couplées au réacteur–absorbeur prototype de 10 kW. Des tests ont été menés dans le HFSS du PSI et le réacteur a fonctionné sans interruptions pendant plus de 4 h et sans incident pour un total de plus de 100 h aux températures maximales. Sur l'unité de trempage QU09, 20 séries de tests ont été effectuées. Comme prévu, le rendement net de Zn a augmenté avec la diminution de la pression partielle du Zn dans la section de trempage (max de 54 % avec une pression de 144 Pa). La petite ouverture de la sortie du réacteur été à l'origine des défaillances

mécaniques. Au niveau de la modélisation du réacteur pilote de 100 kW, une simulation une simulation du rayonnement par la méthode «Monte Carlo» sur le site prévu d'Odeillo a été effectuée pour estimer la distribution du flux dans le réacteur et a été validée par des résultats expérimentaux. La géométrie du réacteur de 100 kW sera intégrée dans les prochaines étapes de la simulation. En janvier 2010 démarrera la deuxième phase du projet (phase pilote) avec la conception et la construction du réacteur pilote de 100 kW. Le réacteur solaire et ses périphériques seront testés dans le four solaire de 1 MW d'Odeillo et les données expérimentales serviront pour valider les modèles numériques du réacteur. Les résultats du test pilote conduiront à la conception et à l'analyse économique d'une installation solaire industrielle d'ici fin 2011.

Dans le domaine de la chaleur solaire dans les processus industriels, l'année 2009 a vu le démarrage de plusieurs projets R&D et P&D avec l'implication d'acteurs du monde académique et industriel. Les travaux de préparation pour la construction de la première installation en Suisse a démarré. La mise en service a du être retardée en juin 2010. Pour 2010, d'intensifier les travaux de recherche notamment au niveau de la mise à disposition des industries d'un outil pour l'évaluation technique et économique des projets. Un effort sera également consenti pour caractériser et l'améliorer les performances des composants des installations. Au niveau des projets P&D, l'objectif est de mettre en service les deux premières installations soutenues par l'OFEN et d'impliquer plus d'industries dans une telle démarche.

Dans le domaine des CSP, le projet de Airlight s'est développé conformement aux prévision en 2009. Il contribue à l'amélioration des la technologie parabolique linéaire existante avec la réalisation d'un concept de concentrateur novateur avec structure en béton. Le troisième prototype (fig. 5), dont la construction s'est terminée à Biasca en 2009, représente un pas important vers la version finale de l'installation. L'accent dans la phase actuelle du projet est mis sur l'absorbeur à air, composant clé du système qui conditionne de manière importante l'efficacité globale de la centrale. Les perspectives pour 2010 sont de réaliser et tester le système de stockage ainsi que de lancer les démarches pour la construction d'une première installation commerciale.

La conférence suisse sur les CSP, qui s'est déroulée en 2008 après un premier workshop pour spécialistes de 2007, a été transformée en 2009 en conférence sur le programme de recherche intégrant également les domaines de la thermochimie solaire et de la chaleur solaire dans les processus industriels. Vu le succès rencontré parmi les acteurs concernés et à la suite de plusieurs demande, l'expérience sera répétée en 2010 avec une implication plus importante de l'industrie.

Liste des projets R+D

(RA) Rapport annuel 2009 existant

(RF) Rapport final existant

Certains rapports annuels ainsi que d'autres informations peuvent aussi être téléchargés à partir du site www.recherche-energetique.ch.

[1] A. Meier (anton.meier@psi.ch, http://solar.web.psi.ch), D. Gstöhl, PSI – Labor für Solartechnik: a) *Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactor Optimization for Scale-Up* (Projet OFEN No. 102420, Status Report 2008-2009) b) *Solar Production of Zinc and Hydrogen – Reactor Optimization for Scale-Up* (Projet OFEN No. 102420, RA 2009)

[2] H. Marty, E. Frank (elimar.frank@solarenergy.ch), B. Schmitt, Institut für Solartechnik SPF: *Einstein goes Swiss: Industrie Audits in Schweizer Industriesektoren und Entwicklung eines Plug-Ins für Jaherssimulationen zum Solarwärmebeitrag von Industrieprozessen in dem Expertensystem Einstein* (Projet OFEN No. 102968, RA 2009)

[3] A. Bohren (andreas.bohren@solarenergy.ch), M. Rommel, Institut für Solartechnik SPF: *Predesign Studie mobiler Teststand für solarthermische Prozesswärmeanlagen* (Projet OFEN No. 103226, RA 2009)

[4] M. Barbato (maurizio.barbato@supsi.ch), A. Steinfeld, A. Pedretti (andrea.pedretti@airlightenergy.com) et al., SUPSI – DTI – ICIMSI, ETHZ – Institute of Energy Technology, Airlight Energy Holding SA: *SolAir-2 : Innovative solar collectors for efficient and cost effective solar thermal power generation - 2* (Projet OFEN No. 102327, RA 2009)

Références

[5] L.O. Schunk, P. Haeberling, S. Wepf, D. Wuillemin, A. Meier, A. Steinfeld: *A Receiver-Reactor for the Solar Thermal Dissociation of Zinc Oxide*, J. Solar Energy Eng. 130 (2), 021009, 2008

[6] H. Wallimann: *Development and Experimental Investigation of a Quench Unit for a Solar Thermal ZnO-Dissociation Reactor*, Master Thesis, PSI Villigen and ETH Zürich, May 2009

[7] L. O. Schunk: *Solar thermal dissociation of zinc oxide – reaction kinetics, reactor design, experimentation an modeling*, Ph.D. Thesis No. 18041, ETH Zürich, October 2008

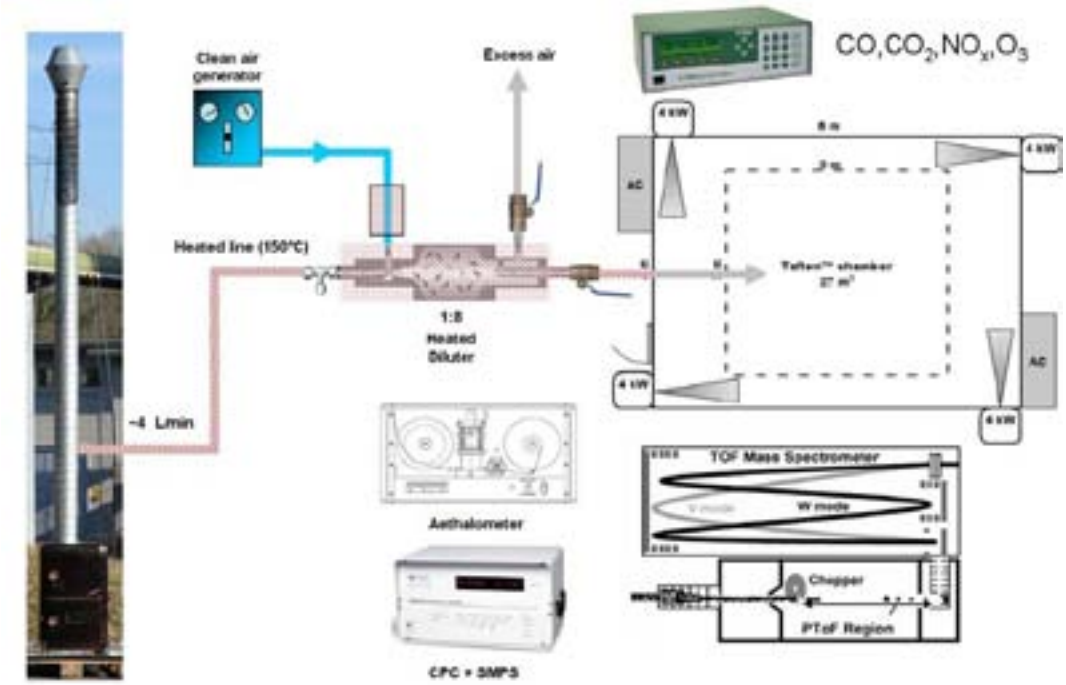
[8] M. C. Barbato, Ph. Haueter, R. Bader, A. Steinfeld, A. Pedretti (andrea.pedretti@airlightenergy.com), ALE Airlight Energy SA, Biasca: *SolAir – Innovative solar collectors for efficient and cost-effective solar thermal power generation* (Projet OFEN No. 102327, RF)

Rapport de synthèse 2009 de la cheffe de programme OFEN
Synthesebericht 2009 der BFE-Programmleiterin

Forschungsprogramm
Biomasse und Holzenergie

Sandra Hermle

sandra.hermle@bfe.admin.ch



Untersuchungen primärer Emissionen und sekundärer Feinstaubbildung von Holzfeuerungen in der Smogkammer des Paul Scherrer Instituts (A. Prévôt, PSI).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Jahr 2009 lag der Schwerpunkt auf der lancierten Ausschreibung zur übrigen Biomasse (ohne Holz), welche **3 Themenkomplexe** beinhaltete. Diese Ausschreibung erfolgte in Anlehnung an das von der Eidgenössischen Energieforschungskommission CORE formulierte quantitative Ziel, dass im Hinblick auf die Biomasse (inkl. Holzenergie) bis 2050 mindestens eine Verdreifachung der Nutzung der Biomasse (inkl. Holzenergie) als Energieträger erfolgen soll (heutige Nutzung: 37 PJ). Das Forschungsprogramm *Biomasse* orientiert sich an diesem Ziel und fördert deshalb Projekte, welche sich mit der **Systemoptimierung und -integration** und der **Qualitätssicherung** auseinandersetzen und gleichzeitig ökologische und ökonomische Kriterien mitberücksichtigen. Des Weiteren werden auch **neue Verfahren und Technologien** gefördert.

Schwerpunkte der Ausschreibung

Emissionen von Biogasanlagen

Das erste Thema legt das Augenmerk auf **Emissionen von Biogasanlagen**. Die Erzeugung von Biogas und der anschliessenden Strom- und Wärmeproduktion mittels BHKW oder die Aufbereitung des Gases zur Einspeisung ins Erdgasnetz ist mit möglichen Leckagen verbunden. Diese gilt es entlang der gesamten Prozesskette zu ermitteln, zu bilanzieren und in Relation zu energie- und umweltrelevanten Parametern zu stellen. Der ökonomische Aspekt ist dabei ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Der messtechnischen Erfassung der Gasverluste soll ebenso Rechung getragen werden, wie der Bilanzierung im Hinblick auf den Gesamtvolumenstrom. Für diesen Forschungsschwerpunkt ist es auch wichtig, dass verschiedene Prozessketten angeschaut werden (verschiedene Gasspeicher, Stromproduktion, Strom- und Wärmeproduktion, verschiedene Verfahren der Gasaufbereitung).

Der gesamte Kreislauf der Biogasherstellung soll in der emissionsseitigen Betrachtung geschlossen werden: von der Produktion des Gases bis zur Ausbringung des Gärrestes mit «sekundären» Gasemissionen. Auch die Komponente der Geruchsbelastung soll messtechnisch erfasst werden, um die vorgeschlagenen oder verfügten emissionsmindernden Massnahmen in Relation zu aktuellen Messwerten setzen zu können.

Optimierung des Gesamtsystems Biogasanlage

Die Grundlage für die **Optimierung des Gesamtsystems Biogasanlage** sind verlässliche Daten im Biogasprozess. Mit Hilfe dieser kann dann Optimierungspotenzial von landwirtschaftlichen Biogasanlagen über die ganze Prozesskette hinweg aufgezeigt werden, um diese dann ökologisch und ökonomisch effizienter zu betreiben. Neben der energetischen und ökonomischen Bewertung des Optimierungspotenzials soll auch eine ökologische Bewertung miteinbezogen werden. Des Weiteren sollen auch Hemmnisse bei der Optimierung aufgezeigt werden.

Ökobilanzen

Im dritten Schwerpunkt **Ökobilanzen** gilt es bestehende Daten, welche für Ökobilanzen im Biomassebereich herangezogen werden, zu überarbeiten und zu ergänzen. Diese gilt es dann auf bestimmte aktuelle Biomassethemen anzuwenden, um Entscheidungsgrundlagen und Perspektiven für Technologien und Prozesse aufzuzeigen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

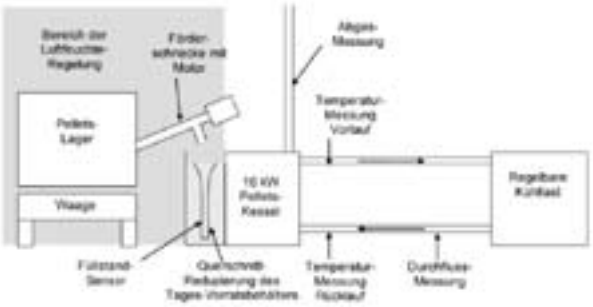
Holzige Biomasse

Im Forschungsbereich Holzenergie standen im Jahr 2009 die Emissionen von Holzfeuerungen im Vordergrund ([1, 2, 3, 4, 6]). Weitere Ziele im Jahr 2009 waren die Optimierung von kombinierten Heizsystemen [5], die Optimierung des Nutzungsgrades von Holzfeuerungen [7] und die Entwicklung und Optimierung neuer Technologien ([8, 9]).

Der Minderung von Feinstaubemissionen durch primäre (feuerungstechnische) Massnahmen ist grosses Gewicht gegeben, da sie Sekundärmassnahmen (Feinstaubabscheider), sofern möglich, vorzuziehen ist. Die Startphase erweist sich dabei

als besonders emittierend, was im Projekt *Prüfverfahren für die Startphase auf der Basis von EN 303-5* [1] für Stückholzkessel genauer untersucht wird. Es soll dabei abgeklärt werden, ob es sinnvoll ist, die auf das Anzünden folgende Startphase bei Stückholzkesseln in die Prüfung nach EN 303-5 einzubeziehen, um damit Kessel mit hohen Emissionen in der Startphase von Gütesiegeln auszuschliessen und Kessel mit gutem Startverhalten zu belohnen. In Bezug auf Emissionen soll aufgezeigt werden, welche Schadstoffkomponenten gemessen werden sollen, um eine Bewertung der Startphase zu ermöglichen. Es wurde ein Konzept erarbeitet, wie die Prüfung der Startphase in die Prüfung nach EN 303-5 integriert werden kann. Es zeigte sich, dass die Emissionen von CO und Gesamtkohlenwasserstoffen während der Startphase um Faktoren grösser sind im Vergleich zur stationären Abbrandphase. Die gravimetrischen Feststoffemissionen dagegen sind während der Startphase nicht wesentlich grösser. Somit könnte die Messung der CO-Emissionen zur Beurteilung der Startphase unter Umständen ausreichen. Weitere Untersuchungen zur Klärung der Frage, ob reproduzierbare Versuche zur Startphase möglich sind, sind für 2010 vorgesehen.

Neben der Erfassung der Emissionen geht es auch um konstruktionstechnische Verbesserungen, welche sich emissionsmindern auswirken sollen. Das Projekt *Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel* [2] beschäftigt sich mit der Konstruktion eines Prototyps, welche die Reduktion von CO und Feinstaub in der Startphase zum Ziel hat. Dies soll mit einer neuen Geometrie des Rostes, der Anpassung von Primär- und Sekundärluftzufuhr, sowie einer einfachen Bedienungsprozedur erreicht werden. Geprüft wird auch die automatische Zündung des Brennstoffes. Im Laufe der Testmessungen an einem modifizierten Kessel hat sich gezeigt, dass die Form des Rostes eine zentrale Bedeutung für eine optimale Startphase hat. Die Rostform muss eine gute Luftverteilung sowie das sichere Ausbreiten des Feuers vom Zündzeitpunkt auf die ganze Rostfläche gewährleisten. Um den Einfluss diverser Parameter (Regel-Parameter, Anfeuerprozedur, Stückigkeit des Holzes) auf die Güte der Startphase zu ermitteln, wurden 2009 weitere Optimierungstests durchgeführt. Im Anschluss erfolgten Feldmessungen, welche die Einhaltung des Zielwertes von 4000 mg/nm^3 CO (erste 30 Minuten) demonstrierten. Für 2010 stehen die Optimierung der Steuerung und weitere Messungen (Staub) an. Gleichzeitig soll eine automatische Anfeuerungsmethode getestet werden.

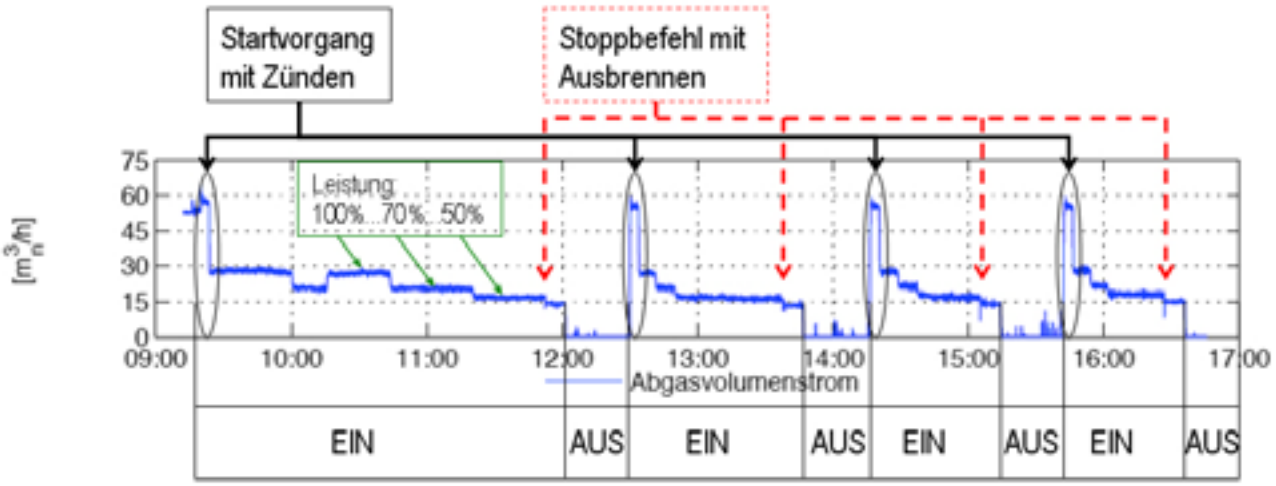


Figur 1: Schematische Darstellung der Messanordnung für die Bestimmung von Nutzungsgraden bei stationären und instationären Betriebszuständen der Pelletkessels (SPF, Rapperswil).

Im Projekt *Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70 kW* [3] wird der Einfluss der Betriebsweise von Holzfeuerungen auf die Feinstaubemissionen untersucht. Neben der Gesamtmasse an Feinstaub werden dabei auch die kondensierbaren sowie die flüchtigen organischen Verbindungen erfasst, da die organischen Verbindungen besonders gesundheitsrelevant sind. Die Untersuchungen für handbeschickte Holzfeuerungen konnten bereits abgeschlossen werden. Hier zeigte sich ebenfalls, dass während der Startphase wesentlich höhere Emissionen auftreten, als während des stationären Betriebs. Im Ausbrand können ebenfalls erhöhte Emissionen auftreten, in Bezug auf die Feinstaubemissionen ist der Ausbrand in der Regel jedoch weniger kritisch als die Startphase. Die Feinstaubemissionen von handbeschickten Holzfeuerungen weisen eine grosse Bandbreite auf, welche insbesondere in Abhängigkeit der Betriebsart (idealer Betrieb vs. schlechter Betrieb, jeweils abhängig von Holzmenge, Luftzufuhr, Holzqualität) zu sehen sind. Der derzeit vom BAFU (Bundesamt für Umwelt) verwendete Emissionsfaktor für Staub von Holzöfen ist in der Grössenordnung plausibel. Die Emissionsfaktoren für CO und HC (Kohlenwasserstoffe) sind ebenfalls im Bereich der in der vorliegenden Untersuchung gefundenen Werte. Für den BAFU-Emissionsfaktor bezüglich Staub ist zu beachten, dass dieser Wert nur die Feststoffe umfasst und für die PM_{10}-Belastung in der Umgebungsluft zusätzlich die Kondensate und sekundäre Aerosole (siehe [4]) zu berücksichtigen sind. In der vorliegenden Studie werden deshalb auch Emissionsfaktoren für Kondensate ausgewiesen. Aufgrund der bisherigen Resultate ist davon aus-

zugehen, dass bei Holzöfen der Beitrag zu PM_{10} aus Kondensat denjenigen aus den Feststoffen übersteigt. Die Untersuchungen an Pelletkessel sind zurzeit in Auswertung.

grossen Puffervolumens; (3) Effiziente Verbrennungsregelung, die den Betrieb bei niedrigen Lambdawerten ermöglicht; (4) Einsatz effizienter Pumpen; (5) Konsequente Isolation von Leitungen.



Figur 2: Charakteristisches Betriebsverhalten von Pelletkessel A, dargestellt am Zeitverlauf des Abgasvolumenstroms: Kaltstart (ab 09:10 Uhr) und modulierendes Takten (ab 12:30 Uhr) (HSLU, Horw).

Emissionsfaktoren wurden u.a. auch im Projekt *PelletSolar-2* [5] bestimmt. Ziel des Projekts ist die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit Solaranlagen kombinieren (Fig. 1). Das Zusammenspiel der Einzelkomponenten aufgrund der hydraulischen und regelungstechnischen Einbindung soll in einem annähernd realen Systembetrieb getestet werden. Gleichzeitig erfolgt auch eine quantitative Bewertung von solarkombinierten Pelletsystemen aus emissionstechnischer Sicht. Bei allen drei gestesteten Systemen wurde festgestellt, dass der Pelletkessel vorwiegend im taktenden Betrieb arbeitet und die Möglichkeit der Modulation kaum bis gar nicht ausnutzt. Es zeigte sich, dass trotz des ungünstigen Betriebsverhaltens jeweils ein relativ guter Jahresnutzungsgrad der Pelletkessel von mehr als 80 % erreicht wurde. Der Systemnutzungsgrad ist dagegen in allen Fällen niedriger als 70 %. Neben der Effizienz der einzelnen Komponenten wird der gesamte Energieverbrauch des Systems inklusive Stromverbrauch stark durch das Zusammenspiel der Komponenten beeinflusst. Aus diesem Grund ist eine Systemgesamtlösung, die im besten Fall durch einen einzigen Hersteller geplant und umgesetzt wird, zu empfehlen. Eine Verbesserung der Effizienz von Pellet-Solar-kombinierten Systemen kann u.a. durch folgende Massnahmen erreicht werden: (1) Optimierung der Regelstrategie des Kessels und des Speichermanagements; (2) Wahl eines genügend

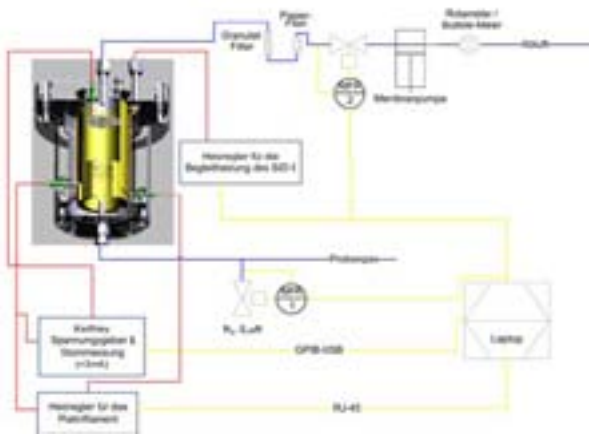
Die Resultate des Zusatzmoduls *Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen* [4] zeigen bezüglich der Emissionen, dass während der Startphase kurzfristig deutlich erhöhte Emissionen an unvollständig oxidierten Gasen sowie Feststoffen auftreten (Fig. 2). Bei stationärem Betrieb sind die Emissionen gering, jedoch treten beim Ausschalten wieder kurzfristig erhöhte Emissionen auf. Da die Emissionen bei jedem Start- und Stoppvorgang einige Minuten lang bedeutend höher sind als bei stationärem Betrieb, ist taktender Betrieb grundsätzlich unerwünscht. Die Untersuchung zeigt, dass die Emissionen im Taktbetrieb für die untersuchten Kessel nur dann vertretbar sind, wenn die Laufzeit inklusive Starten und Ausschalten mindestens 80 bis 90 Minuten beträgt. Die Startphase führte erwartungsgemäss zu einem Peak an Schadstoffemissionen, welcher besonders ausgeprägt (Anstieg um mehr als den Faktor 10 gegenüber Emissionsfaktoren des BAFU) für CO und VOC (Volatile Organic Compounds) war. Die Emissionen an NO_x liegen bei allen untersuchten Betriebszuständen unter den vom BAFU verwendeten Emissionsfaktoren. Sinkende Lastwechsel zeigten keine signifikant höheren Emissionen und steigende Lastwechsel nur leicht erhöhte Feststoffemissionen. Diese Emissionsfaktoren werden in einem nächsten Schritt dazu benützt, um die Jahresemissionsfrachten zu berechnen.

Wie bereits erwähnt sind neben den Feststoffen und den Kondensaten auch die sekundären Aerosole, welche in der Atmosphäre durch chemische Reaktionen aus gasförmigen Vorläufersubstanzen gebildet werden, für Emissionsfaktoren zu berücksichtigen. Mit dem Projekt *Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungsabgase* [6] soll die Holzfeuerungsbranche im Bemühen, partikelarme Verbrennungstechnologien zu entwickeln, unterstützt werden. Dazu ist die Anpassung der On-line-Aerosolanalytik auf die Anforderungen der Emissionsmessung im Abgasstrom erforderlich. Es können so die Emissionen mit der in instationären Verbrennungsphasen notwendigen Zeitauflösung gemessen werden, was erlaubt, gezielt technische Verbesserungen an Feuerungen vorzunehmen. Die Aerosolanalytik kann wichtige Daten als Basis für die Abschätzung der Emissionsfaktoren im realen Betrieb von Holzfeuerungen liefern. Im Fokus waren 2009 die Auswertungen von Emissionsmessungen von Pellet- und Stückholzheizungen. Dabei konnte für Pelletfeuerungen gezeigt werden, dass bei schlechter Verbrennung massiv mehr schwarzer Russ emittiert wird, während die organischen Aerosolemissionen reduziert sind. Stückholzkessel hingegen zeigten während eines Verbrennungszyklus eine signifikante Variabilität im Verhältnis organischer Masse zu schwarzem Russ. Anhand von Smogkammerexperimenten konnte festgestellt werden, dass die Pelletemissionen in der stabilen Brennphase keine weiteren sekundären organischen Komponenten produzierten. Dies bedeutet, dass die Pelletfeuerung bezüglich dieser sekundären Komponenten viel weniger zur Umweltbelastung beiträgt als Stückholzfeuerungen, bei welcher auch die sekundär produzierte Feinstaubmasse signifikant ist. Des Weiteren wurden bei Stückholzfeuerungen hohe Anteile an schwarzem Russ gefunden. Es wird vermutet, dass der Anteil an organischem Feinstaub (auch von sekundärem) stark von der Temperatur abhängt.

Neben der Emissionsthematik, welche 2009 verstärkt angegangen wurde, beschäftigte man sich auch mit der Bestimmung von Jahresnutzungsgraden, welche letztendlich zur Optimierung von Holzfeuerungen beitragen [7]. Des Weiteren wurde auch die Entwicklung von neuen Technologien und Ansätzen gefördert [8, 9].

Das Projekt *SimPel* [7] hat zum Ziel, eine Methode zur Bestimmung von Jahresnutzungsgraden (JNG) von Biomasse-Kleinfeuerungen zu entwickeln. JNG tragen dem dynamischen Betrieb des Pelletkessels besser Rechnung als Wirkungsgrade, welche im stationären Betrieb des Kessels gemessen werden. Im Laufe des Projektes werden zwei verschiedene Ansätze zur Bestimmung von JNG entwickelt. Der erste Ansatz (basierend auf einer Hochrechnung, die auf plausiblen Annahmen zu Verbrauchsprofilen aufbaut) wird vom ausländischen Forschungspartner bereitgestellt, während dem der andere detailliertere und simulationsbasierte Ansatz in der Schweiz entwickelt wird. Letztlich soll eine Synthese aus beiden Verfahren zu einem einzelnen Ansatz führen, welcher ohne Mehraufwand Eingang in die gängigen Prüfnormen von Biomasse-Kleinfeuerungen finden soll.

Ein Link zwischen der Verbrennung und der Vergasung von Holz bildet das Projekt *Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online-Messung von Alkalien in Prozessgasen* [8]. Bei der Verbrennung oder bei der Vergasung von Biomasse geht ein Teil der darin enthaltenen Alkalien in die Gasphase über. Dabei können durch die Alkalien im Produktgas Korrosions- und Verkrustungsprozesse an Anlagenteilen entstehen. Ziel ist die Entwicklung und Anwendung eines feldtauglichen Alkalidetektors zur kontinuierlichen Messung von Alkalien (Natrium, Kalium) in Prozessgasen (Fig. 3). Im Rahmen dieses Projektes wurde eine neue Version des bereits bestehenden Alkalidetektors geplant und konstruiert. Es hat sich gezeigt, dass die Ansprechzeit im Bereich von wenigen Sekunden liegt und der Detektor eine hohe Signalstabilität besitzt. Es konnte eine lineare Korrelation von Alkalikonzentration zu Signalstärke über knapp drei Grössenordnungen nachgewiesen werden.



Figur 3: Mess- und Regelungsaufbau des SID II (blau = Gasflüsse; gelb = Datenleitungen; rot = Regelungsströme) (PSI, Villigen).

Ein weiteres Projekt beschäftigt sich mit der Grundlagenerarbeitung für *Design und Optimierung einer Hochtemperatur-Entschwefelung für biogene Produktgase* [9]. Mittels Feldmessungen wurden zunächst die Anforderungen an die Reinigungsstufen überprüft, d.h. Gehalt und Art der Schwefelspezies wurden untersucht. Hierzu war der Aufbau einer speziellen Schwefeldiagnostik (Gaschromatograph mit Schwefelchemoluminiszenz-Detektor, SCD) notwendig. Des Weiteren wurde ein stationärer Wirbelschichtvergaser für die Bestimmung dieser Spezies im Rohgas genutzt. Es zeigte sich, dass Thiophen den Hauptanteil des organisch gebundenen Schwefels im Produktgas bildet. Weitere rund 10 % bestehen aus Benzothiophenen. Rund ein Viertel der schwefelorganischen Verbindungen kann den Mercaptanen zugerechnet werden. An der 1-MW-SNG-Pilotanlage in Güssing wurde mit einem zweiten SCD-Messsystem die Gesamtschwefelkonzentration reproduzierbar gemessen. Es zeigt sich, dass die Niedertemperatur-Gasreinigungsstufen in der Lage sind, das Produktgas von hohen Konzentrationen bis hinunter in den 1-ppm-Bereich zu reinigen.

Für die Hochtemperatur-Entschwefelung mussten geeignete Katalysatoren und Betriebsweisen identifiziert werden. Für den getesteten HDS-Katalysator wurde festgestellt, dass es für die getesteten Bedingungen keine messbare katalytische Aktivität für Methanisierung, der Wasssergaskonvertierung und der Schwefelkonvertierung gibt. Bei den CPO-Katalysatoren und den hochtemperaturfesten Nickelkatalysatoren stellte sich heraus, dass aromatische Verbindungen mit Heteroatomen erheblich leichter unter Dampfreformierungsbedingungen abgebaut werden können, als z.B. Toluol. Hierbei war jedoch die organische Schwefelverbindung stabiler als die sauerstoffhaltige.

Übrige Biomasse

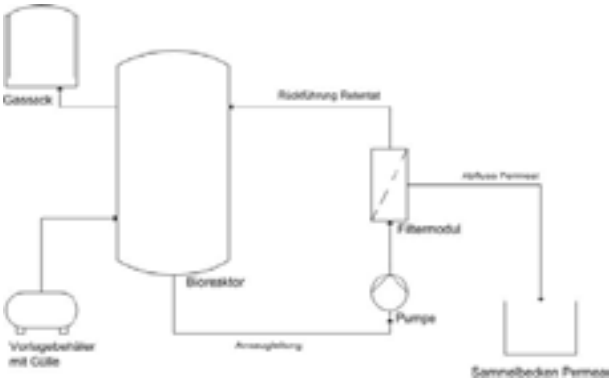
Wie im Abschnitt Programmschwerpunkte erwähnt, wurde im Jahre 2009 eine Ausschreibung lanciert, welche die Vertiefung der Themen **Emissionen von Biogasanlagen**, **Optimierung des Gesamtsystems Biogasanlage** und **Ökobilanzen** zum Ziel hat.

Bezüglich der **Emissionen von Biogasanlagen** sind verschiedene Projekte gestartet, welche sich sowohl mit Geruchsemissionen im Allgemeinen und Methanemissionen im Speziellen befassen. Methan hat einen höheren Treibhauseffekt als Kohlendioxid, weshalb es für Biogasanlagen unabdingbar ist, die CH_4-Emissionen durch technische und organisatorische Massnahmen auf ein Minimum zu reduzieren. Das Projekt *Methanverluste bei Biogasanlagen* [10] hat die Identifizierung von Leckagequellen, d.h. sowohl Flächenquellen (Membranen, Gärrestbehälter etc.), als auch Punktquellen (Biogasaufbereitung, Abgas BHKW etc.) zum Ziel. Daraus sollen anschliessend die CH_4-Emissionen für verschiedene Typen von Biogasanlagen quantifiziert und die CH_4-Emissionen in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren modelliert werden, um Strategien und Massnahmen zur Emissionsreduktion zu entwickeln.

Vertiefend mit Methanemissionen von Folienabdeckungen beschäftigt sich das Projekt *CH_4-Emissionen bei EPDM Gasspeichern und deren wirtschaftliche und ökologische Folgen* [11]. Auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird Biogas häufig in einem Gasspeicher mit einer EPDM-Folie (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) zwischengelagert. Das Ziel des Projektes ist die Untersuchung, ob nach einer gewissen Einsatzdauer und unter bestimmten Bedingungen (z. B. erhöhte Säurewerte im Fermenter, Substratzusammensetzung) diese Folie an Qualität einbüsst. Es soll evaluiert werden, ob und in welchem Masse Methanemissionen auftreten, und wie sich diese wirtschaftlich und ökologisch auswirken.

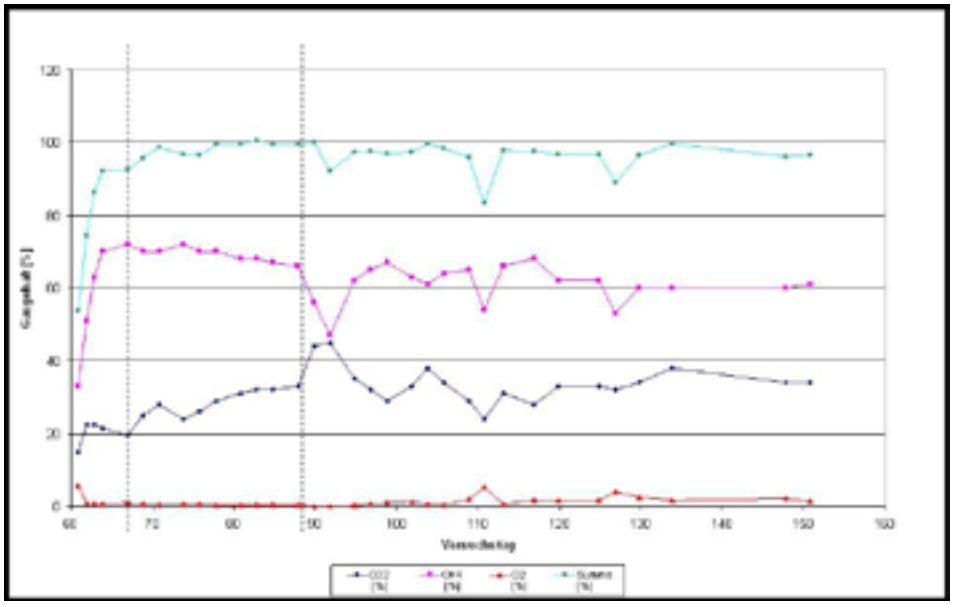
Mit Geruchsemissionen allgemein beschäftigen sich zwei weitere Projekte. Das Projekt *Messung von Geruchsemissionen und Entwicklung eines Geruchsemissionsmodells für Biogasanlagen* [12] fokussiert auf die messtechnische Erfassung von Geruchsemissionen, um eine breite Datengrundlage zu schaffen. Aufbauend auf dieser soll ein Geruchsemissionsmodell für Biogasanlagen erstellt werden, welches als Softwareprogramm verarbeitet werden soll. Das Programm soll den Vollzug in der Genehmigungsphase einer Biogasanlage vereinfachen, indem Geruchsemissionen und die Wirkung von geruchsmindernden Massnahmen schon in der Planungsphase abgeschätzt werden können. Im Projekt *Geruchsquellen bei Biogasanlagen* [13] gilt es zu klären, inwieweit Bau und Betrieb der Biogasanlage einen Einfluss auf Geruchsemissionen haben. Ziel ist, die relevanten Geruchsquellen landwirtschaftlicher Biogasanlagen sowie ihre Einflussgrössen (meteorologische Rahmenbedingungen, Verfahrenstechnik, Substrate etc.) zu identifizieren und zu quantifizieren. Gleichzeitig soll

auch die Ausbreitung von Geruch mittels systematischer Begehungen untersucht werden, um anschliessend Lösungsansätze zur Minderung von Geruchsemissionen abzuleiten.



Figur 4: Schema der 20-Liter-Labor-Versuchsanlage (ZHAW Wädenswil).

All diese Projekte, welche sich mit der Emissionsthematik von Biogasanlagen beschäftigen, arbeiten eng zusammen und ergänzen sich sehr gut, um eine breite Datenbasis zu schaffen und zu fundierten Aussagen zu gelangen.



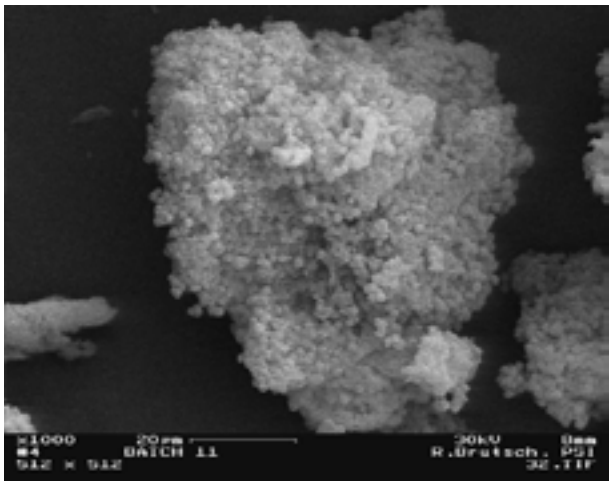
Figur 5: Biogaszusammensetzung: Der CH_4-Gehalt liegt in der kontinuierlichen Phase (siehe Markierung) sehr konstant bei rund 70 % (ZHAW, Wädenswil).

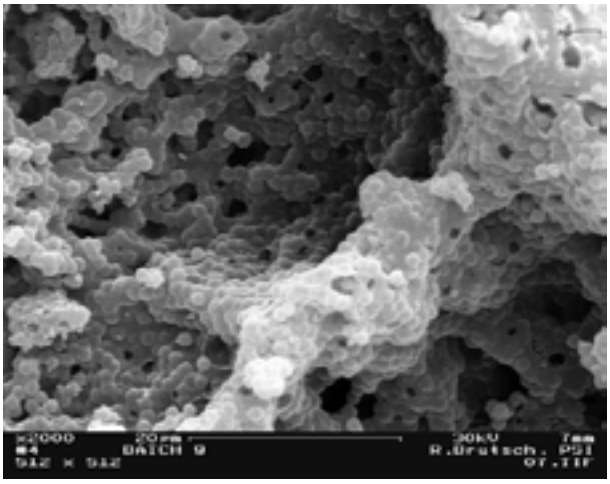
Der zweite Themenbereich der Ausschreibung legte den Schwerpunkt auf die **Optimierung von Biogasanlagen**. Seit fast 25 Jahren gibt es ein Standard-Verfahren zur Bestimmung des Faulverhaltens von organischen Substraten, dennoch wird die Biogasproduktion oft unter- bzw. überschätzt. Dies hängt mit der Wahl des Inokulums, der Medienzusammensetzung, der Temperatur, des Volumens des Testreaktors usw. zusammmen. Das Projekt *Optimisation des tests standardisés de digestibilité dans des réacteurs batch et continus* [14] soll die Hauptparameter, welche zur Unter- bzw. Überschätzung der Biogasproduktion führen, identifizieren, um ein neues, besser adaptiertes Testsystem zu erarbeiten. Das Biogasproduktionspotenzial wird sowohl in Batch-, als auch Durchflussreaktoren getestet.

Neben Flüssiggülle als Substrat für Biogasanlagen fällt in fast allen landwirtschaftlichen Betrieben auch Festmist an, welcher im Vergleich zu Flüssiggülle bei der Lagerung und der Austragung tiefere Ammoniumemissionen aufweist und gleichzeitig Strukturelemente in den Boden bringt. Dieses Potenzial gilt es in der Landwirtschaft ebenfalls zu nutzen, weshalb die Studie *Evaluation und Auswahl einer Feststoffanlage zur Biogasproduktion* [15] der Auswahl einer geeigneten Feststoff-Vergärungsanlage (Pilotanlage) für einen Westschweizer Hof dient.

Auch neue Verfahren zielen auf eine optimale Nutzung der Substrate zur Biogasproduktion bei gleichzeitiger Schliessung der Stoffkreisläufe ab. Beim Projekt *Vergärung von Gülle und Co-Substraten in einem Membran-Bio-Reaktor (MBR)* [16] geht es um ein Vergärungssystem, bei dem mit Hilfe einer Ultrafiltrationsmembran die Bakterien und organischen Stoffe abgetrennt und in den Reaktor zurückgeführt werden. Nach bisherigen Erkenntnissen ist mit dem MBR-System eine Steigerung der spezifischen Gasausbeute im Vergleich zur Vergärung von unbehandelter Rohgülle bzw. separierter Dünngülle in einem Rührkesselreaktor erreichbar. Weder im Labor (Fig. 4 und Fig. 5) noch im halbtechnischen Massstab konnte bisher eine negative Beeinflussung durch die Rückführung des UF-Retentats (UF: Ultrafiltration) auf den Gärprozess beobachtet werden. Hingegen kann

davon ausgegangen werden, dass der Betrieb eines MBR über einen längeren Zeitraum nicht ohne Entnahme von UF-Retentat bewerkstelligt werden kann, da sich anorganische und praktisch inerte Feststoffe im Reaktor akkumulieren.





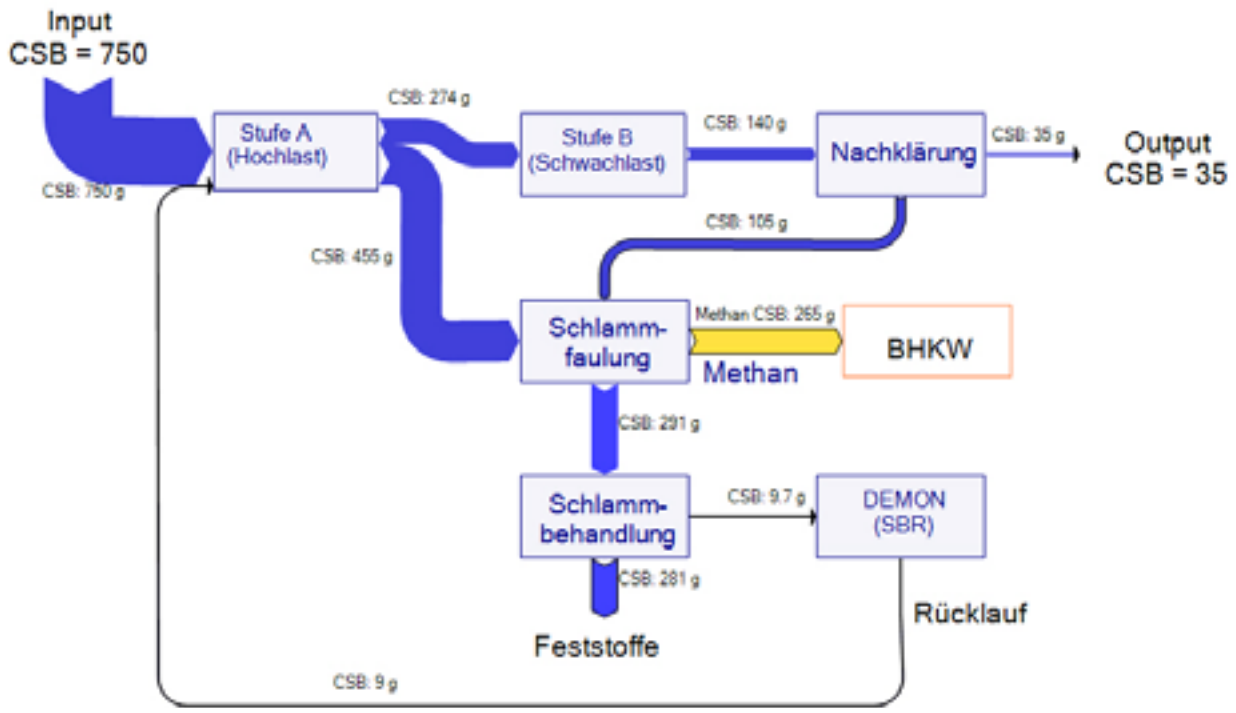
Figuren 6.1 (oben) und 6.2 (unten): SEM-Aufnahmen der Koksproben aus Versuch 11, 20 %-ige Glyzerinlösung, Verweilzeit 60 min, 300 °C, 350 bar (PSI, Villigen).

Ein weiteres Projekt im Bereich effiziente Nutzung von nasser Biomasse – *Optimierung der Hydrolyse und Salzabtrennung bei der hydrothermalen Vergasung von Biomasse* [17] – beschäftigt sich mit dem neuen thermo-chemischen Verfahren der hydrothermalen Vergasung (HTV). Dieses Verfahren nutzt Hofdünger als Ausgangsstoff und wandelt diesen in Methangas und CO_2 um, wobei gleichzeitig die im Hofdünger enthaltenen Nährsalze in konzentrierter Form zurückgewonnen werden. Im Rahmen des Projektes wird anhand der Umsetzung verschiedener organischer Modellsubstanzen mit unterschiedlichen Salzen untersucht, welche chemischen Vorgänge bei der Verflüssigung der Biomasse und der anschliessenden Salzabscheidung ablaufen. Daraus gewonnene Erkenntnisse sollen dazu dienen, die Koksbildung (Fig. 6.1 und 6.2) zu unterdrücken, die Abtrennungsrate der Nährsalze zu erhöhen und somit den kontinuierlichen Vergasungsprozess insgesamt zu optimieren. Neben der Nutzung von Hofdünger wird auch die Eignung von Kompogas-Presswasser für den Einsatz in der HTV im Projekt *Stofflich-energetische Verwertung von Kompogas-Presswasser durch hydrothermale Vergasung* [18] evaluiert. Ziel ist es, eine Aussage zum Gasertrag, zur Methanausbeute, zum kombinierten Verfahrensprozess Kompogas-HTV, zur Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen und zu den Kosten einer HTV-Anlage zu erhalten. Momentan werden Presswasserproben hinsichtlich ihrer Eignung für den HTV-Prozess analysiert.

Im Abwasserreinigungsbereich wurden ebenfalls Projekte realisiert, wobei zum einen ein neuer energieeffizienter Ansatz für kommunale Abwasserreinigungsanlagen (ARA) in der Studie *Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz* [19] evaluiert wurde, und zum anderen die *Vorteile und Grenzen der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen in Abwasserreinigungsanlagen im Vergleich zu landwirtschaftlichen Anlagen* [20] betrachtet wurden. In der Studie *Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz* [19] wurde die Möglichkeit einer energieeffizienten anaeroben Abwasserbehandlung unter Schweizer Bedingungen untersucht und evaluiert. Durch eine weitgehend anaerobe Behandlung von kommunalem Abwasser kann mehr Biomethan als erneuerbarer Energieträger gewonnen werden, wie dies bei herkömmlichen Anlagen der Fall ist. Neue Membrantechnologien eröffnen ebenso Möglichkeiten, die Energieausbeuten zu steigern und zugleich die Ablaufqualität des Wassers zu verbessern. Was grundsätzlich sehr positiv erscheint, zeigt Tücken im Detail. Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere von Methan könnten weitaus klimaschädlicher sein, als die Vorteile der Produktion von erneuerbarer Energie erwirken würden. Deshalb muss gelöstes Methan im Wasser technisch oder biologisch entfernt werden, was zusätzlichen Aufwand und Energieverbrauch bedeutet. Im Projekt wurden verschiedene Modelle von anaeroben ARAs entworfen und berechnet. Es zeigte sich, dass der Unterschied in der Energiebilanz von anaeroben Modellen und energieoptimierten konventionellen ARAs marginal ist. Klassische ARAs haben in den vergangenen Jahren bezüglich

Energieeffizienz durch Optimierungsmassnahmen grosse Fortschritte erzielt (Fig. 7). Da die Infrastruktur von anaeroben ARAs grössere Investitionen erfordert, macht eine Anwendung im Bereich von kommunalem Abwasser nur in Ausnahmefällen Sinn. Wenn konsequent Oberflächen- und Fremdwassereinträge in ARAs verhindert werden, steigt folglich die Konzentration von organischen Inhaltsstoffen im Abwasser an, wodurch die anaerobe Behandlung konkurrenzfähiger wäre, als das heutzutage der Fall ist. Unterhalb eines bestimmten Grenzwerts der organischen Fracht wird eine anaerobe Abwasserreinigung nicht rentabel betrieben werden können. Das durchschnittliche Schweizer Abwasser befindet sich nur knapp über diesem Grenzwert. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Abwasserbehandlung ist das Nährstoffrecycling (P, N), welches in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Die anaerobe Behandlung an sich kann zum Recycling direkt nichts beitragen. Aktuell findet Nährstoffrecycling in Schweizer ARAs noch kaum Anwendung.

Verlust an pflanzenverfügbarem (Stoffe, welche von der Pflanze in der vorliegenden direkt Form aufgenommen werden können) Stickstoff und Phosphor, welche dem Stoffkreislauf entzogen werden. Durch eine Auslastung der vier untersuchten landwirtschaftlichen Anlagen könnte hingegen sogar jährlich Stickstoff und Phosphor dazu gewonnen werden. Bezüglich Energiebilanz kann in der ARA ein Vielfaches der Nettoenergie bereitgestellt werden, verglichen mit der Produktion auf einem landwirtschaftlichen Betrieb. Die Resultate der CO_2-Bilanz sind analog zur Energiebilanz. Bezüglich Wirtschaftlichkeit zeigt die Co-Vergärung der ARA eine sehr gute Rentabilität. In den untersuchten landwirtschaftlichen Anlagen besteht eine grosse Variabilität der Wirtschaftlichkeit. Bei einer besseren Auslastung könnten aber alle Betriebe gute finanzielle Resultate ausweisen. Bei den gesellschaftlichen Faktoren weisen ARA und Landwirtschaft generell eine sehr positive Bilanz aus. Die Studie zeigt, dass die Nachhaltigkeit der Co-Vergärung nicht branchen-, sondern

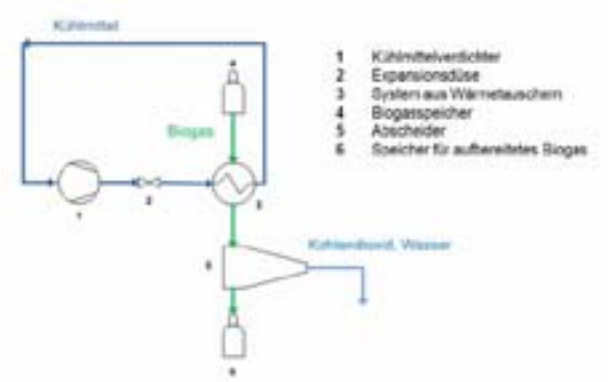


Figur 7: Stoffflussdiagramm einer real bestehenden, betriebsoptimierten konventionellen ARA mit Hoch- und Schwachlaststufe (AB-System). Die Daten wurden im Sommer 2004 auf der ARA Zillertal erhoben. Diese weist seit 2005 eine 100 %-ige elektrische Eigenenergieversorgung auf. DEMON = Stickstoffelimination nach dem Anammox-Prinzip. Blau = CSB-Flüsse (gelöst und suspendiertes organisches Material), Gelb = Methanflüsse (als CSB) (ZHAW, Wädenswil).

Bei der Vergleichsstudie [20] wurde die Co-Vergärung in einer ARA und landwirtschaftlichen Betrieben auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene untersucht und verglichen. In Bezug auf die Stoffflüsse zeigte die untersuchte ARA einen anlagenspezifisch beurteilt werden sollte. Parameter, welche die Nachhaltigkeit beeinflussen, sind Anlagegrösse und -auslastung, der Nutzungsgrad der erzeugten Energie, die Transportdistanz der

Co-Substrate und – in der landwirtschaftlichen Co-Vergärung – die Lagerungs- und Ausbringtechnik.

Neben der Produktion von Biogas wurde im Jahr 2009 ein Projekt abgeschlossen, welches sich mit der Biogasnutzung auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen auseinandersetzt. Die Aufbereitung von Biogas zu Treibstoff ist eine Alternative zur Strom- und Wärmeproduktion. Im Projekt *Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen* [21] wurde ein Funktionsmuster erstellt, welches auf der kryogenen Gastrennung basiert und mit landwirtschaftlichem Biogas betrieben werden kann. Dieses Funktionsmuster (Fig. 8) wurde mit zwei getrennten Kühlkreisläufen gebaut. Im Kühlkreislauf wird trockenes Biogas als Kühlmittel verdichtet und anschliessend in einer Düse entspannt. Der Druckabfall bewirkt eine starke Temperaturabnahme. In speziell entwickelten, kompakten Wärmetauschern wird Biogas durch das Kühlmittel gekühlt, bis Kohlendioxid kondensiert und in einem Abscheider anfällt. Das gereinigte Biogas hatte einen Reinheitsgrad von 70 % bis 80 %, je nach Prozessrahmenbedingungen. Erste Abschätzungen für die Kleinserienanfertigung einer solchen Anlage resultierten in einem Verkaufspreis von ca. CHF 150'000.– und variablen Betriebskosten von ca. 0,86 CHF/Nm^3 bzw. 0,74 CHF/Benzin-Äquivalent.



Figur 8: Vereinfachtes Prinzipschema der Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen (Apex AG, Dänikon).

Ein weiterer Schwerpunkt der Ausschreibung beinhaltete die **Ökobilanzen**. Die Genauigkeit von Ökobilanzen hängt zum grossen Teil vom Zahlenmaterial ab, auf dem sie beruhen. Daher gilt es, die Zahlen der verschiedenen Technologien und Prozesse ständig zu aktualisieren und auch neueste Entwicklungen und Prozesse mit aufzunehmen. Gemeinsames Ziel der verschiedenen Ökobilanzmethoden ist es, das betriebliche Geschehen auf mögliche ökologische Risiken und Schwachstellen systematisch zu überprüfen und Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Ökobilanzen im Biomassebereich sind wichtige Entscheidungsgrundlagen, um bestimmte Prozesse und Technologien bezüglich ihrer Umweltwirkungen einzuordnen und gegebenenfalls zu fördern. Verschiedene Projekte befinden sich derzeit in der Start- und somit Koordinationsphase [22 – 26].

Zwei weitere Projekte im Bereich Biomasse sind erwähnenswert, welche unter der Federführung des Zentrums für Technologiefolgen-Abschätzung (TA Swiss) bzw. des BAFU initiiert wurden.

Neben der Aufarbeitung der Literatur zum Thema Biomasse spielen auch Untersuchungen zu Chancen und Risiken neuer Technologien eine Rolle. Die von TA Swiss initiierte Studie zum Thema *Treibstoffe aus Biomasse – zweite Generation* [27] wird vom BFE finanziell aber auch inhaltlich (Einsitz in Begleitgruppe) mitgetragen. Die zweite Generation Biotreibstoffe soll eine bessere Energie- und Umweltbilanz aufweisen: Als Ausgangsmaterialien sollen Holz, Stroh und Pflanzenabfälle dienen, d.h. es wird nicht Zucker oder Stärke, sondern Zellulose zu Treibstoff verarbeitet. Als Schwerpunkt der interdisziplinären Studie sollen dann die Zukunftsperspektiven (Chancen und Risiken) von Biotreibstoffen der zweiten Generation abgeschätzt werden. Diese werden jetzt als zweckmässige Lösung dargestellt – es gibt dabei aber Unsicherheiten, da sich noch mehrere Produktionsmethoden in Entwicklung befinden und unklar ist, welche davon schliesslich für die Herstellung im grossen Massstab am besten geeignet sind. Eine vertiefte Abklärung unter Berücksichtigung der aktuellen Forschungsergebnisse ist deshalb erforderlich, damit diese Technologien umfassend beurteilt werden können. Dabei sind neben Fragen der Energieeffizienz und der Umweltbilanz auch wirtschaftliche und soziale Aspekte zu erörtern und Potenziale für künftige Entwicklungen aufzuzeigen. Diese Studie wird im Jahr 2010 abgeschlossen werden, so dass danach darüber berichtet werden kann.

Auch das Projekt *Infothek Biomasse* [28] lief im Jahr 2008 bereits an. Das BAFU hat sich zusammen mit dem BFE und dem BLW entschlossen, eine zentrale Anlaufstelle einzurichten, über die wichtige Dokumente und Studien zum Thema Bio-

masse verfügbar sind. Dies vor dem Hintergrund, dass eine Vielzahl an Informationen zur Biomasse vorhanden sind, es jedoch eine Herausforderung ist, die gewünschten Informationen in kurzer Zeit zu finden. Dies soll in Form einer Internet-basierten Plattform realisiert werden. Die *Infothek Biomasse* umfasst die unterschiedlichen Biomasse-Rohstoffe, die unterschiedlichen Verarbeitungswege und -technologien sowie die unterschiedlichen Nutzungsvarianten (Nahrungs- und Futtermittel, stoffliche Nutzung, Vergärung, Kompostierung, Verbrennung usw.). 2009 wurden zahlreiche weitere Dokumente aufgenommen und die Suchmaske sprachlich mit Französisch ergänzt, so dass im Frühjahr 2010 die Aufschaltung erfolgen kann.

Nationale Zusammenarbeit

Das Forschungsprogramm *Biomasse und Holzenergie* bemühte sich auch 2009 eng mit dem Marktbereich zusammenzuarbeiten und sich abzustimmen. In der Begleitgruppe des Forschungsprogramms haben deshalb sowohl die Marktbereichsleiter *Biomasse* (Sektion Erneuerbare Energien), als auch die Mandatsträger von Energie-Schweiz Einsitz, wodurch sowohl der Informationsfluss, als auch angeregte fachliche Diskussionen gewährleistet sind. Gleichzeitig erfolgt ausserhalb der Begleitgruppe auch ein Austausch mit anderen Forschungsprogrammen des BFE, welche thematisch eng mit dem Forschungsprogramme *Biomasse und Holzenergie* verknüpft sind (z.B. WKK). Auch die Ämter übergreifende Zusammenarbeit mit dem BAFU und dem BLW wurde intensiviert.

Im Rahmen des *Aktionsplans Erneuerbare Energien* des Bundesrats wurde das BFE beauftragt, in Anlehnung an die übergeordnete *Biomassestrategie der Schweiz* [29] eine Strategie zur energetischen Nutzung der Biomasse in der Schweiz zu erarbeiten. Diese soll aufzeigen, wie das vorhandene energetische Biomassepotenzial möglichst vollständig, effizient und umweltschonend genutzt werden kann. Im Berichtsjahr wurde mit der Erarbeitung dieser Strategie unter der Federführung der Sektion *Erneuerbare Energien* begonnen. Auch die Bereichsleitung des Forschungsprogramms *Biomasse und Holzenergie* arbeitet aktiv in dieser Arbeitsgruppe mit. Die Publikation dieser Strategie ist auf Mitte 2010 geplant.

Internationale Zusammenarbeit

Das BFE ist Mitglied beim Implementing Agreement *Bioenergy* der IEA (International Energy Agency) [30], welches aus 13 Tasks besteht. Die Schweiz arbeitet in 3 Tasks aktiv mit. Generell haben die Schweizer Vertreter in dem jeweiligen Task zum Ziel, den internationalen Stand von Technik, Forschung und Marktumsetzung zu kennen und in der Schweiz zu vermitteln, und gleichzeitig die Anliegen der Schweiz in der IEA zu vertreten.

Implementing Agreement *Bioenergy*

Task 32: Biomass combustion and Co-Firing

Dieser Task [31] hat zum Ziel, die Markteinführung der Biomasseverbrennung zur Energieerzeugung zu fördern. Die Arbeitsgruppe setzt sich zur Überwindung technischer und nicht-technischer Hindernisse ein und unterstützt den Einsatz effizienter und schadstoffarmer Technologien. Dazu erfolgen ein umfassender Erfahrungsaustausch unter den Mitgliedsstaaten sowie die Zusammenarbeit in ausgewählten Schwerpunktsthemen. Unter anderem leistete die Schweiz einen Beitrag zum *Pellet-Handbook* (Herausgabe: Frühjahr 2010). Für das neue Triennium (2010 – 2012) konnte die Beteiligung auf 14 Mitgliedsstaaten erhöht werden. Die bisherigen Schwerpunkte wie Feinstaub, Kleinfeuerungen, Wärmekraftkopplung und Zufeuerung werden weiter behandelt und um zusätzliche Themen wie Sicherheit, Ascheverwertung und Brennstoffvorbehandlung erweitert. Aus der Schweiz wurde für das nächste Triennium ein besonderes Interesse an den 5 Kategorien «Small scale biomass», «Industrial scale biomass», «Simulation», «Emissions» und «Policy issues» angemeldet. Im Vergleich zu den bisherigen Aktivitäten soll der

Einbezug der Industrie verstärkt werden. Für das kommende Triennium wurden folgende Task-Schwerpunkte festgelegt: (1) Review über Feinstaubabscheider für Kleinanlagen; (2) Evaluation der Eignung «gerösteter» Biomasse für verschiedene Anwendungen; (3) Review über Sicherheitsaspekte bei der Brennstofflagerung; (4) Publikation über Optionen der Ascheverwertung; (5) Erweiterung der Datenbank über Biomasse-Zufeuerung.

Task 33: Thermal Gasification of Biomass

Auch innerhalb dieses Tasks [32] baute die Arbeit im Jahr 2009 auf den Aktivitäten früherer Perioden auf. Für das von der Europäischen Kommission unterstützte Projekt *Gasification Guide* wurden wichtige Vorarbeiten im Task geleistet, wobei die Schweiz an einer Leitlinie für Vergasungsanlagen bezüglich Gesundheit, Sicherheit und Umweltaspekte mitarbeitete. Themen, welche innerhalb von Task Workshops behandelt wurden und somit auch die Aktualität der Themen widerspiegelt sind: (1) Rohgasreinigung; (2) Gaskonditionierung; (3) Synthesegaskonversion; (4) Verbesserungen beim Betrieb von Vergasungsanlagen. Mit dem Beginn des neuen Trienniums sollen verschiedene Themen vertieft behandelt werden, u.a. Biotreibstoffe der 2. Generation, Vergasungstechnologien inkl. Energie- und Chemikalienproduktion, Fortschritte in der Gasreinigung und Vergaserbeschickung mit unterschiedlichem Ausgangsmaterial.

Task 37: Energy from Biogas and Landfill Gas

Die übergeordnete Aufgabe des Tasks [33] ist die Information über die Technik der anaeroben Vergärung. Dazu gehört, neben der Gärtechnik und den verschiedenen Substraten, die Aufbereitung und Nutzung des produzierten Biogas sowie der Einsatz der Gärguts als organischer Dünger. Die Schwerpunkte 2009 wurden auf die Gasaufbereitung und auf die Verwendung von Energiepflanzen gelegt. Die Gasaufbereitung ist – nach den Vorreitern Schweden und Schweiz – inzwischen bei fast allen Mitgliederländern des Tasks ein Top-Thema geworden. Weltweit stehen rund 100 Aufbereitungsanlagen in Betrieb, die meisten davon in Schweden und Deutschland.

Für das neue Triennium konnte die Beteiligung der Mitgliedsländer auf 15 erhöht werden. Als Schlüsselthemen stehen Nachhaltigkeit und Qualitätsfragen – jeweils für die ganze Produktionskette betrachtet – im Vordergrund. Dies beinhaltet Vergleiche bezüglich Massen-, Energie- und Emissionsbilanzen für verschiedene Verfahren und den Einsatz verschiedener Substrate.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Jahr 2009 liefen 2 Projekte im Bereich Pilot- und Demonstrationsprojekte (P&D), wobei 4 weitere bereits vom BFE bewilligt wurden und 2010 realisiert werden.

Figur 9: Pilotanlage für die thermische Nutzung von Miscanthus (Feuerungseinheit + Rauschgaswäscher) (Agroscope Reckenholz-Tänikon, ART).

Das Projekt *Traitement de l'azote des digestats issus d'installations de biogaz au moyen d'un reacteur à biofilm sur support mobile* [34] hat zum Ziel, ein kombiniertes Konzept zu entwickeln, welches die Biogasproduktion (Landwirtschaft, Abwasserreinigung etc.) mit der biologischen Abtrennung von Ammoniak verbindet. Dies wird mit Hilfe eines Biofilms, welcher sich auf einer beweglichen Unterlage befindet, erreicht. Auf dieser Unterlage läuft sowohl der Prozess der Nitrifikation, als auch die Denitrifikation ab. Die vorhandene Pilotanlage, welche auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in der Westschweiz installiert ist, demonstrierte in den ersten drei Monaten der Inbetriebnahme die grundsätzliche Machbarkeit des Verfahrens. Es gilt nun die Leistung des Verfahrens im Hinblick auf

die hydraulische Aufenthaltszeit und die Ammoniumbelastung herauszufinden.

Im Projekt *Miscanthus-Kleinfeuerung* [35] wurde eine Pilotanlage (35 kW) kombiniert mit einem Rauchgaswäscher für die thermische Nutzung von Miscanthus in Betrieb genommen (Fig. 9). Nicht ganz unerwartet führte der hohe Feinstaubgehalt zu einer starken Belastung des Wäscherwassers mit Aschebestandteilen. Um jegliche Abwasserbelastung zu vermeiden wird versucht, die Aschebestandteile mittels gelöschtem Kalt auszufällen und abzuscheiden. Ziel ist es, den Schlamm getrocknet zu entsorgen und das geklärte Wasser wieder im Wäscher einzusetzen. In einem nächsten Schritt wird abgeklärt, welchen Einfluss der pH-Wert und die Verschmutzung des Wäscherwassers auf die Abscheideleistung des Rauchgaswäschers haben.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Das Berichtsjahr 2009 wurde von sehr vielen Aktivitäten geprägt. Durch die leider nur einjährige Aufstockung des Budgets konnten dennoch zahlreiche neue Projekte mittels einer Ausschreibung lanciert werden. Der Fokus der Ausschreibung lag auf drei Themenbereichen (siehe Kapitel *Programmschwerpunkte*), welche die übrige Biomasse (ohne Holz) betreffen. Aus 34 eingegangenen Projektskizzen sind 13 Projekte entstanden. Das BFE versuchte hierbei auch konkurrierende Projektvorschläge zusammenzubringen, um die Expertise beider Antragsteller zu vereinen und die Synergien der dargestellten Vorgehensweisen zu nutzen. Neben der Vernetzung der Fachleute innerhalb eines Themenbereichs war eine Zielsetzung des Forschungsprogramms auch die Transparenz nach aussen. Verschiedene Biomasseprojekte wurden im Laufe des Jahres in der Fachpresse und an nationalen oder internationalen Tagungen vorgestellt. Ein weiterer wichtiger Punkt, welcher auch im Jahr 2010 seine Gültigkeit behält, ist die Kontaktaufnahme zu Forschungsgruppen und Firmen in der Schweiz, welche bisher wenig mit dem BFE in Berührung gekommen sind. Hier gilt es die Forschungsaktivitäten der Gruppen besser kennenzulernen und gleichzeitig auch die Industrie besser einzubinden. Dank der bestehenden Netzwerke im Biomassebereich und der bestehenden Begleitgruppe für das Forschungsprogramm funktioniert der Informationsaustausch sehr gut. Die Schweiz ist im Biomassebereich auch international sehr gut verankert (CEN Gremien, European Biogas Association, EU-Projekte), so dass die Interessen der Schweiz und die Information über Schweizer Aktivitäten international platziert werden können.

Wichtig für eine Ziel führende Forschungsprogrammarbeit ist auch die Abstimmung mit anderen Ämtern, welche ebenfalls im Themenbereich Biomasse aktiv sind. Hier wurde in Bezug auf neue Projekte oder aktuelle Themen ein Austausch mit dem BAFU und dem BLW weiter gepflegt, welcher im kommenden Jahr noch zu intensivieren ist. Zwei etablierte Gruppen sind bis dato die *AG Biomasse* und eine *Gruppe zu Ökobilanzen*. Auch der gegenseitige Einsitz in Projektbegleitgruppen ist als positiv zu bewerten. Innerhalb des BFE ist im Bereich Biomasse die gut etablierte Zusammenarbeit zwischen Markt und Forschung hervorzuheben. Der gemeinsame Besuch von Forschungsprojekten und die gemeinsame Teilnahme an Branchenveranstaltungen erleichtern die Umsetzung von Forschungsergebnissen in der Praxis. Gleichzeitig werden praxisrelevante Fragen und Probleme von der Forschung aufgenommen, um die Forschung auch möglichst marktnah auszurichten. Wichtig für das Forschungsprogramm ist auch die Verknüpfung mit thematisch eng verwandten Programmen wie z.B. WKK, da sich aus der gemeinsamen Unterstützung von Projektanträgen gewinnbringende Synergien ergeben.

Im Hinblick auf die Programmschwerpunkte laufen in allen drei Bereichen (Systemoptimierung und -integration, Qualitätssicherung, neue Verfahren und Technologien) interessante Projekte. Das Thema Systemoptimierung und -integration wurde im Rahmen der Ausschreibung 2009 für die nichtholzige Biomasse verstärkt angegangen.

Einen guten Einblick in die internationale Forschung vermittelt die jährlich stattfindende europäische Biomassekonferenz. Aus der Sicht der energetischen Biomassenutzung gilt unterdessen als anerkannt, dass Effekte durch direkte oder indirekte Veränderungen von Boden und Stoffströmen die Klimawirkung und die Gesamtökobilanz drastisch

beeinflussen können, jedoch schwierig (Land Use Change) oder fast unmöglich (Indirect Land Use Change) zu quantifizieren sind. Noch praktisch keine Beachtung fand an der Konferenz die Tatsache, dass erst seit Kurzem auch vom IPCC anerkannt wird, dass Russ (Black Carbon) den zweit- oder drittgrössten Beitrag zur Klimaerwärmung aufweist.

Ein Meilenstein im Jahr 2009 war die Präsentation des Detailkonzeptes 2008 – 2011 vor der Commission de la Recherche Énergétique (CORE), welche ein sehr positives Feedback gab. Auch die einmalige Budgetaufstockung im Jahr 2009 und die hohe Resonanz auf die Ausschreibung zeigt die Bedeutung der Biomasseforschung in der Schweiz. 2010 gilt es die Kontinuität aufrecht zu erhalten und die erarbeitete Expertise zu erweitern, was jedoch durch die jährlichen Budgetschwankungen schwierig ist.

Liste der F+E-Projekte

[1] J. Good (juergen.good@hslu.ch), Th. Nussbaumer, HSLU Horw: Prüfverfahren für die Startphase auf der Basis von EN 303-5 Teil 1 Stückholzkessel (Jahresbericht Projekt 153827).

[2] B. Salerno (basso.salerno@sesolar.ch) Salerno Engler Gmbh, Langenbruck, A. Jenni, ardens GmbH, Liestal, D. Schlottmann, Lopper AG, Buochs: Buondi-Emissionsarme Startphase bei Stückholzkessel (Jahresbericht Projekt 102525).

[3] Th. Nussbaumer (thomas.nussbaumer@verenum.ch), J. Good, Verenum, Zürich, A. Doberer, HSLU Horw R. Bühler, Umwelt & Energie, Maschwanden: Partikelemissionen von Holzfeuerungen bis 70kW (Jahresbericht Projekt 101905).

[4] J. Good (juergen.good@hslu.ch), Th. Nussbaumer, HSLU Horw: Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen (Schlussbericht Projekt 102618).

[5] R. Haberl (Robert.Haberl@solarenergy.ch), L. Konersmann, E. Frank, SPF, Rapperswil: Pelletsolar-2 Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand (Jahresbericht Projekt 101792).

[6] A. Prévôt (andre.prevot@psi.ch), U. Baltensperger, PSI, Villigen : Erweiterte Partikelanalytik für Holzfeuerungsabgase (Jahresbericht Projekt 102207).

[7] L. Konersmann (Lars.Konersmann@solarenergy.ch), R. Haberl, E. Frank, SPF, Rapperswil: SimPel: Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Jahresnutzungsgraden (JNG) von Biomasse-Kleinfeuerungen (Jahresbericht Projekt 102864).

[8] M. Wellinger (marco.wellinger@psi.ch), J. Wochele, Ch. Ludwig, PSI, Villigen: Oberflächen-Ionisationsdetektor zur Online Messung von Alkalien in Prozessgasen (MOPSID: Monitoring of Process Gases with a Surface Ionization Detector) (Jahresbericht Projekt 102093).

[9] T. Schildhauer (tilman.schildhauer@psi.ch), S. Biollaz, PSI, Villigen: Hochtemperatur-Entschwefelung für biogene Produktgase – Design und Optimierung (Schlussbericht Projekt 102133).

[10] A. Soltermann-Pasca (alina.pasca@art.admin.ch), L. v. Caenegem, Agroscope Tänikon ART: Methanverluste bei Biogasanlagen (Statusbericht Projekt 103310).

[11] E. Büeler (elmar.bueeler@axpo-genesys.ch), Axpo Genesys AG, Frauenfeld: CH_4-Emissionen bei EPDM-Gasspeichern und deren wirtschaftlichen und ökologischen Folgen (Jahresbericht Projekt 103309).

[12] H. Frantz (holger.frantz@ebp.ch), Ernst Basler + Partner AG, Zollikon: Messung von Geruchsemissionen und Entwicklung eines Geruchsemissionsmodells für Biogasanlagen (Projekt 103315).

[13] K. Mager (kerstin.mager@art.admin.ch), S. Schrade, M. Keck, Agroscope Tänikon ART: Geruchsquellen bei Biogasanlagen (Statusbericht Projekt 103306).

[14] N. Bachmann (nathalie.bachmann@erep.ch), EREP SA, H. Fruteau de Laclos, Ch. Holliger, EPF Lausanne, Y. Membrez, EREP SA, Aclens, A. Wellinger, Novaenergie, Aadorf: Optimisation des tests standardisés de digestibilité dans des réacteurs batch et continus (Jahresbericht Projekt 103311).

[15] A. Wellinger (arthur.wellinger@novaenergie.ch), Novaenergie, Aadorf, N. Bachmann, EREP SA, Aclens: Evaluation und Auswahl einer Feststoffanlage zur Biogasproduktion (Jahresbericht Projekt 103419).

[16] J.-L. Hersener (hersener@agrenum.ch), Ingenieurbüro Hersener, Wiesendangen, U. Meier, Meritec GmbH, Guntershausen, U. Baier, M. Kühni, S. Künzli, ZHAW, Wädenswil: Vergärung von Gülle und Co-Substraten in einem Membran-Bioreaktor (MBRII) (Jahresbericht Projekt 102406).

[17] J. Müller (johannes.mueller@psi.ch), F. Vogel, PSI, Villigen: Optimierung der Hydrolyse und Salzabtrennung bei der hydrothermalen Vergasung von Biomasse (Jahresbericht Projekt 102301).

[18] F. Vogel (frederic.vogel@psi.ch), PSI, Villigen: Stofflich-energetische Verwertung von Kompogas-Presswasser durch hydrothermale Vergasung (Statusbericht Projekt 103313).

[19] R. Warthmann (Rolf.Warthmann@zhaw.ch), M. Kühni, U. Baier, ZHAW, Wädenswil: Anaerobe Behandlung kommunaler Abwässer in der Schweiz (Schlusssbericht Projekt 102774).

[20] N. Bachmann (nathalie.bachmann@erep.ch), EREP SA, Aclens: Vorteile und Grenzen der Vergärung von leicht abbaubaren Industrie- und Lebensmittelabfällen in Abwasserreinigungsanlagen – Vergleich zur landwirtschaftlichen Vergärung (Masterarbeit EPFL Projekt 102963).

[21] U. Oester (info@apex.eu.com), Apex AG, Däniken: Aufbereitungs- und Betankungsanlage für kleinere Biogasproduktionsmengen (Schlussbericht Projekt 101564).

[22] M. Leuenberger (leuenberger@esu-services.ch), N. Jungbluth, ESU-services, Uster: Ökobilanz der Biogasproduktion aus unterschiedlichen Substraten (Projekt 103298).

[23] A. Dauriat (arnaud.dauriat@eners.ch), ENERS Energy Concept, Lausanne, Y. Membrez, Nathalie Bachmann, EREP, Aclens, G. Gaillard, Agroscope Reckenholz-Tänikon ART : Analyse de cycle de vie de la production centralisée et décentralisée de biogaz en exploitations agricoles (Projekt 103304).

[24] F. Hayer (frank.hayer@art.admin.ch), G. Gaillard, Th. Nemecek, D. Suter, H. Hug, M. Werder, G. Albisser, Ch. Gazzarin, Agroscope Reckenholz-Tänikon ART: Ökobilanzierung des Anbaus von Zwischenfrüchten zur Biogasproduktion (Projekt 103302).

[25] F. Dinkel (f.dinkel@carbotech.ch), M. Zschokke, Carbotech AG, Basel, K. Schleiss, UMWEKO GmbH, Grenchen:Ökobilanz zur Biomassenutzung (Projekt 103300).

[26] M. Faist Emmenegger (mireille.faist@empa.ch), S. Gmünder, M. Lehmann, R. Zah, Empa Dübendorf, Th. Nemecek, Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Ch. Bauer, PSI, Villigen: Harmonisierung und Erweiterung der Bioenergie-Ökoinventare und –Ökobilanzen (Projekt 103314).

[27] A. Rüegsegger (adrian.ruegsegger@swtr.admin.ch), TA Swiss, Bern: Technology Assessment Studie «Treibstoffe aus Biomasse-zweite Generation» (Sitzungsunterlagen Projekt 102772).

[28] A. Märki (Alexandra.Maerki@ebp.ch), K. Serafimova, EBP, Zollikon: Konzept für die Infothek Biomasse (Konzeptentwurf Projekt 102782).

Referenzen

[29] BFE, 2009: Biomassestrategie Schweiz (www.bfe.admin.ch/dokumentation/publikationen).

[30] International Energy Agency (IEA) Implementing Agreement Bioenergy (www.ieabioenergy.com).

[31] Implementing Agreement Bioenergy Task 32 (www.ieabcc.nl).

[32] Implementing Agreement Bioenergy Task 33 (www.gastechnology.org).

[33] Implementing Agreement Bioenergy Task 37 (www.iea-biogas.net).

Liste der P+D-Projekt

[34] T. Bakx (toine.bakx@erep.ch), S. Roche, Y. Membrez, EREP SA, Aclens : Traitement de l'azote des digestats issus d'installations de biogaz au moyen d'un réacteur à biofilm sur support mobile (Jahresbericht Projekt 102995).

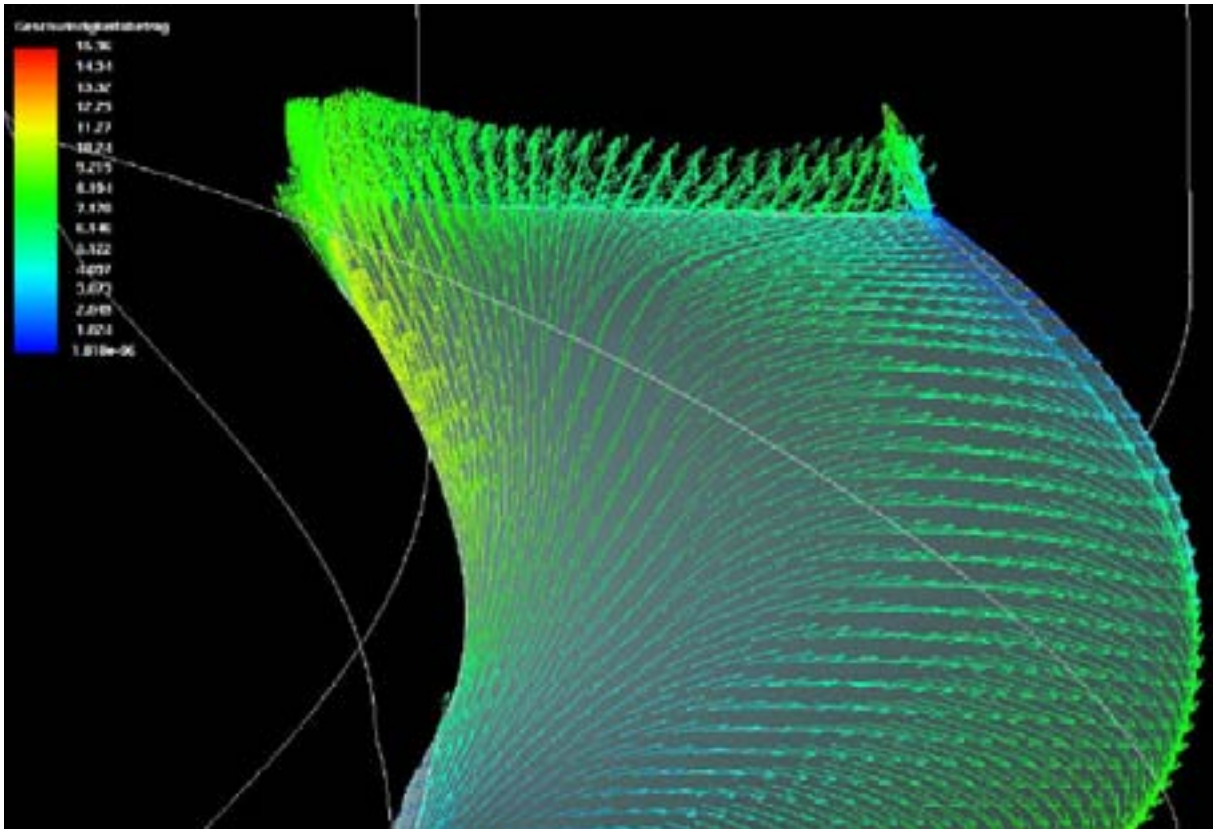
[35] T. Anken (thomas.anken@art.admin.ch), Agroscope, Tänikon: Miscanthus Kleinfeuerung (Jahresbericht Projekt 102882).

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Wasserkraft

Klaus Jorde

klaus.jorde@entec.ch



Verschmutzung von Kleinwasserkraftwerken

Geschwindigkeitsvektoren auf der Saugseite beim Spülvorgang an der Laufradschaufel einer Turbine (Quelle: Abgottspon und Staubli, 2009 [2])

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Ziel des Forschungsprogramms Wasserkraft ist die Förderung und Unterstützung der vollständigen Nutzung des vorhandenen Wasserkraftpotenzials in der Schweiz. Dabei wird eine ganzheitliche Betrachtungsweise zugrunde gelegt, die neben technischen und ökonomischen Aspekten insbesondere ökologische und landschaftsbezogene Schutzaspekte mit einschliesst. Das impliziert, dass mit «vollständiger Nutzung» nicht eine vollständige Nutzung des technischen Potenzials gemeint ist, sondern die Nutzung des Potenzialanteils, für den ein gesellschaftlicher und politischer Konsens vorhanden ist.

Aufgrund der stark unterschiedlichen Fragestellungen, sowie der Struktur und Finanzkraft der Betreiberorganisationen wird innerhalb des Programms unterschieden zwischen Grosswasserkraft und Kleinwasserkraft. Die Grenze ist dabei nicht scharf gezogen, liegt aber irgendwo zwischen 1 und 10 MW. Die Situation der Wasserkraft ist dabei unterschiedlich von anderen erneuerbaren Energiequellen. Bereits heute ist ein sehr hoher Nutzungsgrad des technischen Potenzials vorhanden, und die weiter möglichen Zuwächse insgesamt sind im Vergleich dazu eher gering. Aufgrund von Einflussfaktoren, welche die derzeitige Wasserkraftnutzung in ihrem Bestand beeinflussen werden, wie z.B. die Klimaveränderung oder die Umsetzung bereits verabschiedeter Gewässerschutz- und Restwasserbestimmungen, ist auch der Erhalt des derzeitigen Erzeugungspotenzials ein Bestandteil der Zielsetzungen des Forschungsprogramms.

Aktuell wird die Wasserkraftnutzung in der Schweiz – wie auch in anderen europäischen Ländern – von zwei Aktivitätsschwerpunkten dominiert:

- Die Öffnung des europäischen Stromnetzes und die enormen Kapazitäten an nicht regelbaren erneuerbaren Energien (Wind, Sonne), die in das Netz einspeisen, bewirken einen wachsenden Bedarf an Speicherkapazität. Neue wirtschaftliche Möglichkeiten ergeben sich daraus für die Betreiber grosser Speicherkraftwerke. Ausbau und Erweiterung bestehender (Pump-)-Speicherkraftwerke, auch hinsichtlich veränderter technischer Herausforderungen bilden daher den Schwerpunkt der Aktivitäten im Bereich grosser Wasserkraftwerke. Aus der veränderten Betriebsweise ergeben sich zusätzliche technische Anforderungen an die Anlagen, die in der ursprünglichen Konzeption nicht in dem Mass berücksichtigt wurden.
- Aufgrund der aktuellen Klimadiskussion und speziell der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) gibt es seit 2008 einen verstärkten Andrang auf die noch vorhandenen Standorte für Kleinwasserkraftanlagen. Auch Standorte mit sehr niedrigen Fallhöhen, die bisher nicht genutzt wurden, werden zunehmend anvisiert, da sie durch die KEV wirtschaftlich erschliessbar werden. Dadurch erhöht sich aber auch das Konfliktpotenzial mit dem Natur- und Gewässerschutz. Die Kantone als Entscheidungsträger sind teilweise überfordert mit der Anzahl neuer Gesuche.

Nahezu alle Forschungsaktivitäten im Forschungsprogramm Wasserkraft gehören zu einem dieser beiden Bereiche.

Das Jahr 2009 ist das erste Jahr nach der Einführung dieses neuen Forschungsprogramms 2008, und das wichtigste Ziel für dieses Jahr war demzufolge, qualitativ hochwertige und den Zielen des Programms dienende Forschungsprojekte mit unterschiedlichen Beteiligungen aus den Bereichen Grosswasserkraft und Kleinwasserkraft aufzugleisen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Die beträchtliche Anzahl eingereichter Forschungsanträge zeigt, dass das Programm gut angenommen wird. Zusätzlich zu den Projekten, welche jetzt gefördert werden, gab es auch eine ganze Reihe von Anfragen, die bearbeitet wurden, aber letztlich nicht zu einem Forschungsprojekt im Rahmen des Programms führten.

Forschungsschwerpunkte

Die beiden oben genannten Aktivitätsschwerpunkte zeichneten sich auch bei den eingereichten Projektanträgen ab. Innerhalb des Programms liegen die Schwerpunkte in den beiden Bereichen Bautechnik und Potenziale, aber auch in den übrigen Programmschwerpunkten gibt es Aktivitäten.

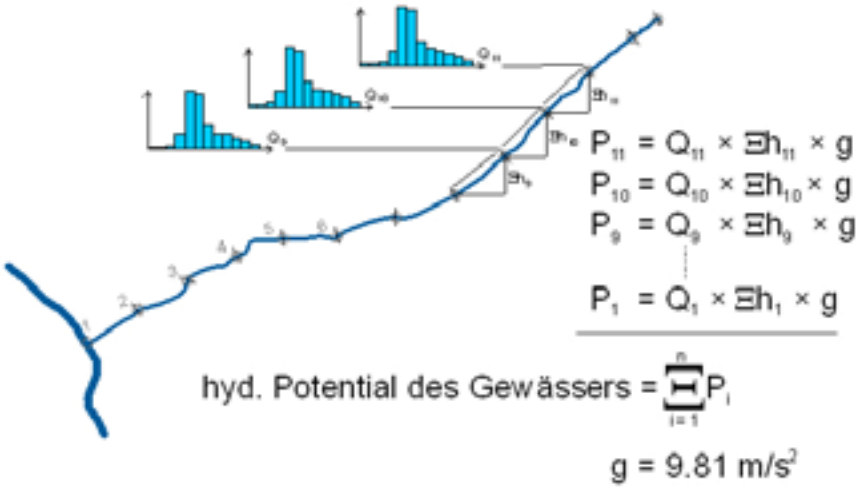
Grosswasserkraft

Im Bereich der ***Speicher- und Pumpspeicherkraftwerke*** wurden im Jahr 2009 drei Projektanträge eingereicht und positiv begutachtet. Alle drei Projekte haben Laufzeiten von etwa drei Jahren und werden durch *Swisselectric Research* und Eigenleistungen der beteiligten Institute ko-finanziert.

Im Projekt *Stahlpanzerung von Druckrohrleitungen* [1] am *Laboratoire des Constructions Hydraulique (LCH)* der EPFL wird untersucht, wie bei der Stahlpanzerung von Hochdruckleitungen die Tragwirkung des umgebenden Felsens mit berücksichtigt werden kann. Aus den Forschungsarbeiten anhand der Theorie, Versuchen im Modellmassstab und an einem konkreten Projekt werden neue Entwurfsrichtlinien erarbeitet. Diese führen zu einer wirtschaftlicheren Auslegung der Druckstollenpanzerung bei Hochdruckanlagen, die infolge der sich verändernden Betriebsweise immer häufigeren Druckschwankungen unterliegen. Im Jahr 2009 wurde das grundsätzliche Konzept erarbeitet und die Versuchsanlagen eingerichtet.

Ein weiteres Projekt beschäftigt sich damit, wie die zunehmende Verlandung von Speichern verhindert werden kann. Die Staubecken von Pumpspeicheranlagen, welche durch die steigende Energienachfrage und den vermehrten Regelbedarf in der Schweiz und weltweit an Bedeutung gewinnen, sind von Verlandungsproblemen betroffen. Es soll untersucht werden, wie die Turbulenz und die Ablagerung von Feinsedimenten in solchen Speichern durch die stetig wechselnden Pump- und Turbiniersequenzen beeinflusst werden. Wie kann die Turbulenz durch die Position sowie die Geometrie der Ein- und Auslaufbauwerke beeinflusst werden, um das Absetzen von Feinsedimenten zu reduzieren? Diese Fragen werden im Forschungsprojekt *Méthodes d'observation et de prévision de l'alluvionnement des retenues des aménagements de pompage-turbinage* [2] – ebenfalls am LCH der EPFL – untersucht. Im Jahr 2009 wurden Messungen am Pumpspeicherkraftwerk Grimsel durchgeführt, die Ergebnisse ausgewertet, sowie erste Labormodellversuche durchgeführt. Die beiden Projekte an der EPFL sind Teil des Forschungsprojekts *HydroNet* [13] (siehe nationale Zusammenarbeit).

Das dritte Forschungsprojekt zu Speicherkraftwerken *Lufteintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge Einlaufwirbel* [3] hat zum Ziel, die Lufteintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge von Einlaufwirbeln mit Hilfe eines grossmassstäblichen hydraulischen Modells zu untersuchen. Auch dieses Projekt beantwortet Fragen, die sich aus dem erhöhten Regelbedarf durch Pumpspeicherkraftwerke ergeben. Um einen maximalen Betriebsspielraum zu haben, sollen die Speicherseen möglichst weit abgesenkt werden können. Dadurch nimmt die Dicke der Wasserschicht über dem Einlauf ab und die Gefahr eines Lufteinzugs steigt. Um die Luft wieder aus dem System entfernen zu können – was für den Betrieb der Turbinen wichtig ist – müssen die Eintragsraten bekannt sein. Ende 2009 wurde die entsprechende Zusammenarbeit zwischen dem



Figur 1: Ermittlung des Wasserkraftpotenzials für ein Gewässer (Prinzipskizze), basierend auf mittleren monatlichen Abflüssen für die Ermittlung des Kleinwasserkraftpotenzials der Schweiz (Quelle: Schröder 2009 [2])

BFE und der *Versuchsanstalt für Wasserbau* (VAW) an der ETHZ fixiert. Bisher wurden Vorbereitungsarbeiten ausgeführt, so dass noch keine konkreten Zwischenergebnisse vorliegen.

Kleinwasserkraft

Im Bereich der Kleinwasserkraft wird die Situation in der Schweiz derzeit dominiert von insgesamt über 600 eingereichten Anträgen auf Zuschüsse aus der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV). Davon beziehen sich ca. 350 auf Standorte an Fliessgewässern, der Rest sind Infrastrukturanlagen (z.B. Turbinen innerhalb von Trinkwasserversorgungen). Von den Standorten an Flüssen sind 190 bisher nicht genutzte Standorte, die übrigen sind Erweiterungen bestehender Anlagen. Viele Kantone sind mit der Bearbeitung der damit verbundenen wasserrechtlichen Anträge überfordert. Da infolge der verbesserten Vergütung für den eingespeisten Strom plötzlich auch Standorte wirtschaftlich attraktiv werden, an denen bisher niemand interessiert war, entsteht ein wesentlich stärkerer Druck auf die Fliessgewässer. Gleichzeitig gibt es immer mehr potenzielle Betreiber von Kleinwasserkraftanlagen, die sich für noch vorhandene Standorte interessieren. Aus Sicht der Regierung und im Hinblick auf die Erwartungen der zukünftigen Stromerzeugung aus Wasserkraft ist es wichtig, das tatsächlich nutzbare Wasserkraftpotenzial aus kleinen Wasserkraftwerken für die ganze Schweiz zu kennen. In diesem Zusammenhang setzen mehrere Forschungsprojekte an.

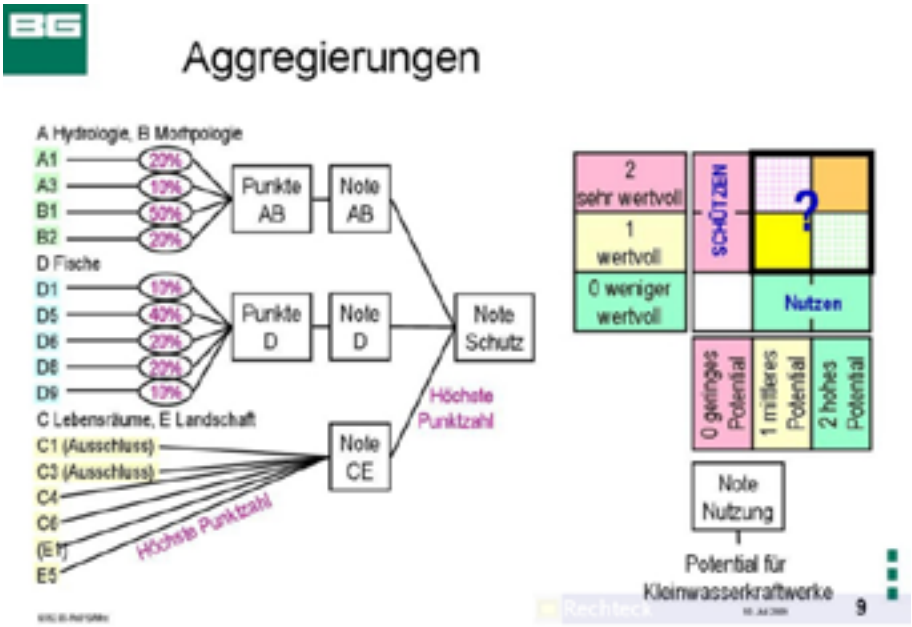
Seit 2008 läuft das Projekt *Erhebung des Kleinwasserkraftpotenzials der Schweiz – ganzheitliche Beurteilung des Wasserkraftpotenzials* [4], welches aus drei Teilprojekten besteht. Im ersten Teilprojekt werden auf Basis eines digitalen Geländemodells und hydrologischer Modellierung der mittleren Monatsabflüsse die technischen Wasserkraftpotenziale aller Fliessgewässer flächendeckend für die ganze Schweiz berechnet. Die grossen Flüsse werden dabei ausgespart, da hier die Potenziale im Einzelnen bekannt bzw. bereits genutzt sind. An diesem Projekt haben sich einige Kantone mit eigenen Beiträgen und Leistungen zusätzlich beteiligt und es wurden die ersten Ergebnisse erzielt. Die technischen Potenziale für Kleinwasserkraftwerke sind für die gesamte Schweiz berechnet: Sie liegen etwas unter 11 GW. Es ist jedoch zu betonen, dass hier bisher weder schon genutzte Potenziale noch Schutzaspekte (Naturschutzgebiete, Auen nationaler Bedeutung, Gewässerschutz), noch wirtschaftliche oder soziale Gesichtspunkte in irgendeiner Weise berücksichtigt wurden. Diese Arbeiten sind zurzeit im Gang, das Ergebnis des tatsächlich zusätzlich nutzbaren Potenzials wird sich demnach deutlich reduzieren.

Ein zweites Teilprojekt, welches am *Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB)* bearbeitet wird, beschäftigt sich mit verbesserten wissenschaftlichen Grundlagen für eine *Ganzheitliche Beurteilung des Kleinwasserkraftpotenzials* [5]. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Erfassungsmethodik, die sowohl die drei Dimensionen Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft, als auch Aspekte der regionalen Raumplanung gleichwertig integriert. Diese Ansätze sollen später in das numerische Modell der Standorte für Kleinwasserkraftanlagen integriert werden. Im Jahr 2009 wurde am Gesamtkonzept und der Einordnung desselben in die aktuellen energiepolitischen Diskussionen gearbeitet. Weitere Schwerpunkte bildeten die Beschaffung von Grundlagendaten sowie erste Anwendungen der Beurteilungsmethodik in der Pilotregion. Mit Erfolg wurde eine wissenschaftliche Begleitgruppe zusammengestellt.

Das *Netzwerk Wasser im Berggebiet* (NWB) ist mit dem dritten Teilprojekt *Leitbild zur ganzheitlichen Bestimmung von potenziellen Standorten von Kleinwasserkraftwerken* [6] zuständig für die Koordination mit den Bergkantonen. Deren Erfordernisse für den Umgang mit den zahlreichen Konzessionsgesuchen und eigenen Gewässernutzungs- und Schutzstrategien sollen in das Gesamtprojekt integriert werden. Das Ziel ist, den Bergkantonen ein Werkzeug in die Hand zu geben, mit dem sie selber in der Lage sind, die individuellen Schutz- und Nutzungsansprüche festzulegen. Da das Werkzeug in die Modelle zur Potenzialermittlung integriert ist, lassen sich damit anschliessend Wasserkraftpotenziale unter gesamtheitlichen Betrachtungsweisen flächendeckend herleiten.

Parallel zu den genannten Arbeiten suchen verschiedene Kantone nach Lösungen, wie sie die Ergebnisse hinsichtlich der Potenziale ihrer Gewässer in ihre eigene Wasserstrategie einbinden können, beziehungsweise welche Strategie dazu arbeitet werden sollte. Der Kanton Bern hat bereits seine Wassernutzungsstrategie 2010 der Öffentlichkeit als Entwurf vorgestellt [14]. Dieser basiert unter anderem auf den Ergebnissen eines bereits

abgeschlossenen Forschungsprojektes, welches 2009 aus diesem Programm gefördert wurde. Die Wasseragenda 21 war verantwortlich für das Projekt *Klassifizierung von Fliessgewässerstrecken* [7]. In diesem Projekt wurde ein Verfahren erarbeitet, um unterscheiden zu können, in welchen Gewässern zukünftig die Wasserkraftnutzung in kleinen Wasserkraftwerken prioritär ermöglicht werden soll, an welchen Gewässern dies nur unter sehr strengen Auflagen möglich ist, und wo Wasserkraftnutzung zukünftig überhaupt nicht erwünscht ist. Die Systematik beruht darauf, dass Gewässer in zwei Bereichen bewertet werden, einmal bezüglich ihres Wasserkraftpotenzials und zum anderen bezüglich ihrer Schutzwürdigkeit. Je nach Kombination der Ergebnisse soll dann eine Nutzung genehmigt werden, nur bedingt und unter erhöhten Auflagen genehmigt oder von vornherein abgelehnt werden.



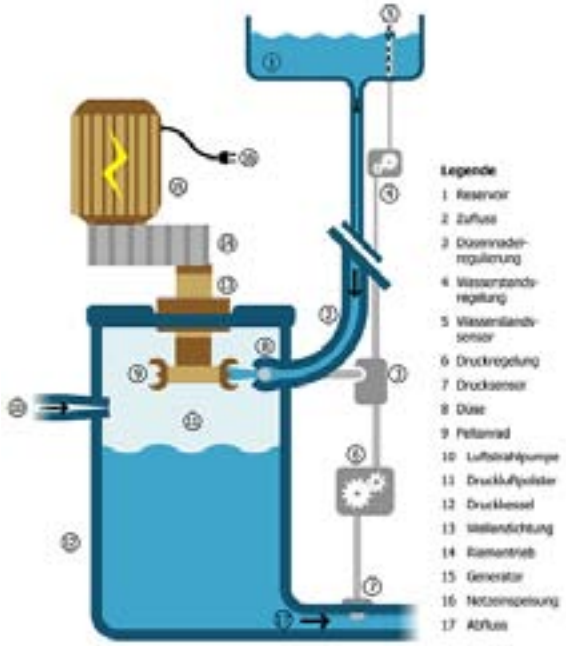
Figur 2: Gesamtbetrachtung der Schutz- und Nutzungsinteressen für die Entscheidungsfindung, wo Kleinwasserkraftwerke genehmigt werden sollen (Nutzen) und wo nicht (Schützen)

Im Projekt *Niederdruckanlagen* [8] der *Entegra Wasserkraft AG* werden unterschiedliche Technologien zur Nutzung von sehr niedrigen Fallhöhen, das heisst unter etwa 2 m, anhand der Theorie und an ausgeführten Fallbeispielen untersucht und bewertet. Es gibt in diesem Bereich einige Neuentwicklungen, mithilfe derer man diesen bisher weitgehend ungenutzten Bereich wirtschaftlich zu erschliessen hofft. Es gibt aber auch einige Entwicklungen, die immer wieder in den Medien auftauchen, und von ihren Erfindern propagiert werden, von denen es aber keinerlei verlässliche technische und finanzielle Daten gibt. In diesem Projekt werden insgesamt 9 Typen von hydraulischen Maschinen begutachtet und die technisch fundierten und finanziell tragbaren Konzepte herausgefiltert. Die technischen Eigenschaften, insbesondere die Fallhöhenausnutzung und die hydraulischen Wirkungsgrade und die spezifischen Kosten werden gezielt untersucht. Daraus abgeleitete Schlussfolgerungen und Empfehlungen für potenzielle Betreiber von Niederdruckanlagen werden anschliessend in geeigneter Weise publiziert. Im Jahr 2009 wurden die ersten Anlagen besucht und untersucht, diese Arbeiten werden 2010 fortgesetzt.

In Münster (VS) wird als Pilotanlage eine *Universalturbine* [12] in einer Trinkwasserversorgung eingesetzt. Die Universalturbine ist eine modular aufgebaute Peltonturbine für Wasserversorgungen. Das besondere daran ist, dass dabei nach der Turbinierung oft noch ein bestimmter Druck vorhanden sein muss, wie er für die Wasserversorgung notwendig ist. Die Turbine arbeitet also unter Gegendruck. Sie deckt den Leistungsbereich von 5,5 bis 55 kW ab und ist im Gegendruckbereich einsetzbar. Im Rahmen dieser Pilotanlage soll der Dauerbetriebsnachweis der Universalturbine für diesen Standort erbracht werden. Dort wird auch die Turbineninstallation visualisiert und die Möglichkeiten der Universalturbine dargestellt. Zusätzlich werden im Projektrahmen die Gegendruckregelung für verschiedene Betriebsbedingungen sowie die Erstellung und Erhaltung des Druckluftpolsters für den Gegendruckbetrieb entwickelt und untersucht. Die Versuchsturbine wurde 2009 mit einem neuem Durchflussregler und passender Leitvorrichtung ausgerüstet, erste Tests sind erfolgt.

Verschmutzungen (Geschwemmsel, Laub usw.), das sich an den Laufradschaufeln von Turbinen ablagert, führt zu einer Reduktion des Wirkungsgrads und damit zu verringerter Leistung der Turbine. Das Ziel des Projekts *Verschmutzung von*

Kleinwasserkraftwerken [9] ist, eine möglichst repräsentative Übersicht der Verschmutzungsthematik in der Schweiz zu erhalten und verschiedene Spülvarianten zur Reinigung der Turbinen zu analysieren und deren Effizienz zu vergleichen. Es zeigt sich, dass fast alle betrachteten Standorte von der Verschmutzung mehr oder weniger ausgeprägt betroffen sind. Die eingesetzten wasserbaulichen Massnahmen zur Verhinderung des Geschwemmseleintrags in die Turbine differieren jedoch stark, was einerseits altersbedingt (die Baujahre der aktuellen Ausführungen reichen von 1926 bis 2004) und andererseits mit Kosten verbunden ist. Ausserdem werden verschiedenste Varianten von Spülprogrammen eingesetzt, die von den Betreibern selbst entwickelt wurden, oder solche, die durch den Hersteller der Turbinen vorgegeben sind. Die Befragungen haben bei den Betreibern dazu geführt, die Funktionalität der eigenen Anlage bezüglich der Verschmutzungsproblematik zu hinterfragen. Das Projekt ist ein internationales Kooperationsprojekt zwischen der Hochschule Luzern, Technik und Architektur, und dem Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart, Deutschland.



Figur 3: Funktionsweise der Universalturbine

Speziell angepasste Turbinen mit maximal möglichen Wirkungsgraden werden bis heute hauptsächlich für grosse Wasserkraftanlagen hergestellt. Die Firma *MHyLab* entwickelt solche Turbinenkonzepte auch für kleine Anlagen, derzeit speziell eine *Diagonalturbine* [10] für Kleinwasserkraftwerke mit Fokus auf hoher Effizienz, Zuverlässigkeit und Simplizität. Das Projekt wird vom BFE, von den *Services Industriels de Genève (SIG)* und *Swisselectric Research* unterstützt und in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern erarbeitet. 2009 wurde das hydraulische Konzept entwickelt und das Profil des Laufrades validiert. Gleichzeitig wurden Modellversuche durchgeführt und das mechanische Konzept entwickelt. Ein Dossier zur Konstruktion ist realisiert und es wird zurzeit ein 8-flügliges Labormuster erstellt.

Am Voralpenfluss Glatt wurde 2006 das Laufkraftwerk Buchholz reaktiviert. Die gesetzlich verlangte Gewährleistung der freien Fischwanderung wurde – trotz einiger Bedenken – mit einer in der Schweiz neuartigen Fischschleuse sichergestellt. Die *Funktionskontrolle Fischschleuse KWKW Buchholz* [11] hat gezeigt, dass die Aufstiegseinrichtung für schwimmstarke Fische grundsätzlich funktioniert (qualitativer Nachweis der Funktionstüchtigkeit), eine quantitative Aussage aber nicht möglich ist aufgrund der Unklarheit bezüglich der Anzahl aufstiegswilliger Fische.

Die Programmleitung hat darüber hinaus eine Vielzahl von Anfragen beantwortet, und sich mit Ideen und verschiedensten Projektskizzen befasst. Entsprechend der verstärkten Fokussierung der Energiewirtschaft auf erneuerbare Energien und der aktuellen Entwicklungen im Wasserkraftsektor gab es auch entsprechend viele Ideen und «Erfindungen», wie man die vorhandenen Wasserkraftressourcen noch besser nutzen könnte. Leider bleiben dabei nüchterne technische Fakten und fundamentale physikalische Grundlagen oft zu Gunsten vollmundiger Ankündigungen und wilder Versprechungen auf der Strecke. Andere Projekte konnten nicht gefördert werden, weil sie zwar insgesamt für die Wasserkraftnutzung dienlich sein könnten, im spezifischen schweizerischen Markt jedoch keine breiten Anwendungsmöglichkeiten vorhanden sind.

Nationale Zusammenarbeit

Seit dem Start des Forschungsprogramms im Jahr 2008 wurde der Kontakt zu vielen Beteiligten aus dem Bereich der Wasserkraft in der Schweiz geknüpft, insbesondere um das Programm und seine Förderziele allgemein bekannt zu machen und auf die Fördermöglichkeiten hinzuweisen. Die Anzahl der Projekte, die inzwischen gefördert werden, stammt von einem breiten Spektrum von Antragstellern: Universitäten und Hochschulen, private Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, Verbände, Ingenieurunternehmen und Wasserkraftbetreiber sind beteiligt. Die Finanzierung der grösseren Vorhaben ist breit gestützt und erfolgt subsidiär.

Die Forschungsprojekte selbst sind innerhalb der Schweiz zum Teil gut vernetzt. So sind beispielsweise zwei der Projekte zu Speicherkraftwerken in das nationale Netz *HydroNet* [13] eingebunden, welches als übergeordnetes Ziel die Optimierung von Design und Betrieb von Pumpspeicherkraftwerken zum Ziel hat und auch von *Swisselectric Research* und dem *Competence Center for Energy and Mobility (CCEM)* finanziell unterstützt werden. Hier sind insgesamt sieben schweizerische Forschungseinrichtungen involviert.

Für einige der Forschungsprojekte wurden eigene Begleitgruppen eingerichtet. Diese haben zum einen zum Ziel, die Projekte selbst inhaltlich zu begleiten, zum anderen sollen sie auch dafür sorgen, dass die Arbeiten den Bedürfnissen nicht nur der Wasserkraftszene sondern auch den betroffenen Kantonen und Gemeinden nützen. Die Arbeit in diesen Begleitgruppen schafft daher einen erheblichen Mehrwert zusätzlich zu den eigentlichen Forschungsarbeiten im Projekt.

Die Programmleitung wirkt auch innerhalb der Schweiz als Vertreter des BFE in der BFE/BAFU-*Arbeitsgruppe Empfehlung zur Planung von Kleinwasserkraftwerken* mit. Eine enge Verbindung besteht zum *BFE-Förderprogramm Kleinwasserkraftwerke*, da dort viele Berührungspunkte bestehen zwischen den aktuellen Fördermechanismen aufgrund der KEV und dem aktuellen Forschungsbedarf. Eine enge Zusammenarbeit soll hier auch zukünftig sicherstellen, dass sich Forschungsarbeiten und Marktanforderungen entsprechen.

Internationale Zusammenarbeit

Aufgrund des Beschlusses der Ministerrunde der Alpenkonvention wurde 2009 die Plattform *Water Management in the Alps*, eine internationale Expertenrunde mit Mitgliedern aus den Alpenländern, beauftragt, einen Situationsüberblick über die Kleinwasserkraftnutzung in den Alpen zu arbeiten, Richtlinien und Handlungsempfehlungen für die weitere Nutzung zu erstellen und *Best Practice Examples* zu sammeln und zu dokumentieren. Die Programmleitung ist in diese Arbeit aktiv eingebunden. Die Erfahrungen aus dem Projekt *Kleinwasserkraftpotenziale* haben den Projektnehmern geholfen, sich in einem internationalen Konsortium erfolgreich für ein Projekt der Weltbank in Peru zu bewerben, wo ähnliche Arbeiten durchgeführt werden sollen.

Teilnahme an Tagungen

Am 28. und 29. April 2009 fand in Vancouver die *Small Hydro 2009* – eine Tagung mit begleitender Ausstellung – statt. Die *European Small Hydropower Association (ESHA)* war eine der Organisatoren. Interessant waren die Vergleiche zwischen den flächendeckenden GIS-basierten Potenzialuntersuchungen, wie sie in unterschiedlichen Ländern stattfinden (British Columbia, Mexiko) und wie daraus besonders geeignete Standort priorisiert werden können. Weiter wurden die unterschiedlichen Fördermechanismen und Rahmenbedingungen erörtert, mit denen private Investoren veranlasst werden, in den Bereich Kleinwasserkraft zu investieren. Es zeigt sich deutlich, dass sich überall dort, wo einige konkrete Bedingungen erfüllt sind, Investoren finden, die das vorhandene Potenzial erschliessen.

Vom 26. bis 28. Oktober 2009 fand in Lyon die *Hydro 2009* statt, eine internationale Konferenz und Ausstellung rund um das Thema Wasserkraft. Mit über 1700 Teilnehmern aus 94 Ländern ist die Hydro die weltweit wichtigste Wasserkraft-Veranstaltung. In den 27 Sessionen wurden die verschiedensten Aspekte der Wasserkraft präsentiert

und diskutiert, wie Finanzierung, Pumpspeichertechnologie, Abflussmessung, Systemoptimierung, Bautechnik usw. An der dazugehörigen Ausstellung präsentierten sich neben EDF auch Vertreter verschiedenster Produkte- und Dienstleistungsanbieter.

Das *Zwölfte Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke* (OTTI-Tagung) fand am 24./25. September 2009 in Bozen statt. Diese internationale Tagung wendet sich an Planer, Hersteller und Betreiber kleiner Wasserkraftanlagen. Unter anderem wurde auch das aus diesem Programm geförderte Projekt *Kleinwasserkraftpotenziale* vorgestellt.

Die Forschungsergebnisse aus den verschiedenen Projekten wurden auf mehreren nationalen und internationalen Tagungen und Workshops vorgestellt oder es wurden entsprechende Beiträge eingebracht.

Öffentlichkeitsarbeit

Die Programmleitung wurde immer wieder eingeladen, an verschiedenen Aktivitäten zum Thema Wasserkraft mitzuwirken oder daran teilzunehmen. So wurden im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit mehrere Vorträge an Veranstaltungen des *Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE)* gehalten, in denen über technische Grundlagen und Fördermöglichkeiten von Kleinwasserkraftwerken referiert wurde. Vertreter verschiedener Bergkantone haben bei der Programmleitung angefragt, ob und wie sie sich an dem bestehenden Forschungsprojekt zu den Kleinwasserkraftpotenzialen beteiligen könnten. An der Universität Bern wurde ein Seminar organisiert, welches interessierten Wissenschaftlern aus eher fachfremden Disziplinen einen Einblick in die Bautechnik, Funktionsweise und Finanzierung von Wasserkraftanlagen vermittelte.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Das Jahr 2009 war insgesamt sehr erfolgreich für das Forschungsprogramm *Wasserkraft*. Die wesentlichen Programmziele, das heisst die Etablierung qualitativ hochwertiger Forschungsprojekte, welche dem generellen Ziel dienen, das Wasserkraftpotenzial in der Schweiz besser auszunutzen, wurde erreicht. Die einzelnen Projekte decken ein breites Spektrum ab, wobei die Schwerpunkte bei den Programmbereichen *Bautechnik* und *Potenziale* liegen. Infolge der zum Teil mehrjährigen Laufzeit der Projekte, die in diesem Jahr begonnen haben, sind in den kommenden Jahren deutlich weniger Mittel frei zur Verfügung, welche für neue Projekte eingesetzt werden können. Bereits jetzt liegen weitere Projektanträge vor, die positiv beurteilt worden sind.

Welchen quantitativen Beitrag das Forschungsprogramm zur weiteren Erschliessung des schweizerischen Wasserkraftpotenzials beiträgt, ist nur schwer zu beurteilen. Allein die derzeit vorliegenden Anträge für Förderung aus der KEV beinhalten 34 MW Leistung oder 1'900 GWh pro Jahr aus Kleinwasserkraftwerken. Vergleicht man dies mit den ersten Ergebnissen der Potenzialstudie, so scheinen hier auch bei vorsichtigen Annahmen noch beträchtliche Potenziale vorhanden zu sein. Die Erweiterungsmöglichkeiten und Neubauoptionen bei Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken sind im Einzelfall bekannt und in der Planung oder in der Ausführung. Die Ergebnisse des Forschungsprogramms tragen hier insgesamt zu einer verbesserten technisch/wirtschaftlichen Situation bei; eine weitere quantitative Zuordnung ist nicht möglich.

Liste der F+E-Projekte

[1] F. Hachem, A. Schleiss (fadi.hachem@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch), EPFL: *Dimensionnement des galeries et puits blindés – Design of steel lined pressure tunnels and shafts* (JB Projekt 103095)

[2] M. Müller, A. Schleiss (michael.mueller@epfl.ch, anton.schleiss@epfl.ch), EPFL: *Méthodes d'observation et de prévision de l'alluvionnement des retenues des aménagements de pompage-turbinage – Sustainable sedimentation in pumped storage plants* (JB Projekt 103094)

[3] R. Boes, M. Pfister, G. Möller, (boes@vaw.baug.ethz.ch, pfister@vaw.baug.ethz.ch, moeller@vaw.baug.ethz.ch), ETHZ: Versuchsanstalt für Wasserbau der ETHZ, *Luft-eintragsrate in Drucksysteme von Wasserkraftanlagen infolge Einlaufwirbel* (JB Projekt 103191)

[4] U. Schröder, Y. Weidmann (u.schroeder@-watergisweb.ch), Watergisweb AG: *Erhebung des Klein-wasserkraftpotenzials der Schweiz: Ermittlung des hydro-elektrischen Potenzials für Kleinwasserkraftwerke* (JB Projekt 102835, Teil 1)

[5] R. Weingartner, C. Hemund (hemund@giub.unibe.ch, wein@giub.unibe.ch), Geographisches Institut der Universität Bern: *Erhebung des Kleinwasserkraftpoten-zials der Schweiz: Methodik zur ganzheitlichen Bestim-mung unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren* (JB Projekt 102835, Teil 2)

[6] D. Soldo (soldo@slf.ch), Netzwerk Wasser im Berggebiet: Erhebung des Kleinwasserkraftpotenzials der Schweiz: *Leitbild zur ganzheitlichen Bestimmung von potentiellen Standorten von Kleinwasserkraftwerken* (JB Projekt 102835, Teil 3)

[7] H. Wehse, O. Chaix (heiko.wehse@bg-21.com), im Auftrag der Wasseragenda 21: *Methodik zur Bewertung und Klassierung der Nutzungseignung von Fliessgewäs-serstrecken – Grundlagen für die räumliche Prioritäten-setzung bei der Wasserkraftnutzung und dem Schutz von Gewässern* (SB Projekt 103093)

[8] P. Eichenberger (peter.eichenberger@entegra.ch), En-tegra Wasserkraft AG: *Niederdruckanlagen* (JB Projekt 103180)

[9] A. Abgottspon, T. Staubli (andre.abgottspon@hslu.ch, thomas.staubli@hslu.ch), Hochschule Luzern: *Ver-schmutzung von Kleinwasserkraftanlagen* (JB Projekt 102390)

[10] V. Denis (info@mhylab.com), MHyLab: *Turbines dia-gonales 06: Programme de développement d'une turbine hydraulique diagonale destinée à équiper les petites cen-trales à moyenne chute* (25 à 100 m) (SB Projekt 101915)

[11] C. Ruhlé, I. Scherrer (christian.ruhle@bluewin.ch, ivo.scherrer@entegra.ch), Büro für Jagd- und Fische-reifragen und Entegra Wasserkraft AG: *Funktionskontrolle Fischschleuse KWKW Buchholz* (SB Projekt 102418)

Liste der P+D-Projekte

[12] B. Schindelholz, P. Kamber (patrick.kamber@revita.ch), Stiftung Revita: *Pilotanlage Münster (VS) – Universaltur-bine für Wasserversorgungen* (JB Projekt 102033)

Referenzen

[13] HydroNet: http://hydronet.epfl.ch

[14] Wassernutzungsstrategie 2010 (Entwurf), Kanton Bern: http://www.bve.be.ch/site/wassernutzungsstrategie.pdf

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Geothermie

Rudolf Minder

rudolf.minder@bluewin.ch

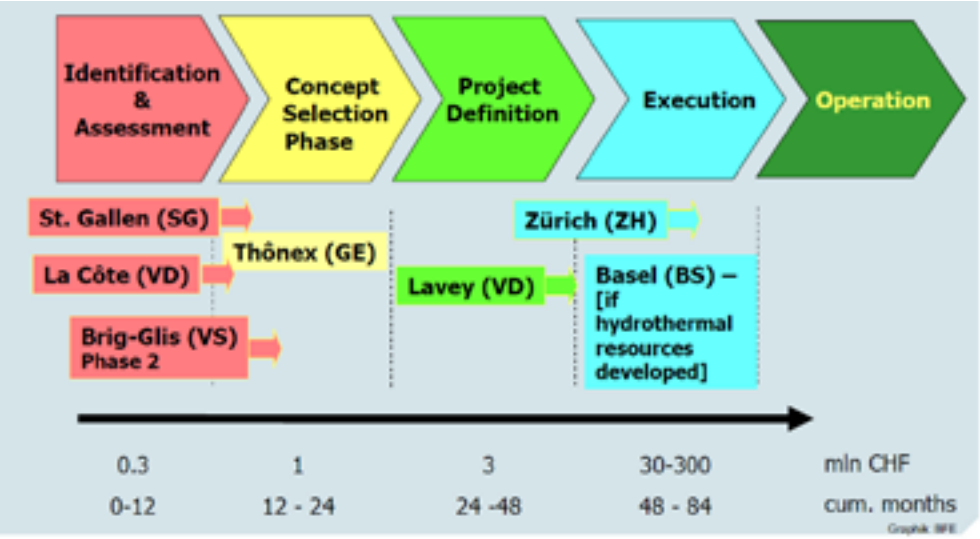
Tiefenbohrung Zürich-Triemli

Das Bild zeigt die Bohreinrichtung mit Schallschutzvorrichtungen der Tiefenbohrung Zürich-Triemli, die Ende 2009 begonnen wurde, mit dem Ziel genaue geologische und geophysikalische Bestimmungen am Stadt-Zürcher Untergrund vorzunehmen und so die Unkenntnis über das geothermische Potenzial zu mindern (Bild ewz Zürich).

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Die Schwerpunkte der Geothermieforschung lagen im Jahr 2009 wiederum in den Gebieten der tiefen Geothermie, einerseits bei der Nutzung der **hydrothermalen Quellen**, andererseits bei den **Enhanced oder Engineered Geothermal Systems (EGS).** Im Bereich der **untiefen Geothermie**, insbesondere bei den Erdwärmesonden(EWS)-Systemen beschränken sich die Forschungsarbeiten auf besondere, noch nicht am Markt etablierte Anwendungen.

Im Bereich der **untiefen Geothermie** weisen Erdwärmesonden-Systeme für Raumheizungen ein ungebrochenes Marktwachstum auf, die Entwicklung in diesem Bereich wird grösstenteils durch die in dieser Branche tätigen Unternehmen sichergestellt. In einigen Anwendungsgebieten ist jedoch Forschungsbedarf vorhanden, vor allem bei komplexen Systemen, tiefen EWS (>300 m Tiefe), Geo-Strukturen wie z.B. Energiepfähle, sowie unterstützenden Technologien.



Figur 1: Entwicklungsstand der Schweizer Projekte zur Nutzung hydrothermaler Quellen, welche auf Anfrage vom Bundesamt für Energie finanziell oder beratend begleitet werden

Für die Nutzung **tief liegender hydrothermaler Ressourcen** besteht Forschungsbedarf bei den geophysikalischen Methoden der Prospektion, mit dem Ziel, durch eine Reduktion des Fündigkeitsrisikos die wirtschaftliche Machbarkeit von Projekten zu verbessern. Dazu gehört auch die verbesserte Auswertung der beschränkt vorhandenen Daten aus alten Bohrungen und seismischen Untersuchung. Von grosser Bedeutung ist neben der eigentlichen Forschung die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen. Mit der Unterstützung mehrerer Projekte in geographisch und geologisch unterschiedlichen Regionen sollen – in Zusammenarbeit mit Kantonen, Gemeinden und der Privatwirtschaft – in den nächsten Jahren erste Projekte realisiert werden. Dabei handelt es sich um Projekte, die neben der Stromerzeugung auch Wärme für die Raumheizung produzieren sollen. Fig. 1 zeigt den Entwicklungsstand der verschiedenen Projekte.

Langfristig werden weiterhin weltweit grosse Hoffnungen auf die Technik der **Enhanced oder Engineered Geothermal Systems (EGS)** gesetzt. In Nord-Amerika und Australien erhält EGS immer grössere Forschungsressourcen und es werden vermehrt Pilot- und Demonstrationsprojekte mit entsprechenden Fortschritten durchgeführt. In der Schweiz haben die Erfahrungen bezüglich der induzierten Seismizität mit dem Projekt in Basel gezeigt, dass für die Entwicklung von tief liegenden Reservoiren noch wenig Erfahrung vorliegt, und dass in diesem Bereich noch grosse langfristige Forschungsanstrengungen notwendig sind. Zudem sind das öffentliche Verständnis und die Akzeptanz, und daher die Risikotoleranz besonders in dicht überbauten Agglomerationen der Schweiz beschränkt. Es ist unbestritten, dass das Potenzial dieser Technologie sehr gross ist. Aus diesem Grund wird der Forschung und der internationalen Zusammenarbeit auf diesem Gebiet eine hohe Priorität eingeräumt.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Untiefe Geothermie

Ein interessantes Thema bei der untiefen Geothermie sind die tiefen Erdwärmesonden (EWS), welche tiefer als ca. 300 m abgeteuft werden. In diesem Bereich gibt es bisher nur wenige Anlagen, auch sind vergleichsweise wenige Bohranlagen verfügbar. Im Allgemeinen werden deshalb bei grösserem Wärmebedarf mehrere weniger tiefe Sonden verlegt. Tiefe Sonden weisen jedoch einige Vorteile auf, die auf gute zukünftige Marktchancen schliessen lassen. Sie sind in dicht besiedelten Quartieren einsetzbar und arbeiten mit höheren Quellentemperaturen, was sich in einem besseren Wirkungsgrad der Wärmepumpe niederschlägt. Zudem können sie statt mit Wasser-Glykol-Mischungen mit reinem Wasser oder andern optimierten Fluiden arbeiten.

Ein Projekt befasst sich mit dem Einsatz tiefer EWS in Kombination mit hoch effizienten Wärmepumpen zur Beheizung grösserer Wohnbauten [1], bei einem weiteren Projekt wird eine 700 m tiefe Sonde messtechnisch untersucht [2]. Dabei wurde ein bei EWS sonst nicht relevantes Problem entdeckt: mineralische Ablagerungen an den Sondenwänden (Fig. 2).

Figur 2: Ablagerungen («Kalkplättchen») aus der Tiefensonde Oftringen (Quelle: Oliver Sachs, Eberhard & Partner AG)

Neben den EWS gehört auch die Nutzung des oberflächennahen Grundwassers zur untiefen Geothermie. In diesem Fachbereich wurde das früher mit Unterstützung des BFE entwickelte Computerprogramm «Groundwater Energy Designer» mit neuen Messdaten überprüft und angepasst [3]. Das sehr benutzerfreundliche Programm stösst sowohl bei Planern als auch bei den Bewilligungsbehörden auf grosses Interesse. Es hilft mit, bei Verfahren für die Bewilligung der energetischen Grundwassernutzung besser fundierte Grundlagen bereitzustellen.

Als unterstützende Technik im untiefen Bereich wurden die Entwicklung und die pilotmässige Erprobung eines kleinen und leichten Bohrgeräts erfolgreich abgeschlossen. Das Gerät (Fig. 3) kann an Orten eingesetzt werden, die sonst für EWS-Bohranlagen nicht zugänglich sind [27].

Figur 3: Das Bohrgerät Terradrill kann bei engen Platzverhältnissen eingesetzt werden. (Quelle: Terra AG)

Tiefe Geothermie

AGEPP – Alpine Geothermal Power Plant

Le projet AGEPP [9] est situé sur un des sites les mieux connus en Suisse du point géothermique. AGEPP a pour objectif la production d'électricité et la valorisation de la chaleur. Il s'agit d'un projet inter-cantonal (Vaud–Valais) bénéficiant d'un fort soutien de la part des deux cantons ainsi que des communes voisines. Le projet bénéficie d'un site exceptionnel du point de vue de la géothermie en Suisse, en effet les 2 puits existants ont prouvé une température d'eau anormalement élevée (67 °C) par rapport à la profondeur de captage (<600 m). Les analyses chimiques prouvent qu'il

est possible de trouver de l'eau à une température comprise entre 100 et 120 °C.

Le projet bénéficie d'un actionnariat public / privé très représentatif de la région. On citera les sociétés électriques régionales comme les *Services Industriels de Lausanne* et la *Romande Energie*. AGEPP innove par le couplage de la biomasse à la géothermie pour la production d'électricité. Le projet a été accepté par *Swissgrid* et a été enregistré en novembre 2009. En plus, les Bains de Lavey auront une sécurité d'approvisionnement en eau chaude grâce à ce 3ème forage.

Brigerbad

Entlang dem untiefen Füllmaterial des Rhonetals treten parallel dazu am steil einfallenden Störungskontakt des nordliegenden Kristallins mit den südliegenden Sedimenten heisse Quellen auf. Ähnlich dem Standort Lavey-les-Bains (VD) werden in Brigerbad (VS) Temperaturen der sehr tiefen Quellen von ~110 °C vermutet, welche zur Wärme- und Stromproduktion genutzt werden könnten.

Brigerbad ist neben Lavey-les-Bains der bis anhin vielversprechendste potenzielle Standort im Rhonetal für ein derartiges Energieprojekt, insbesondere weil in der Nähe auch Wärmeabnehmer verfügbar sind (Brig-Glis und Naters). Jedoch gibt es bisher nur Erkundungsbohrungen bis 150 m Tiefe, deren Temperatur von der Mischung des heissen, tiefen Thermalwassers mit meteorischen, oberflächennahen Wässern bestimmt ist.

Zurzeit wird mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energie eine gekernte Bohrung bis 300 m Tiefe für die Thermalwassergewinnung des Brigerbads erstellt. Vorgesehen ist, anschliessend eine zweite gekernte Bohrung bis ca. 600 m abzuteufen. Gleichzeitig mit diesen Bohrungen, welche dem Thermalbad dienlich sind, müssen zusätzliche Untersuchungen gemacht werden, um möglichst viele Informationen für die beabsichtigte Geothermiebohrung bis 3000 m Tiefe zu erhalten.

Géothermie profonde sur la Côte lémanique (VD)

L'étude préliminaire réalisée entre 2008 et 2009, sur la base d'une compilation scientifique des données géologiques existantes, a permis de confirmer le potentiel de géothermie de la région de la Côte [11]. Deux failles géologiques, le décrochement de St-Cergue-Nyon et le décrochement de Vallorbe-Pontarlier passant sur le territoire d'Aubonne-Etoy, ont été mises en évidence. A proximité de ces deux failles, cinq sites favorables à l'exploitation géothermique ont été identifiés avec la possibilité de répondre aux besoins énergétiques des zones en forte expansion d'Aubonne, d'Etoy, de Gland et de Nyon.

Winterhur

Die primäre Zielsetzung des Projektes *Tiefe Geothermie* des Stadtwerks Winterthur ist eine Abschätzung der vorhandenen geothermischen Ressourcen im Stadtgebiet und im Umland der Stadt Winterthur zu erhalten. Neben diesem zentralen Bearbeitungspunkt werden weitere Fragestellungen behandelt, wie

- Abklärung der geothermischen Nutzungsmöglichkeiten;
- Erarbeitung der Grundlagen von geophysikalischer Prospektion im Untersuchungsgebiet;
- Abklärung der Einbindung des bestehenden Fernwärmesystems in eine geothermische Nutzung;
- Erstellung eines groben Zeit- und Kostenplans zur Projektentwicklung.

Das Projekt konzentriert sich auf die Quantifizierung der Möglichkeiten von Tiefengeothermie im grossräumigen Bereich des Stadtgebietes Winterthur. Dabei wurden in einem ersten Bearbeitungsschritt die bestehenden Literaturangaben herangezogen und auf Aktualität sowie Konsistenz überprüft. Zusätzlich sollen verbesserte Prognosemodelle erarbeitet werden. Hierzu erfolgt eine Integration aller Daten und auf deren Basis eine Neuberechnung der geothermischen Produktivitäten in ausgewählten Aquiferen durchgeführt werden kann.

Thônex

Valorisation du forage géothermique de Thônex 1 – étude d'opportunité [12]: Le forage de Thônex 1 a été réalisé en 1993 avec le but de trouver de l'eau chaude utilisable pour des buts énergétiques. Le forage arrivait jusqu'à une profondeur de 2690 m mais n'avait jamais produit un débit suffisant pour l'utilisation. Il avait donc été abandonné. Des études sur l'utilisation du forage comme sonde géothermique profonde ont montré qu'au maximum une production de chaleur de 900 MWh/an pourrait être atteinte. Le projet de restauration du

forage de Thônex a des buts scientifiques ainsi que des buts de démonstration. Sur le plan scientifique, le projet permets d'étudier l'état du forage, en particulier les déformations méca-niques et les quantités et propriétés des dépôts minéraux. Ces informations seront utiles pour d'autres projets de géothermie profonde en Suisse. En plus, le projet permet d'installer une station d'enregistrement sismique pour mieux caractériser la zone genevoise dans le but d'engranger des connaissances permettant de préparer des forages plus profonds de type EGS. Sur le plan de démonstration, le projet permettra d'évaluer les possibilités de valoriser, au moins partiellement, un forage «sec».

Figure 4: Restauration du forage de Thônex en vue d'une production d'énergie thermique [12]

Modelling stimulation in geothermal wells

Circulating hot water in the crust inevitably leads to dissolution, transport and re-deposition of minerals. In the case of heat extraction projects, the pores and the fractures in the water-bearing rocks may become clogged by mineral deposition, eventually blocking flow. This can limit the productive lifetime of an engineered or enhanced geothermal system, even though heat may still be available at depth. Current research into water–rock interaction in geothermal reservoirs is directed at ways to enhance energy production and to avoid clogging of the rock openings. Such injectivity and productivity variations result from a complex interplay of mechanical, hydraulic, thermal and chemical processes. The degree of clogging and scale formation depends on the type of reservoir rocks and how they respond chemically to the injected fluids, as well as on reservoir and surface properties. Numerical simulation of fluid flow with coupled chemical reaction modelling is a powerful tool and subject to active development at the CREGE to quantitatively understand the interplay of these effects during reservoir exploitation and to optimize the operation of a geothermal field.

Figure 5: Modelling stimulation geothermal wells [13] (FracChem – LaGeo)

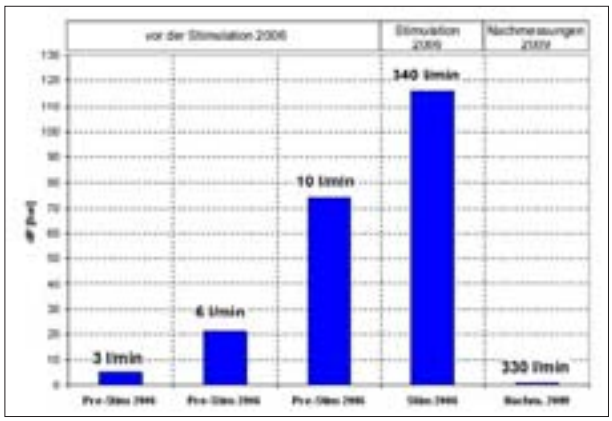
Enhanced Geothermal Systems (EGS)

Projekt Deep Heat Mining Basel

Risikoanalyse zum seismischen Risiko des Projekts Deep Heat Mining Basel [14]: Der Auftrag hat zum Zweck, die besten verfügbaren wissenschaftlichen Entscheidungsgrundlagen zur Beurteilung der Tragbarkeit des Risikos des Projekts *Deep Heat Mining* für Basel und die trinationale Region in Form einer Risikoanalyse bereitzustellen und auszuwerten

Die Risikoanalyse sagt voraus, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit sowohl bei der Fertigstellung (Ausbau durch hydraulische Stimulation) als auch beim Betrieb des Geothermieprojektes *Deep Heat Mining Basel* weitere Erdbeben zu erwarten sind. Diese Beben können die Grössenordnung der Erschütterungen von Ende 2006 / Anfang 2007 erreichen oder sogar überschreiten. Anhand von ver-

einfachenden dynamischen Modellen des Untergrundes, müsste wegen der hohen Besiedlungsdichte am Standort Basel als Folge der Beben während der Ausbauphase mit Sachschäden an Gebäuden in der Grössenordnung von CHF 40 Mio. gerechnet werden, gefolgt von jährlichen Schäden während der Betriebsphase von CHF 6 Mio. Die Gefahr, dass das Projekt natürliche, grosse Erdbeben auslösen könnte, wird als sehr gering betrachtet. Aufgrund der Resultate der Risikoanalyse hat die Regierung des Kantons Basel-Stadt beschlossen, dass das Projekt *Deep Heat Mining Basel* in der beabsichtigten Form nicht weitergeführt werden kann.



Figur 6: Nachmessungen Geothermiebohrung Basel 1 (Projekt DHM): Entwicklung der Injektivität Basel 1 vor, während und nach der Stimulation [Quelle: Geothermal Explorers Ltd.]

Nachmessungen

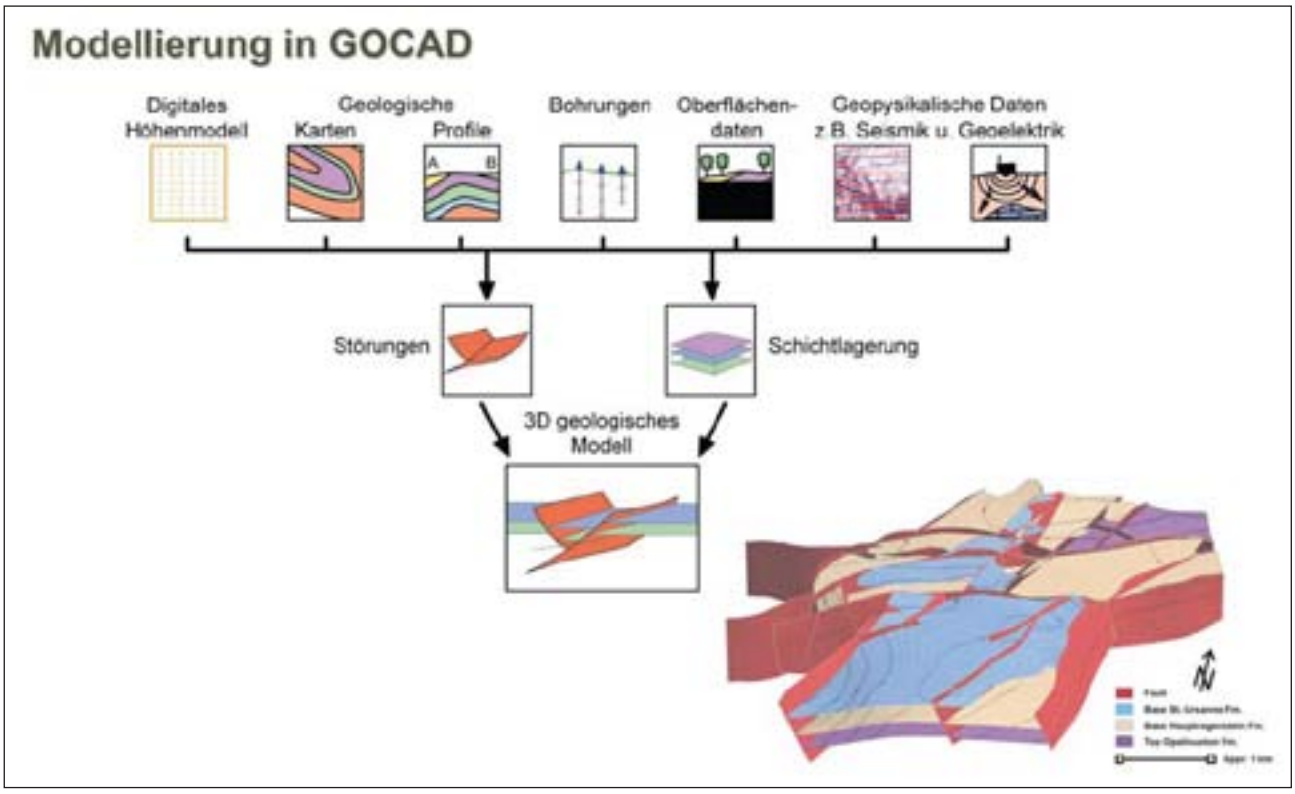
Zwar wurde bereits die abschlägige Entscheidung über die Projektfortführung beschlossen, aber es ist erinnernswert, dass keinerlei Daten über den technischen Erfolg oder Misserfolg der ersten Stimulation im Dezember 2006 in der Geothermiebohrung Basel 1 existieren. Es konnten deshalb keine gesicherten Angaben über die ungestörte Reservoirtemperatur in 5000 m Tiefe und übewr die stimulierte Reservoirdurchlässigkeiten gemacht werden. Mit der Durchführung der ersten Nachmessungen, die eine Temperaturmessung und hydraulische Bohrlochversuche vorsehen, konnte diese Wissenslücke etwas geschlossen werden. Die Nachmessungen wurden mit strengen Auflagen und unter der Bedingung einer minimalen Pertubation des Bohrlochs erlaubt. Wichtige Resultate der Nachmessungen sind:

- Die maximal gemessene Temperatur bei 4600 m Tiefe betrug 173,7 °C. Auf Endtiefe von 5000 m erwarten wir eine Temperatur von 185 °C.
- Die gemessenen Werte für die effektive Gebirgstransmissibililtät und die effektive Gebirgspermeabilität zeigen dass die Stimulation im Jahre 2006 eine Erhöhung der Reservoirdurchlässigkeit um das 330 bis 1000-fache bewirkte.

Dies zeigt, dass die Stimulation diesbezüglich als ausserordentlicher Erfolg gewertet werden kann.

3D-Reservoirmodell Region Basel

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines statischen, geologischen 3D-Modells der Region Basel als Werkzeug für Tiefenreservoirbewirtschaftung und Raumplanung. Soweit vorhanden werden verfügbare erdwissenschaftliche Beobachtungen und Messungen verwendet, um eine adäquate Entscheidungsgrundlage für die Bewirtschaftung und Nutzung zu schaffen, und die Unwägbarkeiten im Untergrund auf ein praktikables Mass zu reduzieren. In der Vorbereitung von geothermischen Projekten könnte das Reservoirmodell sein Einsatzgebiet als Planungsinstrument, insbesondere im Hinblick auf die Evaluierung geothermischer Verfahren (EGS, Doublettennutzung Heisswasser führender Aquifere u.a.), sein. Es sollen sowohl Reservoireigenschaften, dynamisches Verhalten des Reservoirs und des Untergrunds, das geothermische Potenzial als auch etwaige Risiken aus dem Modell ableitbar sein. Das Modell stellt ein Werkzeug dar, das ständig aktualisierbar und erweiterbar sein soll.



Figur 7: 3D-Reservoirmodell Region Basel: Methodik der Modellierung [17]

Nationale Zusammenarbeit

Im Berichtsjahr wurde mit den folgenden Schweizer Institutionen eng zusammengearbeitet:

- **Universitäten und Fachhochschulen:** ETHZ (Departemente Maschinenbau und Verfahrenstechnik und Erdwissenschaften), Hochschule Wädenswil, Université de Neuchâtel, Centre de recherche en géothermie, CREGE, EPFL (Département de génie civil, Institut des sols, roches et fondations), Université de Genève (Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie), Scuola universitaria della Svizzera italiana SUPSI (Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito), Haute école spécialisée de Suisse occidentale, Sion, und Hochschule für Technik und Informatik Burgdorf.
- **Stromindustrie und Wärmeversorgung:** BKW Energie AG, Bern, Aare-Tessin AG für Elektrizität (ATEL), Elektra Baselland, Industrielle Werke Basel, Geopower Basel AG, Services Industriels de Genève, Services industriels de Lausanne, Canton de Vaud: service de l'environnement et de l'énergie, Technische Betriebe St Gallen, Verband Fernwärme Schweiz (VFS).
- **Bundesämter, Agenturen und Fachverbände:** Agentur für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (AEE, APES), Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES), BAFU, Geothermie.ch, SBF, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), energiecluster, u.a.
- **Energiefachstellen der Kantone.**

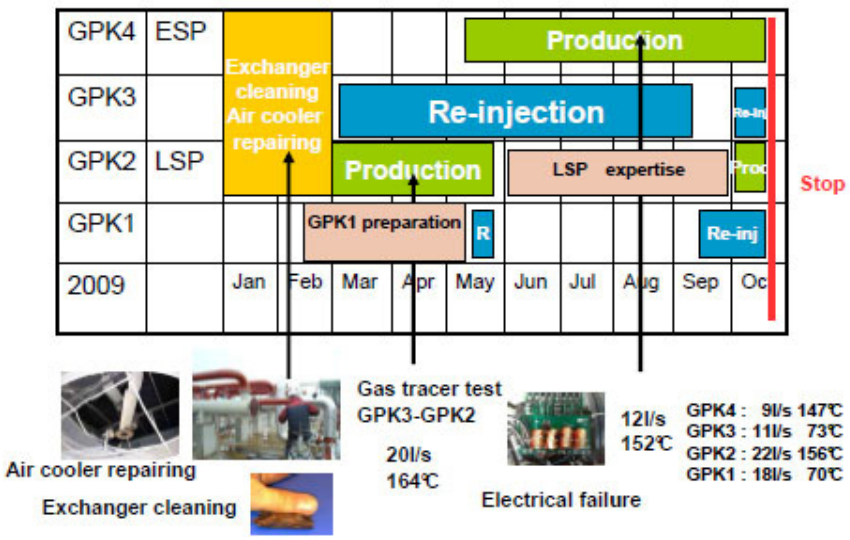
Internationale Zusammenarbeit

Geothermal Implementing Agreement (GIA) der IEA

Mit der Teilnahme im *Geothermal Implementing Agreement* (GIA) der IEA [16] kann die Schweiz regelmässigen Kontakt mit führenden Geothermie-Ländern pflegen, was den Weg zu sonst schwer zugänglichen Informationen öffnet. Zugleich lassen sich Schweizer F&E-Resultate international positionieren und durch die Kanäle der IEA verbreiten. Die Schweiz wird im Executive Committee durch das BFE (G. Siddiqi) und einen Vertreter aus dem Beratungsbereich (Prof. L. Rybach, Vice Chairman des Executive Committee) vertreten.

EGS Soultz- sous- Forêts (F)

At Soultz-sous-Forêts, the EGS reservoir has been circulated with power generation in a test phase, with only one production well (GPK2 in fig. 8) fitted with a long shaft pump at a depth of 350 m [17]. A problem with the chemistry of the lubricating water for the long shaft caused a shaft rupture at the shaft's upper end. A de-ionizing system of the lubricating water has been set up to solve this problem. A further mechanical problem was experienced with an air condenser module, resulting in vibrations and damage – also repaired. The electric downhole production pump in GPK4 was also installed and tested at 500m depth. An equipment is available for long-term monitoring of corrosion/scaling processes on coupons of various steel compositions, as used in the wells and in the surface loop. Then, the system has been circulated without power generation, with two producer wells (GPK2 and GPK4) and two injection wells (GPK1 and GPK3). Furthermore, regular sampling of circulating water has been initiated and micro-seismic monitoring continues.



Figur 8: Übersicht der Aktivitäten beim EGS-Pilotprojekt Soultz-sous-Forêts (F); GPKx: wells.

The main activities performed on site during the year are shown in the schema below, which is taken from a presentation of Dr. Albert Genter (EEIG) given at the 1st Swiss-French Geothermal Workshop held at Neuchâtel on 10–11 November 2009.

Weitere internationale Kontakte

Mit verschiedenen weiteren internationalen Institutionen fanden im Berichtsjahr Kontakte statt, u.a. mit *ENGINE* (Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe), *I-GET* (Integrated Geophysical Exploration Technologies), *EGEC* (European Geothermal Energy Council), *IGA* (International Geothermal Association), *BRGM* (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), GTV (Geothermische Vereinigung e.V. – Bundesverband Geothermie, Deutschland), LaGeo (El Salvador).

Pilot- und Demonstrationsprojekte

– [26] [B. Sigg, (info@doldergrand.ch), Dolder Grand Hotel, Zürich: Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich (JB, 100'878)

– [27] D. Jenne, (terra.dj@bluewin.ch), Terra AG, Brittnau: Entwicklung eines Vertikal-Bohrgeräts (SB, 102'304)

- [28] A. Bass (albert.bass@bassalbert), Geothermie Brigerbad AG, 3900 Brig: Pilotprojekt Geothermie Brig-Glis (SB, 102'505; JB, 103'424)
- [29] P. Vallat (patrick.vallat@bluewin.ch), IFWE, Lausanne: Géothermie profonde sur la côte lémanique (phase B) (JB, 103258)
- [30] J. Hoffmann (joerg.hoffmann@ewz.ch), ewz, Zürich: Geothermiebohrung *Zürich Sonnengarten* (JB, 103'268)
- [31] Ph. Rudolf von Rohr (vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch), ETH Zürich: Pilotanlage zur Entwicklung von Tiefenbohr-Verfahren mittels hydrothermaler Flamme (JB, 102'981)

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die geothermische Forschung stand auch 2009 im Zeichen der Kontinuität gemäss dem laufenden Energieforschungskonzept. Bei der **untiefen Geothermie** wurden einerseits Projekte unterstützt, die sich mit Qualitätssicherung und langfristigen Erfahrungen befassen, und andererseits Projekte, die Erlaubnis- und Vollzugsstellen eine systematische und standardisierte Analyse von Erdwärmesonden erlauben sollen. Ein mehrjähriges Projekt wurde mit der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften lanciert, welche unter anderem mittels Labormessungen und Feldversuchen eine Optimierung der Erdsondenfluide zum Ziel hat. Eine Testanlage wird für Heat-pipe-Sonden errichtet, um neue oder unterschiedliche Fluide zu erproben und um für Heat-pipe-Sonden optimierte Wärmepumpen, z.B. in Split-Bauweise zu testen.

Zudem bleibt insbesondere bei grösseren, gut isolierten Gebäuden bleibt die (passive) Kühlung von grossem Interesse.

Bei den **tiefen hydrothermalen Ressourcen** lag im Jahr 2009 der Fokus auf der Unterstützung von Machbarkeits- und Identifikationsstudien, um dereinst möglichst vielen Projekten den Schritt zu den nächsten Phase der Projektevaluation und der Selektion von planbaren Konzepten zu ermöglichen. Zum einen sind Projekte der aus geologischer Sicht Hauptkonzepte der Schweiz (Molassebecken, Oberrheingraben und Rhonetal) vertreten, zum anderen haben Projekte sehr unterschiedliche wirtschaftliche, kommerzielle, organisatorische und politische Aspekte, welche die breite Diversität der schweizerischen geothermischen Landschaft widerspiegeln.

Auch wenn Projekte viele Gemeinsamkeiten und ähnliche Arbeitsprogramme (in der Hauptsache Bohrprogramme) planen, gibt es nur eine sehr geringe Bereitschaft der Projektträger, wirtschaftliche Risiken zu teilen und gemeinsam einen Lernpfad hinsichtlich der Abteufung und Standardisierung von Geothermiebohrungen vorzunehmen. Der Entwicklung wird durch die wirtschaftliche Landschaft bestimmt, welche von einem starken Fokus auf lokale Ansätze, Lösungen, und Akteure charakterisiert wird. Weiterhin wird das BFE daran arbeiten, den Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren in diesem Bereich zu unterstützen.

Bei der **tiefen Geothermie bzw. den «Enhanced oder Engineered Geothermal Systems» (EGS)** stellt das europäische Forschungsprojekt in Soultz-sous-Fôrets einen Forschungsschwerpunkt dar. Die erfolgreiche Kurztestphase der ORC-Kraftwerksanlage war dabei ein wichtiges Etappenziel. Die Begleitung des Betriebs und die Auswertung der gesammelten Daten und Erfahrungen stehen im Zentrum der schweizerischen Beteiligung an diesem Projekt, wobei zum einen mit dem Betrieb der Kraftwerksanlage und zum anderen verschiedene Betriebsweisen der je zwei Produktions- und zwei Injektionsbohrungen mögliche Nutzungskonzepte getestet werden sollen. Um aus den bisherigen umfangreichen Investitionen möglichst grossen Nutzen zu ziehen, werden Messungen an Tiefbohrungen durchgeführt. Ermutigend ist die Tatsache, dass die Erfahrung der im Projekt Basel involvierten Spezialisten bei ähnlichen Projekten im Ausland sehr gefragt ist.

Für das Jahr 2010 (und folgende) sind bei der Ausrichtung des Forschungsprogramms keine grundsätzlichen Änderungen geplant. Die Jahre bis 2013 werden durch zunehmenden Spardruck und Budgetkürzungen charakteristisiert, was keine Neuausrichtung zulassen wird. Der Forschungsaufwand im untiefen Bereich wird weiterhin relativ zu den Bereichen «Tiefe oder hydrothermale Geothermie» und «EGS» vermindert und wird sich auf

komplexe Systeme (z.B. EWS-Grossanlagen) konzentrieren. Wichtig ist, dass die Anstrengungen im Gebiet der hydrothermalen Ressourcen mit verstärkter Intensität weitergeführt werden können, um mittelfristig das Fündigkeitsrisiko zu senken und den Nachweis der technischen Machbarkeit erbringen zu können. Im Bereich der «EGS» wird neben dem fortgesetzten Engagement an den EGS Projekten in Soultz und Basel sowohl an grundlegenden Problemen der hydraulischen Stimulation (e.g. induzierte Seismizität) als auch an Bohrtechnologien gearbeitet werden. Dabei ist neben der Forschungsunterstützung auch die Kontinuität bei der Förderung von Pilotanlagen unabdingbar.

Liste der F+E-Projekte

JB) Jahresbericht 2009 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden

Dokumente sowie weitere Informationen auf www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer.

Untiefe Geothermie

[1] 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, 101'295)

[2] E. Rohner, (rohner@geowatt.ch), Geowatt AG, Zürich: *Erfahrungsbericht Heizen/Kühlen mit Erdwärmekörben* (JB, 102'141)

[3] J. Poppei, (POJ@colenco.ch) ARGE TRT c/o Colenco Power Engineering AG, 5405 Baden-Dättwil: *Innovative Improvements of Thermal Response Tests: Assessment and Validation of hydraulic testing methods* (SB, 101'680)

[4] M. Eberhard (eberhard@eberhard-partner.ch) Effizienz- und thermische Behaglichkeitsermittlung einer über den Fussboden wirkenden erdgekoppelten Heiz- und Kühlanlage in Aarau (JB, 102'461)

[5] M. Hubbuch (hubb@zhaw.ch), ZHAW, Wädenswil: *Optimierung von Erdwärmesonden* (JB, 103'353)

[6] M. Eberhard J. Poppei (joachim.poppei@colenco.ch), AF_Colenco AG, Baden: *Grundlagedatenüberprüfung und Anpassungen des Groundwater Energy Designer Programms mittels realisierter Anlagen* (JB, 102'885) http://www.colenco.ch/deu/depts/ge/ged_order.html

[7] J. Poppei, (POJ@colenco.ch) c/o Colenco Power Engineering AG, 5405 Baden-Dättwil: *Validierung GED* (JB, 102'885)

[8] F. Rognon (fabrice.rognon@planair.ch), Planair SA, 2314 La Sagne: *Utilisation de géothermie profonde pour le chauffage de grands bâtiments avec des pompes à chaleur à très haute performance* (JB, 103'356)

[9] S. Imhasly, (imhasly@geowatt.ch), Geowatt AG, Zürich: *Langzeiterfahrungen mit Erdwärmsonden-Systemen in der Schweiz* (JB, 103'022)

[10] O. Sachs (sachs@eberhard-partner.ch), *Temperaturen und Wärmeförderung der Tiefensonde in Oftringen* (JB, 103'354)

Hydrothermale Geothermie

[11] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), CREGE, Neuchâtel: *Implementation of BDFGeotherm database (Geothermal fluids in Switzerland) on Google Earth* (SB, 101'842) www.crege.ch/BDFGeotherm

[12] G. Bianchetti, (bianchetti@alpgeo.ch), ALPGEO SARL, Sierre: *Projet de géothermie profonde à Lavey-les-bains, étude de faisabilité* (SB, 102'130)

[13] M. Huwiler (Marco.Huwiler@stadt.sg.ch), Stadt St. Gallen, *Machbarkeitsstudie Tiefen-Geothermie Stadt St.Gallen* (SB, 102'635)

[14] D. Sidler (damien.sidler@sig-ge.ch) SIG, Genève: *Valorisation du forage géothermique à Thonex* (SB, 102'779)

[15] P. Vallat (patrick.vallat@bluewin.ch), IFWE, Lausanne: *Géothermie profonde sur la côte lémanique (phase A)* (SB, 102'845)

[16] U. Keiser (u.keiser@hanserconsulting.ch), BHP Hanser und Partner AG, 8021 Zürich: *Betriebs- und Trägerschaftskonzept für eine Explorationsgesellschaft der tiefen Geothermie* (SB, 102'924)

[17] P. Huggenberger (peter.huggenberger@unibas.ch) Universität Basel: *3D-Reservoirmodell Region Basel* (JB 102'928)

[18] E. Schill (eva.schill@unine.ch) Universität Neuchâtel: *Charakterisierung des geothermischen Reservoirs Riehen: 3D Struktur und Tracer-Test* (JB, 103'183)

[19] B. Schüpbach (beat.schuepbach@win.ch), Stadt Winterthur: *Tiefe Geothermie Winterthur* (JB, 103'355)

EGS

[20] F.-D. Vuataz, (francois.vuataz@unine.ch), CREGE, Neuchâtel: *Modelling stimulation geothermal wells (FracChem - LaGeo)* (102'888)

[21] J. Hofer (juerg.hofer@bs.ch), Amt für Umwelt und Energie, Stadt Basel: *Durchführung einer Risikoanalyse zum seismischen Risiko des Projekts Deep Heat Mining Basel* (SB, 102'869)

[22] K. Evans (keith.evans@erdw.ethz.ch) ETH Zürich, Geotherm: *Geothermal Reservoir Processes: Research towards the creation and sustainable use of Enhanced Geothermal Systems* (JB, 103'247)

[23] F. Ladner (florentin.ladner@geothermal.ch), Geothermal Explorers, Pratteln: *Nachmessungen Geothermiebohrung Basel 1* (JB, 102'676)

[24] Th. Mégel, (megel@geowatt.ch), Geowatt AG, Zürich: *Teilnahme am Geothermal Implementing Agreement der IEA, Fortsetzung* 2009) (SB, 41'661)

[25] 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, France* (JB, 102'187).

Liste der P+D-Projekte

[26] [B. Sigg, (info@doldergrand.ch), Dolder Grand Hotel, Zürich: *Erfolgskontrolle und Planungsinstrumente für EWS-Feld Hotel Dolder Zürich* (JB, 100'878)

[27] D. Jenne, (terra.dj@bluewin.ch), Terra AG, Brittnau: *Entwicklung eines Vertikal-Bohrgeräts* (SB, 102'304)

[28] Bass (albert.bass@bassalbert), Geothermie Brigerbad AG, 3900 Brig: *Pilotprojekt Geothermie Brig-Glis* (SB, 102'505; JB, 103'424)

[29] P. Vallat (patrick.vallat@bluewin.ch), IFWE, Lausanne: *Géothermie profonde sur la côte lémanique (phase B)* (JB, 103258)

[30] J. Hoffmann (joerg.hoffmann@ewz.ch), ewz, Zürich: *Geothermiebohrung Zürich - Sonnengarten* (JB, 103'268)

[31] Ph. Rudolf von Rohr (vonrohr@ipe.mavt.ethz.ch), ETH Zürich: *Pilotanlage zur Entwicklung von Tiefenbohr-Verfahren mittels hydrothermaler Flamme* (JB, 102'981)

Referenzen

[32] International Energy Agency, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Geothermal Energy Research and Technology (http://www.iea-gia.org/)

[33] Fridleifsson et al., The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change, (February 2008), http://www.iea-gia.org/documents/FridleifssonetalIPCCGeothermalpaper2008FinalRybach20May08_000.pdf

[34] G. Siddiqi et al.,15 Years of Direct Use – District Heating Riehen, Canton Basle-City, NW Switzerland IEA Sustainability Workshop, Taupo (New Zealand) 10 Nov 2008

[35] Stefan Baisch et al., Deep Heat Mining Basel – Seismische Risikoanalyse, Amt für Umwelt und Energie des Kantons Basel-Stadt, 30. November 2009, http://www.wsu.bs.ch/geothermie

[36] G. Siddiqi und R. Minder, Geothermie – Stand und Herausforderungen für die nachhaltige Entwicklung, FORUM GEOÖKOL. 20 (1), 2009

[37] International Partnership for Geothermal Technology, http://internationalgeothermal.org

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Windenergie

Robert Horbaty

robert.horbaty@enco-ag.ch

2-MW-Windkraftanlagen in St.Brais

P+D-Projekt zur Ermittlung der Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen (Foto ADEV)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Weltweit hat sich die installierte Leistung von Windenergieanlagen zwischen 1998 und Ende 2008 von 10'200 MW auf 121'188 MW mehr als verzehnfacht[i]. Diese Anlagen liefern ca. 200 TWh Elektrizität und reduzieren so die CO_2-Emissionen um jährlich über 150 Mio. Tonnen. Spitzenreiter im Zubau waren 2008 die USA (+8'358 MW) und China (+6'300 MW)[ii]. Bis ins Jahr 2012 werden weltweit rund 280 Mrd. Franken in diese Technologie investiert werden.

Ende 2009 waren in der Schweiz 37 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 17,5 MW installiert, welche rund 25 GWh Strom pro Jahr erzeugen. In der Schweiz hat sich eine Zulieferindustrie entwickelt, welche international agiert und in der Schweiz jährlich ca. 200 Mio. Franken umsetzt. Die Schweizer Forschung – zunehmend auch getragen von grossen Forschungsinstitutionen wie der ETH – ist international vernetzt, vor allem auf dem Gebiet von Anlagen im Gebirge, an schlecht zugänglichen Standorten und im Zusammenhang mit «Social Acceptance».

Im Vordergrund der Forschung [23] stehen:

- **Entwickeln von Anlagekomponenten** für die Nutzung von Windenergie unter spezifisch schweizerischen Verhältnissen durch die einheimische Industrie, wie z. B. Reduktion der Lasten mit neuen Werkstoffen, Erhöhung des Energieertrags bei tiefen Windgeschwindigkeiten und Einsatz der Nanotechnologie gegen Verschmutzung und Vereisung.
- **Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages** von Windkraftanlagen an extremen Standorten durch Erarbeiten von Planungs-Know-how für komplexe Terrains, Tests an extremen Standorten durch Auswertung von Betriebserfahrungen und durch Erarbeiten von Empfehlungen.
- **Erhöhung des «Wertes» der Windenergie**, Optimierung der Integration von Windkraftanlagen in die Stromversorgung durch Fore- und Nowcasting der Energieproduktion aus Wind, durch Netzregulierung mit hohem Anteil an Windenergie und durch Optimierung der Bedingungen für intermittierende Produktionsanlagen im Netz.
- **Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie** unter Einbezug sozial- und umweltwissenschaftlicher Kompetenz, z. B. mit Ermitteln von Erfolgsfaktoren und -strategien.

Ergänzend wird mit Pilot- und Demonstrationsprojekten die Lücke zwischen den eigentlichen Forschungsaktivitäten und der Anwendung in der Praxis geschlossen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Nachfolgend sind einige exemplarische Projekte aufgeführt. Die komplette Liste der Projekte befindet sich im Anhang.

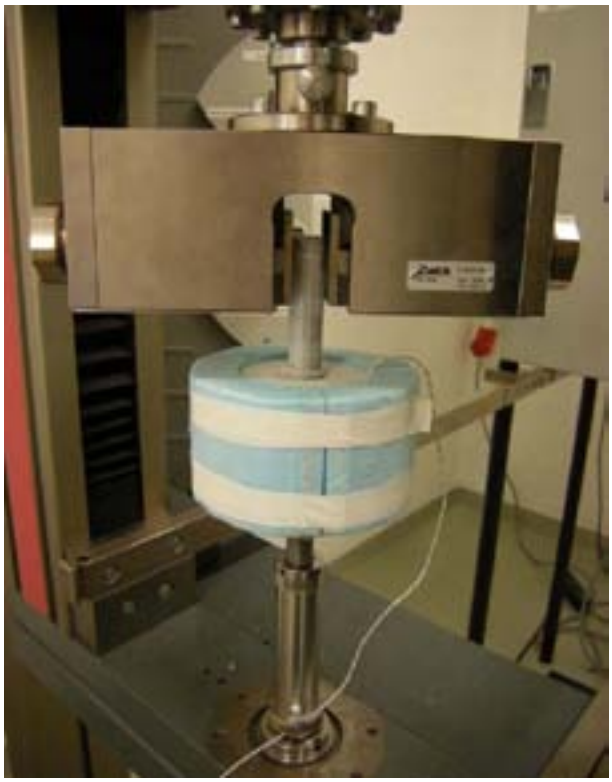
Entwickeln von Anlagekomponenten

Untersuchungen haben gezeigt, dass wegen Vereisung der Windenergieanlagen substantiell Energieproduktion verloren geht. Viele «de-icing»-Methoden sind entwickelt worden, welche auf der mechanischen oder elektrischen Energieberuhen. Obwohl effizient, benötigen diese Methoden entweder viel Energie oder ausgearbeitete Infrastruktur und Unterhalt. Die ideale Lösung für die Vereisungsproblematik wäre die Anwendung eines Materials, welches die Haftung des Eises verringert, so dass das Eis schon unter der Einwirkung von natürlichen Kräften abfällt. Solche natürlichen Kräfte sind z. B. Gravitation, Wind, Beschleunigungskräfte und Vibrationen.

Idealerweise wäre ein solches Material fest, dauerhaft, einfach anzuwenden und preiswert. Die Resultate des Projekts *Antifreeze Beschichtung für Rotorblätter von Windenergieanlagen* [1] der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (2007/08) haben gezeigt, dass Antifreez-Beschichtungen grundsätzlich möglich sind.

Um aus den gefundenen Verbindungen letztlich brauchbare Beschichtungen, die Rotorblätter vor dem Vereisen schützen, herzustellen, wurde weitere Forschungsarbeit geleistet. Für die Entwicklung einer solchen Beschichtung ist ein Eishaftungstest Voraussetzung. Im Rahmen des Projektes *Nichtvereisende Beschichtungen für Rotorblätter von*

Windenergieanlagen [2] wurde u.a. ein Adhäsionstest entwickelt, welcher auf der Verwendung einer Zugprüfmaschine beruht. Ein Bolzen wird in einen Block eingefroren und die maximale Zugkraft, bevor die Grenzfläche zwischen Eis und Bolzen reisst, wird bestimmt. Aus dieser Kraft lässt sich die Eisadhäsion berechnen. Die Eishaftung, die gemessen wurde, lässt sich mit anderen Messungen vergleichen. Nach der Bestimmung der Eisadhäsion an Aluminium werden nun andere Materialien, die eine Haftungsreduktion zeigen (z. B. Teflon), gemessen, um deren Eisadhäsionsreduktion zu bestimmen. Danach sollen neuartige Beschichtungen getestet werden.



Figur 1: Zugmaschine und darin eingespannter Eisadhäsionstest (Foto ZHAW)

Erhöhung der Verfügbarkeit und des Energieertrages

Die schweizerische Energiepolitik zielt mit der beschlossenen kostendeckenden Einspeisevergütung darauf ab, den Anteil des aus erneuerbaren Energien produzierten Stroms bis zum Jahr 2030 um 5'400 GWh oder 10 % des heutigen Schweizer Stromverbrauchs zu erhöhen. Dazu müssten auch mind. 600 GWh aus Windenergie gewonnen werden, was einen möglichst effizienten Betrieb von entsprechenden Anlagen auch an extremen Standorten mit sehr turbulenten Windverhältnissen voraussetzt. Erste Untersuchungen im Rahmen des Projektes *Development of wind turbines for safe operation in alpine environments (phase I)* [3] zeigten beispielsweise für den alpinen Standort «Gütsch» bei Andermatt, dass aufgrund unregelmässiger Windströmungen an diesem turbulenten Standort bis zu 20 % Energieertragseinbussen resultieren können.

Turbulente Windströmungen treten auch im Lee von Windkraftanlagen auf (sog. Wake-Effekt). Je nach Windpark-Layout kann dadurch der Energieertrag einer einzelnen Anlage um bis zu 25 % tiefer ausfallen. Unregelmässige Windströmungen und erhöhte Turbulenzen führen nicht nur zu Unsicherheiten bezüglich des Energieertrags einer Windfarm, sondern auch zu einer verringerten Verfügbarkeit und einer tieferen Lebenserwartung der Anlagen, und somit zu einem erhöhten Risiko für Investoren.

Mit dem Projekt *Development of wind turbines for safe operation in alpine environments (phase II)*, *Influence of upstream wakes on turbine power in complex terrain* [4] unterstützt deshalb auch die Industrie fundierte Forschungstätigkeiten der ETHZ auf diesem Gebiet. In dieser zweiten Phase werden Untersuchungen durchgeführt, um die entsprechenden Verluste zu quantifizieren, um die verantwortlichen Strömungsphänomene besser zu verstehen, und um somit auch Ziel führend Optimierungsstrategien entwickeln zu können.

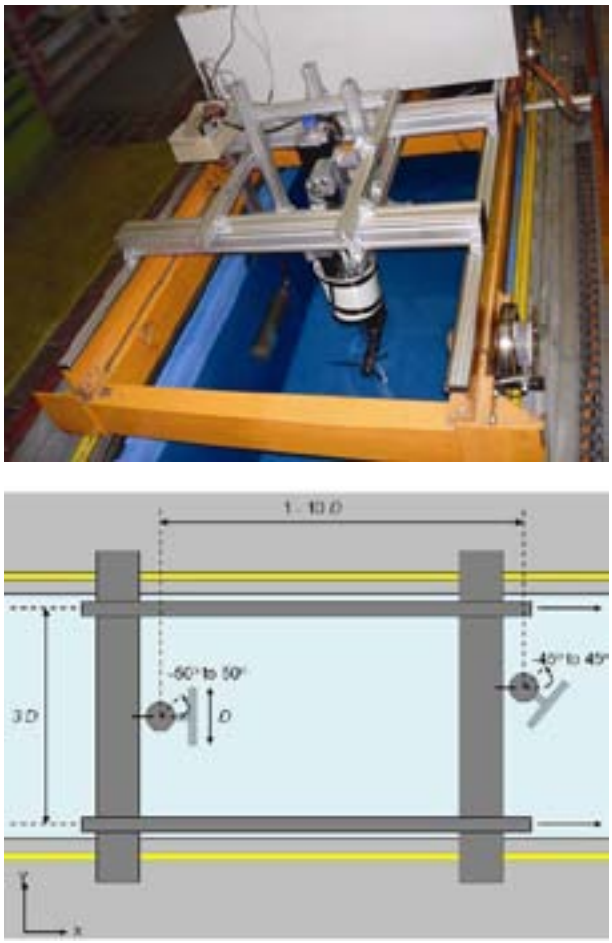
Die Arbeiten kombinieren Experimente mit einer neuen *Sub-scale model wind turbine test facility* der ETHZ und CFD-Studien, welche den kommerziellen CFX-Code verwenden.

Ziel ist es, eine Energieertragskarte für komplexes Terrain mit turbulenten Windströmungen zu erstellen, welche in Abhängigkeit der relativen Positionierung der Anlagen in einem Windpark Aussagen zur Wirtschaftlichkeit machen kann. Empfehlungen zur Optimierung des Windpark-Layouts sollen damit möglich werden.

Erhöhung des «Wertes» der Windenergie

Im Rahmen des Forschungsprojekts *Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände* [5] wurden verschiedene Prognose-Methoden erarbeitet und mit einem Prototyp getestet. Die Prognosen wurden für zwei zeitliche Horizonte untersucht: die Kurzfristprognosen für den nächsten Tag, sowie

die Kürzestfristprognosen für den Intra-Day-Handel. Prognostiziert wurden die stündlichen Werte von Windgeschwindigkeit und Leistung.



Figur 2: Sub-scale model wind turbine test facility an der ETH Zürich. Bisheriger Aufbau (oben) und neues Design mit 2 Rotoren (unten), um die gegenseitige Beeinflussung von Windturbinen untersuchen zu können. (Foto ETHZ)

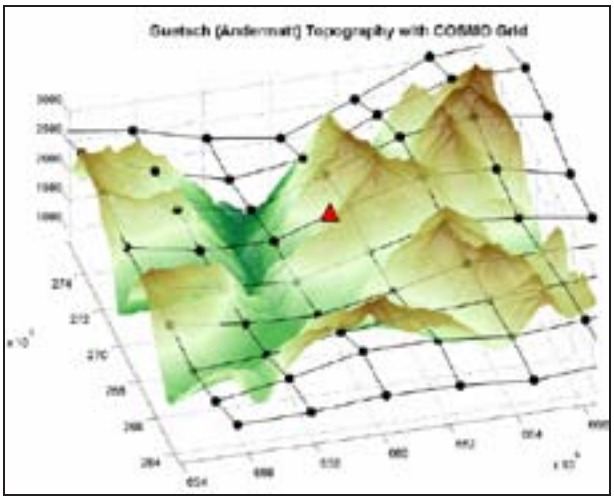
Folgende Methoden wurden entwickelt und untersucht:

– **Direct Model Output**: Windgeschwindigkeits-Prognosen wurde direkt vom Resultat des operationellen numerischen Wettermodells COSMO von MeteoSchweiz übernommen. Die Prognose der Leistung wurde von der Windgeschwindigkeit mit Hilfe der theoretischen Leistungskurve der entsprechenden Windenergieanlage (WEA) abgeleitet.

– **WindSim**: WindSim ist ein hoch auflösendes Modell zur Simulation von Windfeldern über dem Gelände. Die Windgeschwindigkeitsprognosen des COSMO-Modells wurden mit den in WindSim gerechneten Windfeldern an den Anlagenstandort auf Nabenhöhe umgerechnet. Die Leistungsprognose wurde wie für den Direct Model Output aus der theoretischen Leistungskurve abgeleitet.

– **Model Output Statistics**: Anhand von historischen Mess- und Modelldaten wurde für jeden individuellen Standort ein möglichst guter linearer Zusammenhang zwischen verschiedenen Prognosen des COSMO-Modells und gemessenen Werten von Windgeschwindigkeit und Leistung bestimmt. Damit wurden die aktuellen COSMO-Prognosen in Windgeschwindigkeits- bzw. Leistungsprognosen umgerechnet.

– **Kalman Filter**: Mit den lokalen Windgeschwindigkeitsmessungen der letzen 24 Stunden wurden laufend die Vorhersagefehler aktualisiert, anhand derer die COSMO-Prognosen korrigiert wurden. Die Leistungsprognose wurde aus einem empirischen Zusammenhang zwischen gemessener Windgeschwindigkeit und gemessener Leistung am Standort abgeleitet.



Figur 3: Vergleich der wirklichen Topographie (überhöht) mit der COSMO-2-Topographie (schwarze Punkte) am Beispiel Gütsch. Ergebnisse mit dieser recht feinen Gitterweite sind noch weit entfernt von der Genauigkeit, die für Windvorhersagen für Windenergiezwecke benötigt wird.
Eine Methode, um das Ergebnis einer numerischen Wettervorhersage weiter zu verfeinern, ist ein dynamisches Downscaling wie z B. durch Simulationen mit dem Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell WindSim. Dabei werden die Ergebnisse eines gröber aufgelösten Modells als Anfangs- und Randwerte für ein feiner auflösendes Modell verwendet.

Die verschiedenen Vorhersagemethoden wurden sowohl für die Kurzfrist- als auch die Kürzestfristprognose erfolgreich angepasst. Die Genauigkeit der Resultate ist trotz der sehr komplexen Topografie der Schweiz grösstenteils besser oder im

Bereich von internationalen Referenzwerten. Die entwickelten statistischen Methoden haben bei ähnlicher Güte unterschiedliche Anforderungen an die zugrunde liegende Datenbasis. Dies verleiht uns eine grosse Flexibilität für die Entwicklung eines operationellen Betriebs und die Möglichkeit, auf die individuellen Gegebenheiten an einem neuen Standort (z. B. die Datenverfügbarkeit) einzugehen.

Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie

Der weltweite Boom der Windenergie hat auch zur Folge, dass Projekte mehr und mehr mit Akzeptanzproblemen zu kämpfen haben – nicht nur in der Schweiz. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des IEA Implementing Agreement «Wind» ein neuer Task lanciert: *Social Acceptance of Wind Energy Projects: Winning Hearts and Minds* [26]. Der schweizerische Beitrag konkretisiert sich in den folgenden Projekten:

– Im Rahmen des an der EPFL in Lausanne durchgeführten Forschungsvorhaben *Investor Acceptance of Wind Energy in Switzerland* [7] wird untersucht, wieso Investoren in der Schweiz im Bereich der Windenergie aktiv sind und welche Rahmenbedingungen geändert werden müssten, falls sie von Investitionen absehen.

– Im Projekt *Code of Conduct für Windkraftprojekte* [8] werden mit Hilfe eines mehrstufigen partizipativen Verfahrens Instrumente und Standards erforscht, die innerhalb nützlicher Frist zur Anwendungsreife entwickelt werden können, um die Umsetzung von Windkraftprojekten in der Schweiz wirksam zu unterstützen und die heute herrschende hohe soziale Akzeptanz gegenüber der Windenergie zu stabilisieren und zu stärken.

– Studien an den zukünftigen *Standorten für Windparks auf dem Schwyberg* [9] und dem *Gotthard* [10] sollen klären, in welchem Masse die Brutvögel und der Vogelzug durch die Nutzung der Windenergie beeinträchtigt werden. Erfassung des Vogelzugs vor und nach dem Bau durch Radar, intensive Schlag-Zählung (einschliesslich der Fledermäuse) und Brutvogelbeobachtungen. Vorschläge für die Minimierung der negativen Einflüsse sollen für weitere Windenergieanlagen entlang des Voralpenkammes und im inneralpinen Raum gemacht werden.

Nationale Zusammenarbeit

Organisation der Windenergieforschung in der Schweiz

Der Leiter des Energieforschungsprogramms Windenergie ist gleichzeitig Co-Geschäftsführer der Schweizerischen Windenergievereinigung «Suisse Eole». Dadurch ist eine enge Verbindung zwischen relevanten Marktanliegen und der Forschung sicher gestellt. Im Rahmen eines sog. Firmenbeirates können sich die Mitglieder des Verbandes auch zu Fragen der Forschung äussern. An regelmässigen Treffen des Programmleiters mit dem CORE[iii]-Paten Prof. Dr. Rolf Wüstenhagen, der BFE-Bereichsleiterin Dr. Katja Maus und dem Verantwortlichen beim BFE für Marktentwicklung, Markus Geissmann wird die Entwicklung des Programms mit den Zielen der CORE und den Anliegen von EnergieSchweiz abgestimmt.

Abgrenzungen zu und Synergien mit anderen Programmen

Das Forschungsprogramm Windenergie hat bereits in der Vergangenheit mit anderen Forschungsprogrammen des BFE aktiv zusammengearbeitet. Diese Kooperationen wurden auch im Berichtsjahr weiter geführt. Im Besonderen bestehen gute Kontakte zum Bereich der Photovoltaik, der Akkumulatoren und Superkondensatoren, der Elektrizitätstechnologien und -anwendungen und des Verkehrs.

Energiewirtschaftliche Grundlagen

Vor allem im Zusammenhang mit dem Thema «Soziale Akzeptanz» von Windenergieanlagen entwickeln sich interessante Synergien, insbesondere auch im Kontext mit dem *IEA Task 28 Social Acceptance*. [26]. Eines der Ziele dieser Aktivitäten

ist, die Resultate der Sozialwissenschaften den planenden Ingenieuren näher zu bringen.

Netze

Das Thema «Intelligente Verteilnetzstrukturen» (Smart Grids) und Regelenergie für erneuerbare Energien bekommt sowohl im Zusammenhang mit einem zunehmenden Anteil an unregelmässig produzierenden Anlagen aus erneuerbaren Energien als auch bez. neuen Speichermöglichkeiten in den Batterien von elektrisch betriebenen Fahrzeugen zunehmend grössere Aktualität.

Institutionen

Folgende Forschungsinstitutionen haben Aktivitäten im Bereich der Windenergie entwickelt:

– Die EPFL (Laboratoire de Systèmes Energétiques, Lasen) [16] betreut Windenergie-Projekte, insbesondere auch im Zusammenhang mit der Entwicklungszusammenarbeit.

– Ebenfalls mit der EPFL, dem College of Management of Technology (CDM), findet eine Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes *Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest* statt. [17]

– Das Labor für Strömungsmaschinen an der ETH Zürich [18] ermittelt im Rahmen des Projektes *Development of Wind Turbines for safe Operation in Alpine Environments* die Einflüsse von Vereisung, Böen und Turbulenzen auf die Performance einer Windturbine im komplexen Gelände.

– An der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW) arbeitet eine Gruppe um Prof. Martina Hirayama an der Entwicklung von Nano-Oberflächen zur Verhinderung von Vereisung der Rotorblätter [19].

– Das Irap (Institut für Raumentwicklung an der Hochschule für Technik Rapperswil) besitzt umfassendes Know-how zur Fragestellung Windenergie und Raumplanung [20].

– Der Dreh- und Angelpunkt für die Förderung der Windenergie in der Schweiz ist *Suisse Eole*, die Schweizerische Vereinigung zur Nutzung der Windenergie [21].

– Sämtliche Planungsinstrumente, insbesondere ein Map-Server mit allen relevanten Aussagen zu möglichen Windenergiestandorten sind auf der Website von *Suisse Eole* vorhanden. [22]

Internationale Zusammenarbeit

Seit 2002 beteiligt sich die Schweiz am IEA-Projekt *Wind Energy in Cold Climates (WECO)* [11]. 2009 fanden drei Treffen der Experten statt. Umfassende Informationen sind auf der Website dieses Programms zu finden [24].

Die Arbeiten beim *Alpine Test Site Gütsch* [15] sind eng verknüpft mit dem oben genannten IEA-Projekt. Dessen Resultate und Empfehlungen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens *COST 727 Alpine Test Site Gütsch, Meteorological measurements and wind turbine performance analysis* verifiziert und einem weiteren Umfeld nutzbar gemacht. Im Jahre 2008 wurde durch das Forschungsprogramm das Handbuch *Alpine Test Site Gütsch* veröffentlicht, im welchem die entsprechenden Resultate dargestellt sind. Im September 2009 wurde ein internationales Seminar zu diesen Fragestellungen in Andermatt durchgeführt [25].

Im Jahre 2007 wurden Aktivitäten aus dem Forschungsprogramm Windenergie lanciert, um innerhalb der IEA einen neuen Task *Social Acceptance* [26] zu starten. Am ExCo-Meeting vom 22.4.2008 in Aalborg wurde das Arbeitsprogramm dieses Task 28 grundsätzlich bestätigt. Ein erstes inoffizielles Treffen fand am 28.8.2008 im schweizerischen Bubendorf statt. Der offizielle Start von Task 28 erfolgte am 20.3.2009 in Magdeburg, und ein weiteres Treffen wurde am 26.10.2009 in Boulder, USA durchgeführt. Bis heute partizipieren Kanada, Dänemark, Deutschland, Finnland, Irland, Japan, Holland, Norwegen, die Schweiz und die USA. Operating Agent ist Robert Horbaty, Programmleiter des Forschungsprogramms Windenergie.

Die Erstellung eines umfassenden «State of the art»-Reports wurde durch das Forschungsprogramme Windenergie mitfinanziert [28].

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Im Kontext mit den Schwerpunkten des Forschungsprogramms Windenergie werden mit dem P+D-Projekt *Vereisung WEA St. Brais, Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen* [15] folgende Ziele verfolgt:

– Bestimmung der Effizienz und der Zuverlässigkeit des gelieferten Systems zur Eisentfernung von den Rotorblättern (Warmluftheizung) mittels Auswertung der Webcam-Bilder; Berechnung der dazu benötigten Energie; Vollständigkeit der Eisentfernung.

– Ermittlung des Ertragsausfalls einer WEA durch Vereisung: Bei einer WEA wird während eines Monats pro Messwinter das Enteisungssystem deaktiviert, während die zweite Anlage normal weiter betrieben wird. Aus den Resultaten wird ein Vergleich zwischen der zusätzlich gewonnenen Energie und der eingesetzten Heizenergie erstellt und daraus eine Aussage über das Kosten-Nutzen-Verhältnis des eingesetzten Enteisungssystems gemacht. Gleichzeitig soll der Einfluss der Vereisung auf die Leistungskurve der WEA quantifiziert werden.

– Erfassung der durch Vereisung an den Rotorblättern entstehenden Zusatzlasten basierend aus den Messdaten des Insensys Rotorblatt-Monitoringsystems RMS (Eiserkennung).

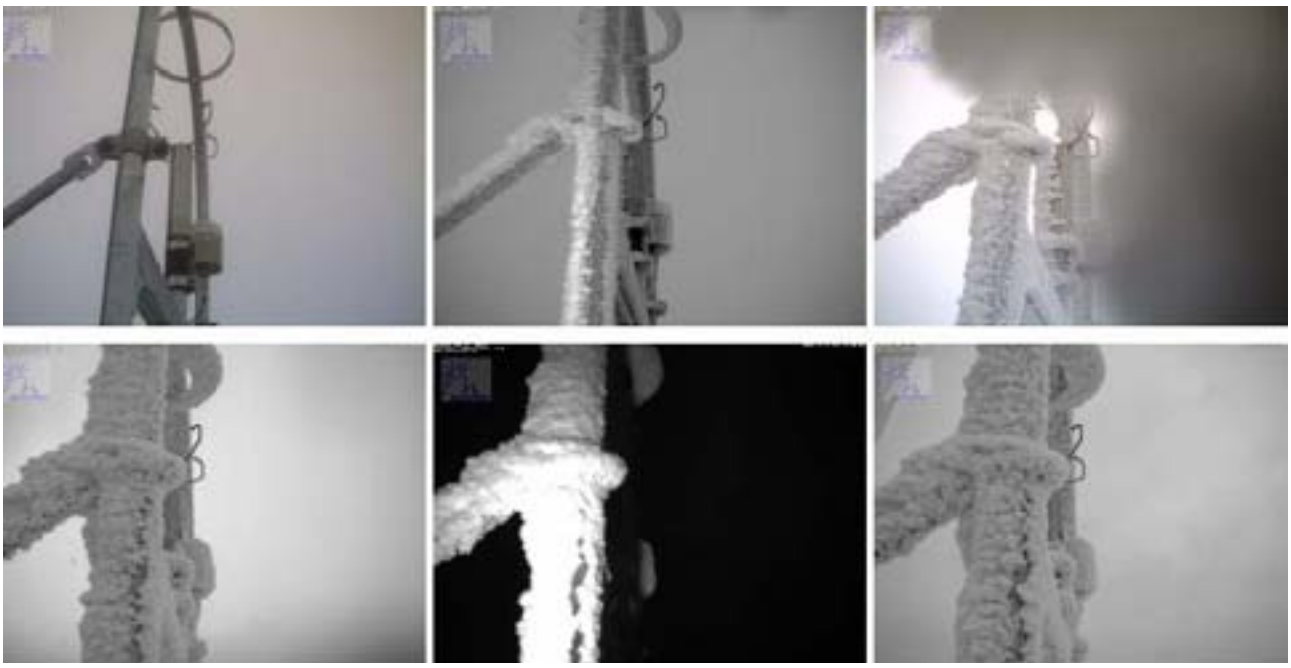
– Bestimmung der Häufigkeit, der Intensität, der Dauer und der Art von Vereisungsereignissen am Standort St. Brais im Jurabogen; Vergleich mit den bei der Projektierung theoretisch berechneten Werten sowie den Resultaten der vom BFE geplanten Vereisungskarte der Schweiz.

– Detaillierte Evaluation der Zuverlässigkeit unterschiedlicher Systeme zur Erfassung der Vereisung an Rotorblättern von WEA.

– Erstellung einer standortspezifischen Leistungskennlinie der WEA mit und ohne Vereisung mittels einer LIDAR-Messkampagne. Vergleich mit der vom Hersteller definierten Leistungskurve.

– Erfassen der durch Vereisung an den Rotorblättern entstehenden Zusatzlasten mittels einer Gewichtsmessung mit Dehnmessstreifen (Eiserkennung).

Das Insensys RMS System sowie die Kameras konnten zeitgerecht auf der WEA in St. Brais installiert werden. Damit war das Kernsystem des Projekts gemäss Zeitplan verfügbar. Das Vereisungsereignis von Mitte Dezember lieferte einen ersten sehr guten Datensatz und zeigte zudem die



Figur 4: Bilder des beheizten Sonic Anemometer auf der Gondel der Windkraftanlage während einer Vereisungsperiode (Foto Meteotest)

Relevanz dieses Projekts für die Schweizer Windenergie.

Während dieser Zeit trat im ganzen Jurabogen und auch in den Voralpen starke Vereisung auf, welche alle unbeheizten Windmessungen zum Erliegen brachte. Durch die tiefen Temperaturen blieb das Eis während mehr als einer Woche erhalten. Eine WEA ohne Blattheizung hätte vermutlich während dieser Zeit nicht mehr oder nur reduziert betrieben werden können. Die Analyse der in Fig. 4 dargestellten Kamerabilder zeigte, dass das auf der Gondel installierte Sonic Anemometer während der ganzen Zeit eisfrei blieb.

Die Blattheizung der WEA 1 in St. Brais schaltete sich während dieser Periode (11. bis 17. Dezember) insgesamt 16 Mal ein. Gemäss den Kamerabildern konnte das Eis erfolgreich von der Vorderkante des Flügels entfernt werden; es ist kein signifikanter Eisansatz zu erkennen. Auf der Rückseite konnte das Eis jedoch nicht vollständig abgeschmolzen werden, wobei dies, wie auch die ETH in ihrem Vorhaben ermittelt hat, nicht relevant ist.

Die Betriebserfahrungen der installierten Windenergieanlagen werden kontinuierlich erfasst. Die entsprechenden Erfahrungen dienen weiteren Projektentwicklern zur Optimierung ihrer Vorhaben.

Mit über 2'400 Volllaststunden ist die Performance der 2-MW-Anlage Enercon E70 der Firma Rhoneole in Collonges im Kanton Wallis mit Küstenstandorten vergleichbar (Projekt *Campagne de mesures (Erfolgskontrolle): 2-MW éolienne à Collonges VS* [13]).

Im Projekt *Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos* [14] in Rengg/Entlebuch werden auf 1020 m.ü.M. bei einer 900-kW-Windenergieanlage die Betriebsergebnisse gesammelt und ausgewertet.

Figur 5: Bilder des enteisten Rotorblattes (Foto Meteotest)

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) [27] hat zu einer grossen Dynamik in der Planung von Windenergieprojekten in der Schweiz geführt. Die folgende Grafik in Fig. 6 zeigt die aktuellen Zahlen. Insgesamt sind Projekte mit einer möglichen Energieproduktion von ca. 1'400 GWh angemeldet, weitere Projekte mit einer Kapazität von 400 GWh sind auf einer Warteliste. Unter «Sollbeitrag» KEV sind ein Beitrag von 600 GWh an die Ziele des Energiegesetzes (5'400 GWh Strom aus neuen erneuerbaren Energien) sowie der gemäss Teilkostendeckel von 30 % maximal zu erwartende Betrag von rund 1'100 GWh eingetragen.

Das Energieforschungsprogramm Windenergie unterstützt die Realisierung dieser Vorhaben mit Forschungs- und P+D-Projekten, Schwerpunkte des durch die CORE am 9.9.2008 genehmigten Konzeptes [23] sind:

– Entwickeln von **Anlagekomponenten**, z.B. (1) Antifreeze-Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen [2] (2) *Development of*

Wind Turbines for Safe Operation in Alpine Environments [4]

– Erhöhung der Verfügbarkeit und des **Energieertrages** von Windkraftanlagen an extremen Standorten, z. B. (1) Vereisungskarte der Schweiz [12] (2) Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen [15]. (3) *Measuring and forecasting icing on structures* [6]

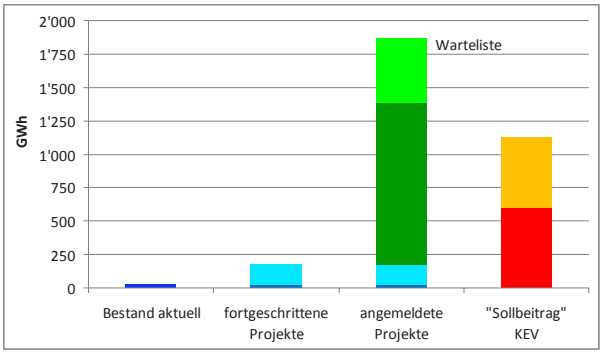
– Erhöhung des **«Wertes»** der Windenergie, z. B. (1) Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände [5]

– Erhöhung der Akzeptanz für Windenergie, z. B. (1) Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest [7] (2) *Code of Conduct* [8] (3) *Studie Auswirkungen auf die Vogelwelt des Windenergieprojektes Gotthard [9]* (4) *Studie Auswirkungen auf die Vogelwelt des Windenergieprojektes Schwyberg [10]*

Mit den Forschungsresultaten bezüglich des Betriebs von Windkraftanlagen unter turbulenten und vereisenden Bedingungen erarbeitet sich die Schweiz internationales Renommée im Bereich der Windenergienutzung im kalten Klima.

Mit dem IEA-Projekt *Social Acceptance* [26] werden die mittlerweile umfassenden Erfahrungen in Akzeptanzfragen in unserem Land international vernetzt – im Sinne von besseren und rascher realisierbaren Projekten.

Die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE erarbeitet alle vier Jahre in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern und dem Bundesamt für Energie das Energieforschungskonzept des Bundes. Für das Konzept 2013 – 2016 werden vier neue Schwerpunkte gesetzt: «Wohnen und Arbeiten der Zukunft», «Mobilität der Zukunft», «Energiesysteme der Zukunft» und «Prozesse der Zukunft». Anlässlich der letzten Programmleitersitzung vom 20.11.2009 wurde mit der Formulierung dieser Strategie begonnen.



Figur 6: Mögliche Entwicklung der Windenergie in der Schweiz

Da die für das Programm im Jahre 2010 zur Verfügung stehenden Mittel bereits zu einem grossen Teil verpflichtet sind, besteht für neue Forschungsvorhaben nur noch ein kleiner Spielraum.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer)

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

[1] Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, www.zhaw.ch/de/zhaw.html zhaw, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, **Antifreeze- Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen** (SB), 101'903

[2] Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, www.zhaw.ch/de/zhaw.html zhaw, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, **Nicht vereisende Beschichtungen für Rotorblätter von Windenergieanlagen** (JB)102'660

[3] Sarah Barber, (barber@lec.mavt.ethz.ch), www.lec.ethz.ch Institut für Energietechnik, lec, eth Zürich, ML J 24: **Development of Wind Turbines for safe Operation in Alpine Environment** (SB) 102'744

[4] Sarah Barber, (barber@lec.mavt.ethz.ch), www.lec.ethz.ch Institut für Energietechnik, lec, eth Zürich, ML J 24: **Development of wind turbines for safe operation in alpine environments (phase II), Influence of upstream wakes on turbine power in complex terrain** (JB) 102'744

[5] Stefan Kunz, René Cattin (kunz@meteotest.ch, www.meteotest.ch), Meteotest, Bern: **Fore- und Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände** (JB) 102'399

[6] René Cattin (cattin@meteotest.ch, www.meteotest.ch), Meteotest, Bern: **Measuring and forecasting icing on structures** (JB) 102'592

[7] Professor Christopher Tucci, Mary Jean Bürer (maryjean.burer@epfl.ch, cdm.epfl.ch/homepage.php, epfl, College of Management of Technology (CDM), Lausanne: **Social Acceptance of Wind Energy in Switzerland – To Invest or Not to Invest** (SB) 102'429

[8] Pierre Strub, Christine Ziegler (info@pierrestrub.ch), www.pierrestrub.ch, Pierre Strub, freischaffender Berater; **Code of Conduct für Windkraftprojekte** (SB) 102'553

[9] Felix Liechti, Vogelwarte Sempach, felix.liechti@vogelwarte.ch http://www.vogelwarte.ch **Studie zu den Auswirkungen des Windparks Schwyberg auf die Vogelwelt**.(JB) 103'282

[10] Felix Liechti, Vogelwarte Sempach, felix.liechti@vogelwarte.ch http://www.vogelwarte.ch **Studie zu den Auswirkungen des Windparks Gotthard auf die Vogelwelt**.(JB) 103'282

[11] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), www.ieawind.org nrel iea-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Task 19 **Wind Energy in Cold Climates:** arcticwind.vtt.fi. (JB)

[12] Silke Dierer, Philippe Steiner, Michael Lehning, René Cattin, Meteotest / MeteoSchweiz / WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), silke.dierer@meteotest.ch, www.meteotest.ch, **Vereisungskarte der Schweiz** (JB) 103'203

Liste der P+D-Projekte

[1] Jean-Marie Rouiller (jean.marie.rouiller@lausanne.ch www.lausanne.ch) Services industriels de Lausanne, Lausanne, **Campagne des mesures (Erfolgskontrolle) 2MW éolienne à Collonges VS,** (JB) 101'708

[2] Roland Aregger (info@windpower.ch, www.windpower.ch), Windpower AG, Entlebuch: **Betriebsresultate der Windenergieanlage Feldmoos** (SB) 101'763

[3] René Cattin (cattin@meteotest.ch, www.meteotest.ch), Meteotest, *Bern:* **Vereisung WEA ST. BRAIS, Auswirkungen der Vereisung auf das Betriebsverhalten und den Energieertrag von Windkraftanlagen im Jurabogen** (JB) 103'291

Referenzen

[15] Alpine Test Site Gütsch, Website zu diesem COST 727-Projekt www.meteotest.ch/cost727/index.html

[16] EPFL Lausanne, Laboratoire de systèmes énergétiques Lasen: lasen.epfl.ch/page39406.html.

[17] EPFL, College of Management of Technology (CDM), Lausanne, cdm.epfl.ch/homepage.php

[18] Prof. R. Abhari, Dr. S. Barber, Labor für Strömungsmaschinen an der ETH Zürich, www.lsm.ethz.ch

[19] ZHAW, Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften, Winterthur, Martina Hirayama (martina.hirayama@zhwin.ch, www.zhaw.ch/de/zhaw.html

[20] Kurt Gilgen, Alma Sartoris, (irap@hsr.ch), www.irap.hsr.ch, irap Institut für Raumentwicklung an der Hochschule für Technik Rapperswil: **Planerische Voraussetzungen für die Nutzung der Windenergie** (SB)

[21] Schweizerische Vereinigung für Windenergie, Suisse Eole: www.suisse-eole.ch.

[22] Windenergie Daten der Schweiz www.wind-data.ch.

[23] Konzept des Energieforschungsprogramms Windenergie für die Jahre 2008 – 2011, ausgearbeitet durch R. Horbaty, von der CORE am 9.9.2008 zur Umsetzung freigegeben.

[24] **Wind Energy in Cold Climate,** Website des IEA Task 19 «WECO», arcticwind.vtt.fi

[25] Veranstaltung zur Vereisung, IWAIS, Sept. 2009 in Andermatt www.iwais2009.ch

[26] Patricia Weis-Taylor, (pwt_communications@comcast.net), www.ieawind.org NREL IEA-Implementing Agreement on Wind Energy Research and Development, Task 28 **Social Acceptance of Wind Energy Projects:** (JB) www.socialacceptance.ch

[27] Unterlagen zur **Kostendeckenden Einspeisvergütung KEV** von Windkraftanlagen in der Schweiz, Bundesamt für Energie www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?dossier_id=02168&lang=de

[28] Robert Horbaty, ENCO AG, robert.horbaty@enco-ag.ch, www.enco-ag.ch, Literatur **IEA Wind Task 28 Social Acceptance of Wind Energy**, (JB) 102'802

---

[i] World Wind Energy Association http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com_content&task=view&id=245&Itemid=40

[ii] Bundesverband Windenergie http://www.wind-energie.de/de/statistiken/we-international/

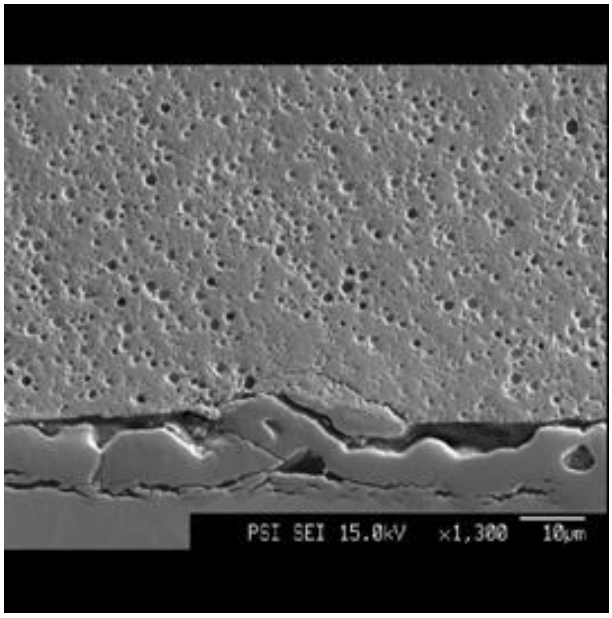
[iii] CORE: Commission fédérale pour la recherche énergétique. Eine ausserparlamentarische Kommission, die es u.a. zur Aufgabe hat, dem Bundesrat alle vier Jahre ein Konzept für die Schweizer Energieforschung vorzulegen. Infos: www.energieforschung.ch.

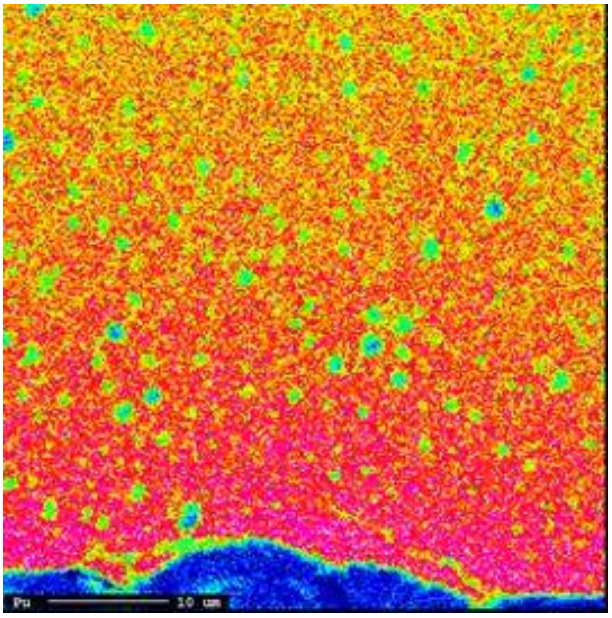
Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm
Kerntechnik und Nukleare Sicherheit

Jörg Dreier

joerg.dreier@psi.ch





Materialuntersuchungen mit modernster analytischer Infrastruktur im Hotlabor des Paul Scherrer Instituts.

Resultate mit dem neuen EPMA (Electron Probe Micro-Analyzer) von Untersuchungen an einer bestrahlten Brennstoffprobe im Hotlabor: links: Sekundärelektronenbild der Probe; rechts: Plutonium Verteilungsbild am Übergang vom Hüllrohr zur Brennstofftablette.

Programmschwerpunkte

Die nukleare Energieforschung findet in der Schweiz hauptsächlich im Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) des Paul Scherrer Instituts (PSI) statt, während die Ausbildung in der Kerntechnik primär die Aufgabe der Eidgenössischen Technischen Hochschulen von Zürich und Lausanne ist. Die Verordnung über die Forschungsanstalten des ETH-Bereichs bildet die Basis für die Mission des Forschungsbereichs NES. Sie wird ferner bestimmt durch die Bedürfnisse an Forschung und wissenschaftlichen Dienstleistungen der nuklearen Gemeinschaft in der Schweiz, d.h. der Betreiber der Kernkraftwerke (KKW), die einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb ihrer (alternden) Reaktoren anstreben, der Entsorgungsorganisation Nagra und der Aufsichtsbehörde ENSI, welche die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen durch die KKW kontrolliert. Alle diese Partner sind zudem daran interessiert, dass mittel- und langfristig eine adäquate Anzahl von Nachwuchsspezialisten der Kerntechnik erhalten bleibt, um Verantwortung im Bereich der nuklearen Stromerzeugung zu übernehmen.

Der Wert der nuklearen Energieforschung wird sowohl am PSI als auch innerhalb des ETH-Bereichs anerkannt, und ihr Umfang soll daher mindestens stabil gehalten werden. Für die strategische Planung wird weiter angenommen, dass heutige Reaktoren durch neue, mit den Nachhaltigkeitsgeboten noch kompatiblere ersetzt werden, was inzwischen durch die Einreichung von drei Rahmenbewilligungsgesuchen auch bestätigt wurde, und dass ein Lager für radioaktive Abfälle in der Schweiz gebaut werden soll. Die erforderliche hohe Flexibilität und Robustheit der Forschung werden durch Forschung auf generischen Gebieten, durch Verstärkung der Vernetzung innerhalb des PSI und durch Aufnahme neuer Hauptaktivitäten im Rahmen internationaler Zusammenarbeiten sichergestellt.

Die strategischen Arbeitsgebiete des NES umfassen daher 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 sowie die Sicherstellung einer Stand-by-Funktion in Schlüsselgebieten, insbesondere jene, welche ein Hotlabor benötigen;
- Bereitstellung von Input für Entscheidungen der Stakeholders;
- Förderung der Kernenergie mittels F&E in Richtung erhöhter Nachhaltigkeit, einschliesslich Sicherheit und Wirtschaftlichkeit;
- Angebot eines breiten Spektrums von Möglichkeiten für die Ausbildung junger Kernfachleute mit Erfahrung auch in anderen Energiequellen; insbesondere die Unterstützung des gemeinsamen Programms der ETHZ und der EPFL «Master of Science in Nuclear Engineering»;
- Unterstützung von und Nutzen aus der weltweit eingeleiteten «Renaissance» der Kernenergie, und deren Anwendung auf die aktuellen Bedürfnisse in der Schweiz.

Der NES ist in fünf Forschungslabors strukturiert, entsprechend spezifischen wissenschaftlichen und technischen Kompetenzfeldern, und er betreibt das einzige Hotlabor in der Schweiz sowie darüber hinaus die Reaktorschule für angehende Reaktoroperateure (Techniker HF).

Labor für Reaktorphysik und Systemverhalten (LRS)

Die vier Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LRS-Aktivitäten sind:

- LWR-Proteus: Messung reaktorphysikalischer Grunddaten für moderne, komplexe Brennstoffbündel in der kritischen Anlage Proteus zur Validierung von Computercodes und zur Reduktion von deren Unsicherheiten;
- Proteus-Upgrade: Umbau und Ertüchtigung der Anlage Proteus für Messungen an hoch abgebranntem Brennstoff;
- STARS: Entwicklung, Betrieb und Unterhalt eines umfangreichen Codesystems inklusive Datenbasis für Sicherheitsanalysen der Schweizer KKW in den Bereichen transiente Systemanalysen mit Unsicherheitsanalyse und entsprechende Validierungsarbeiten, Simulation von einphasigen Mischvorgängen mittels CFD, Analyse der SWR- und DWR-Reaktorkerne, Neutronik-

Studien zur Kritikalitätssicherheit, Brennstab-Modellierung, atomistische Modellierung von Brennstoff;

- FAST: Entwicklung und Implementierung eines integrierten Codesystems (Neutronik, Thermo-Hydraulik, Brennstabverhalten) für die vergleichende Analyse von Reaktoren mit schnellen Neutronenspektren.

Die Aktivitäten im LRS haben einen engen Bezug zur Kerntechnikausbildung an der EPFL (Reaktorphysik und Systemverhalten); dabei bestimmen die Forschungsprojekte im Labor weitgehend den Rahmen von Doktor- und Diplomarbeiten.

Labor für Thermohydraulik (LTH)

Die Aktivitäten im LTH fokussieren auf die Anwendung von Kenntnissen zur Wärme- und Stoffübertragung und der Hydraulik auf relevante Sicherheits- und Auslegungsfragen heutiger und zukünftiger Kernreaktoren. Dabei werden hinsichtlich der Sicherheitsbeurteilung sowohl auslegungs- als auch auslegungsüberschreitende Unfallbedingungen untersucht. Die zwei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LTH-Aktivitäten sind:

- Alpha: Bestätigung von Auslegungsmerkmalen passiver Sicherheitssysteme für fortgeschrittene LWR mittels grossmassstäblicher Integraltests; experimentelle Untersuchung grundlegender Phänomene im Primärkreislauf und im Containment (Zweiphasenströmungsphänomene wie z.B. Blasenströmungen oder kritische Wärmestromdichten, Mischung/Stratifizierungs-Phänomene etc.) mit Separateffekt-Tests (Versuchsanlagen Panda – grossmassstäblich/Containment – und Linx; Entwicklung und Validierung neuer Methoden und Computercodes, einschliesslich 3D-Effekte u.a. mit CFD (Computational Fluid Dynamics)-Programmen;
- Schwere Unfälle: Experimentelle Untersuchung hauptsächlich zum Aerosolverhalten (derzeit nach einem Rohrbruch im Dampferzeuger in der Artist-Anlage) und der Jodchemie während postulierter schwerer Unfälle; Entwicklung und Validierung von Computercode-Modellen, Nutzung der Codesysteme zur Bestimmung der Quellterme für die Schweizer KKW.

Die Aktivitäten im LTH haben einen engen Bezug zur Kerntechnik-Ausbildung an der ETHZ (Nukleare Energiesysteme); die Forschungsprojekte im Labor bestimmen weitgehend den Rahmen von Doktor- und Diplomarbeiten.

Labor für Nukleare Materialien (LNM)

Das LNM untersucht und beantwortet werkstoffbezogene, wissenschaftliche Fragestellungen zur Sicherheit, Lebensdauer(verlängerung) und Wirtschaftlichkeit heutiger und zukünftiger Reaktoren mittels anwendungs- und grundlagenorientierten, experimentellen und modeltheoretischen Arbeiten und nutzt hierzu gezielt die Grossanlagen des PSI (Hotlabor, SLS, SINQ) und seine schweizweit einzigartige Expertise im Umgang mit stark radioaktiven Materialien. Die drei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LNM-Aktivitäten sind:

- Hochtemperaturmaterialien: Charakterisierung von fortschrittlichen Werkstoffen für den Einsatz in (insbesondere gasgekühlten) Reaktoren der Generation IV bei signifikant höherer Betriebstemperatur und stärkerer Strahlung; Entwicklung mechanistischer Modelle vom atomaren Niveau bis hin zum Kontinuum zur Voraussage des Langzeitverhaltens dieser Werkstoffe. Experimentelle Validierung dieser Modelle durch fortgeschrittene spektroskopische Methoden, insbesondere durch Einsatz von Synchrotron-Strahlung;
- Nukleare Brennstoffe: Mikrostrukturelle/mikromechanische Untersuchungen sowie modelltheoretische Arbeiten zur Alterung von Kerneinbauten (Brennstäbe, Strukturmaterialien); wissenschaftliche Begleitung der Untersuchung von Schäden und Identifizierung von Versagensursachen; Erprobung von Ansätzen für die Herstellung von Generation IV Brennstoffen und der dazugehörigen Brennstoffzyklen;
- Bauteilsicherheit (Integer): Experimentelle Charakterisierung wichtiger Alterungsmechanismen (Risskorrosion, Ermüdung, Strahlenversprödung) in Druck führenden Komponenten, die einen sicheren Langzeitbetrieb beeinträchtigen können; Entwicklung und Validierung von zuverlässigeren, mechanistischen Werkstoffalterungsmodellen und probabilistischen Methoden für Integritäts- und Lebensdauerbwertungen; Evaluation fortschrittlicher zerstörungsfreier Prüftechniken zur Früherkennung der Ermüdungs- und Korrosionsrissbildung und Charakterisierung des aktuellen Versprödungsgrades in Komponenten.

Labor für Endlagersicherheit (LES)

Die Forschungsaktivitäten des LES sind hauptsächlich auf die Geochemie von Endlagersystemen ausgerichtet. Seinen Auftrag sieht das Labor vorwiegend im umfassenden und vertieften Verständnis von Prozessen mit hoher Relevanz für das schweizerische Entsorgungsprogramm. Es forscht deshalb vornehmlich in den Gebieten:

- Geochemie von Tiefenlagersystemen, insbesondere die geochemische Immobilisierung und Rückhaltung von Radionukliden;
- Transportmechanismen von Radionukliden in Grundwassersystemen.

Beide Aktivitätsfelder berücksichtigen sowohl die relevanten in-situ Bedingungen als auch deren räumliche und zeitliche Veränderungen im geologischen Umfeld. Die Ergebnisse aus diesen Forschungsarbeiten fliessen direkt in die verschiedenen Sicherheitsnachweise ein. Damit unterstützt das LES den Bund und die Nagra bei ihrer Aufgabe, radioaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie aus den Kernkraftwerken sicher zu entsorgen.

Im November 2008 hat das Bundesamt für Energie (BFE) die von der Nagra im Rahmen des Sachplans Geologische Tiefenlagerung (SGT) erarbeiteten Vorschläge für geologische Standortgebiete der Öffentlichkeit vorgestellt. Es zeichnet sich ab, dass Beiträge zu den im Sachplan festgelegten Arbeitsprozessen in den nächsten 10+ Jahren zu den prioritären Aktivitäten des LES gehören werden.

Labor für Energiesystem-Analysen (LEA)

Das LEA, ein PSI-Labor des NES unter gemeinsamer Führung mit dem Forschungsbereich «Allgemeine Energie» (ENE) befasst sich mit übergeordneten Aspekten der Energiebereitstellung. In Zusammenarbeit auch mit externen Partnern (ETHZ und vielen anderen) decken die LEA-Aktivitäten drei Hauptgebiete ab:

- Technologie-Bewertung (Projekt GaBe): Entwicklung und Implementierung von Methoden und Datenbanken nach dem Stand der Technik für die interdisziplinäre Bewertung von Energieversorgungsoptionen zur Unterstützung rationeller und nachhaltiger Entscheidungen,
- Energieökonomie: Durchführung quantitativer Analysen von Energiesystemen auf schweizerischer, europäischer und globaler Ebene zur Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen Energie, Ökonomie, Umwelt und Technik,
- Risiko und menschliche Zuverlässigkeit: Beiträge zur Lösung aktueller und aufkommender Fragen bei der Behandlung menschlicher Faktoren (HRA) im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

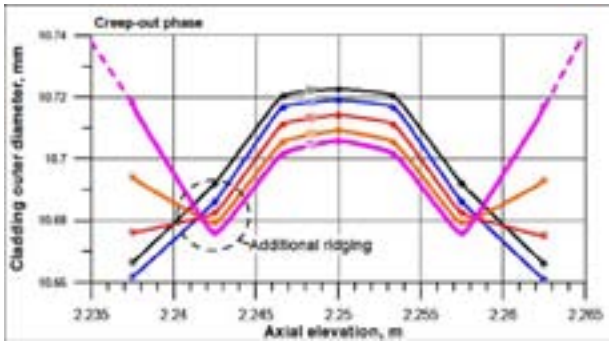
Um den unterschiedlichen Bedürfnisse und Interessen der schweizerischen Kernenergiegemeinschaft entsprechen zu können, geht bereits aus der obigen Einleitung deutlich hervor, dass die Arbeiten im Rahmen der NES-Projekte breit gefächert und sehr facettenreich sein müssen. Eine detaillierte Berichterstattung von allen Projekten würde den Rahmen dieses Berichtes bei weitem sprengen. Die untenstehenden Ergebnisse entsprechen daher nur Teilen der jeweiligen Projekte und sind entsprechend als Beispiele oder Teilresultate zu verstehen.

Sicherheit und sicherheitsbezogene Betriebsprobleme schweizerischer Kernkraftwerke

Stars (Sicherheitsexpertise und -forschung bezüglich Transientenanalysen der Reaktoren in der Schweiz) [1]

Die Mission des Projekts STARS besteht in Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet von Sicherheitsanalysen für Leichtwasserreaktoren. Für eine möglichst weitgehende mechanistische Beschreibung, die auch als «Best-Estimate Analyse» bezeichnet wird, werden hierfür gekoppelte thermisch-hydraulisch-mechanische Modelle entwickelt und angewandt. Hierzu werden dem Stand

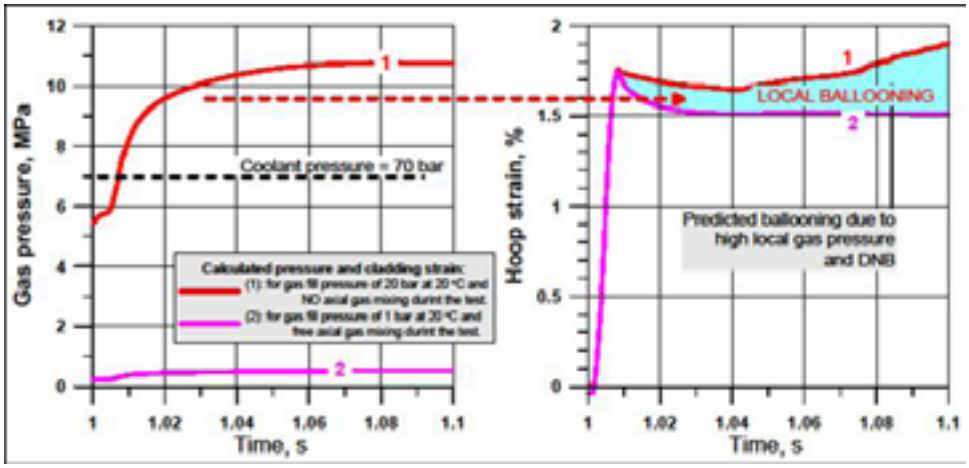
von Wissenschaft und Technik entsprechende Simulationsprogramme adaptiert, eingesetzt und auch weiterentwickelt. In der Schweiz übernimmt STARS teilweise die Rolle einer technisch-wissenschaftlichen Forschungs- und Sachverständigenorganisation zur Unterstützung des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI). STARS entwickelt und pflegt hierzu einen umfassenden Satz von Modellen aller in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerke. Darüber hinaus werden wissenschaftliche Dienstleistungen und fortgeschrittene Sicherheitsanalysen auch im Auftrag internationaler Aufsichtsbehörden und Kernkraftwerksbetreiber durchgeführt. Das Aufgaben-Spektrum umfasst im Betrieb befindliche Anlagen bis hin zu zukünftigen Leichtwasserreaktoren. Im vergangenen Jahr hat STARS seine Aktivitäten in den drei Hauptgebieten dynamisches Anlagenverhalten, Physik des Reaktorkerns und Brennstabverhalten fortgesetzt, wobei sowohl Arbeiten zur Entwicklung und Pflege fortgeschrittener numerischer Werkzeuge als auch ihr Einsatz zur Lösung angewandter Aufgaben auf Anforderung seitens des ENSI und der Kernkraftwerksbetreiber eingeschlossen waren.



Figur 1: Berechnete Entwicklung des äusseren Brennstabdurchmessers in der Umgebung eines unterstellten fehlenden Brennstoffpellets während der stabilisierten Kriechphase.

Als Beispiel werden im Folgenden die Untersuchungen von Brennstabschäden näher beschrieben, die im vergangenen Jahr im Auftrag des ENSI durchgeführt wurden. An einem der Schweizer Druckwasserreaktoren waren Brennstabschäden durch primäre Rissbildung und Fretting bzw. Abrieb mit sekundärer Rissbildung aufgetreten, deren Ursachen nicht vollständig verstanden wurden. Dabei wurde eine signifikante Schrumpfung der Hüllen einiger Brennstäbe bei moderaten Abbränden vorgefunden. Im Rahmen von STARS wurde daraufhin untersucht, ob realistische Annahmen über Abweichungen der lokalen Betriebsparameter der Brennstäbe eine derart signifikante Schrumpfung der Brennstabhüllen erklären und diese Deformationen zu den beobachteten Schäden führen können. Hierfür wurden hypothetische Annahmen über lokale Abweichungen der Parameter der Brennstoffpellets sowie der thermischen Arbeitsbedingungen der Brennstabhülle getroffen. So wurde z.B. unterstellt, dass Pellets an bestimmten Positionen ganz fehlen oder aber dass sich ein Pellet mit zu niedriger Anreicherung bis hin zu einem gänzlich passiven Pellet versehentlich im Brennstab befindet. Die Modellierung dieser Fälle ergab, dass unter den genannten Annahmen Regionen mit vergrössertem Brennstabdurchmesser gemeinsam mit den geschrumpften Bereichen auftreten würden (Fig. 1). Da dies nicht beobachtet wurde, konnten die genannten Fälle als Ursachen ausgeschlossen werden. Weitergehende Analysen haben ergeben, dass eine Verdichtung einzelner Pellets, ggf. kombiniert mit einer lokalen Überhitzung der Hülle und damit einer Erhöhung der Kriechraten des Hüllmaterials zu einer signifikanten Schrumpfung der Brennstabhülle führen können, und zwar bei den Abbränden der real betroffenen Brennstäbe. Im Ergebnis wurde eine Verringerung der Obergrenze für die Leistungsänderungsrate als Gegenmassnahme vorgeschlagen.

Die Forschungsaktivitäten zum Brennstabverhalten sind vorrangig auf die Erweiterung des Anwendungsbereichs des Rechenprogramms *Falcon* mit Blick auf das thermo-mechanische Verhalten von Hochabbrand-Brennstäben bei Kühlmittelverlust- und Reaktivitätsstörfällen gerichtet. 2009 wurden hierzu die Entwicklung und die Validierung von *Falcon*, gekoppelt mit dem Core-Modell GRSW-A, für reaktivitätsinduzierte Transienten fortgesetzt. Im Einzelnen wurden aktuelle Experimente am Forschungsreaktor NSRR (JAEA Japan) nachgerechnet. Es handelt sich dabei um zwei Reaktivitätsstörfall-Experimente, die bei Umgebungstemperatur und bei einer dem Reaktorbetrieb entsprechenden Temperatur durchgeführt wurden. Sie erlauben es, den Einfluss der Kühlmittelparameter (Druck und Temperatur), des Anfangsfülldrucks der Brennstäbe, der Dauer der Leistungsspitze und der Länge des mit Brennstoffpellets gefüllten Abschnitts des Brennstabs zu studieren. Durch Variation des Fülldrucks in den Modellrechnungen wurde nachgewiesen, dass der geringe Fülldruck der Brennstäbe bei den Experimenten am NSRR zu grösseren Abweichungen vom Brennstabverhalten im



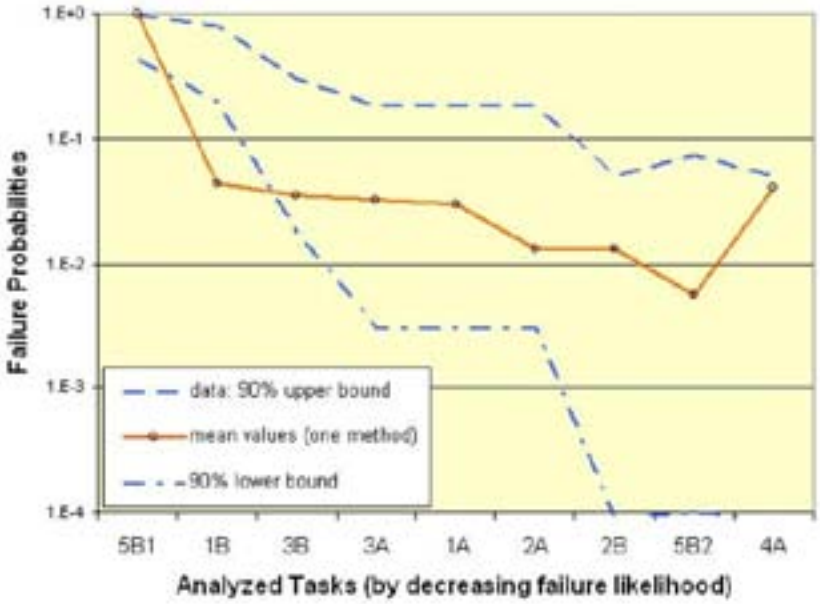
Figur 2: Berechnete Dynamik des Füllgasdrucks im Vergleich zur mechanischen Spannung in der Brennstabhülle während eines Reaktivitätsstörfall-Experiments für unterschiedliche Annahmen über den Anfangsfülldruck (Falcon-PSI).

Leistungsreaktor führt. So bleibt der Fülldruck während der Experimente stets unterhalb des Kühlmitteldrucks. Dies gilt sowohl für die Tests bei niedriger Temperatur, als auch für die Versuche bei hohen Kühlmittelparametern (Fig. 2 links). Dadurch ist bei den Experimenten nicht mit dem Aufblähen (Ballooning) der Brennstabhüllen zu rechnen. Im Gegensatz dazu wird für den für Druckwasserreaktor-Brennstäbe typischen Fülldruck (20 bar bei Umgebungstemperatur für Spitzenabbrände von ~70 MWd / kg U) ein drastisches Anwachsen der mechanischen Spannung in der Brennstabhülle vorhergesagt, der zu Hochtemperatur-Kriechen und damit zu Ballooning infolge der störfallbedingten Leistungsspitze führt (Fig. 2 rechts).

Risiko und menschliche Zuverlässigkeit (HRA) [2]

Probabilistische Sicherheitsanalysen benötigen häufig Abschätzungen von Versagenswahrscheinlichkeiten für nötige Eingriffe in sehr seltenen Unfallszenarien. Die Zuverlässigkeit solcher Eingriffe wird mittels überprüfter Verfahren für einen grossen Bereich von Unfällen und umfangreichen Operatorentrainings (einschliesslich Notfallszenarienerfahrung in prototypischen Simulatoren) teilweise gewährleistet. Für die Abschätzung der Erfolgswahrscheinlichkeit solcher Aufgaben werden für die HRA Analysenmethoden Expertenbegutachtungen einbezogen, da für die wichtigsten Einflussfaktoren und den Einfluss ihrer Verknüpfungen auf die Zuverlässigkeit zu viele Beobachtungen notwendig wären, um statistische Relevanz zu erreichen. In der internationalen empirischen HRA-Studie werden HRA-Analysenmethoden beurteilt, und zwar aufgrund eines Vergleichs zwischen der Anwendung der Analysenmethoden und den empirischen Daten aus einer Simulatorstudie. Die Daten repräsentieren die Leistungsfähigkeit von 14 lizenzierten Operatorenteams während vier verschiedenen Unfallszenarien in der Versuchssimulatoranlage des «OECD Halden Reaktor»-Projekts. Durch ENSI finanziert war PSI ein federführender Partner, sowohl bei der Gestaltung der Studie und deren Methodik, als auch bei der HRA-bezogenen Analyse der Simulatordaten. Zusammen mit der U.S. Nuclear Regulatory Commission (amerikanische Sicherheitsbehörde), Sandia National Laboratories, Scientech (im Auftrag vom U.S. Electric Power Research Institute) waren PSI und OECD Halden für die Koordination und die Durchführung der Beurteilungen zuständig. Werke, Aufsichtsbehörden und technisch/wissenschaftliche Organisationen haben die 12 Gruppen gebildet, welche mit der Anwendung der HRA-Analysenmethoden die Voraussagen erarbeitet haben.

Die Methode für die Bewertung wurde unter Berücksichtigung der schwachen statistischen Relevanz gestaltet, d.h. für eine Stichprobe mit nur 14 Ereignissen. In Fig. 3 sind die Vorhersagen einer der verwendeten Analysenmethode für einen Satz von Szenarien dargestellt. Die Versagenswahrscheinlichkeitsvoraussagen können mit den aus den empirischen Daten abgeleiteten Vertrauensbereichen (blaue Kurven) verglichen werden. Wie im rechten Teil von Fig. 3 ersichtlich ist, sind diese Bereiche sehr gross, falls nur wenige Versagensfälle beobachtet wurden. Andererseits wurde eine qualitative Analyse der Leistungsfähigkeiten der Teams durchgeführt, woraus sich eine Anordnung der Aufgaben gemäss ihrer relativen Schwierigkeit ergab (abnehmende Schwierigkeit von links nach rechts in Fig. 3). Dieser qualitative Vergleich stellt den Startpunkt für detaillierte quantitative Vergleiche dar. Die hier verwendete Bewertung basiert auf dem Prinzip, dass eine Analysenmethode nur zuverlässige quantitative Vorhersagen machen kann, wenn sie alle wichtigen Probleme und Schwierigkeiten identifiziert



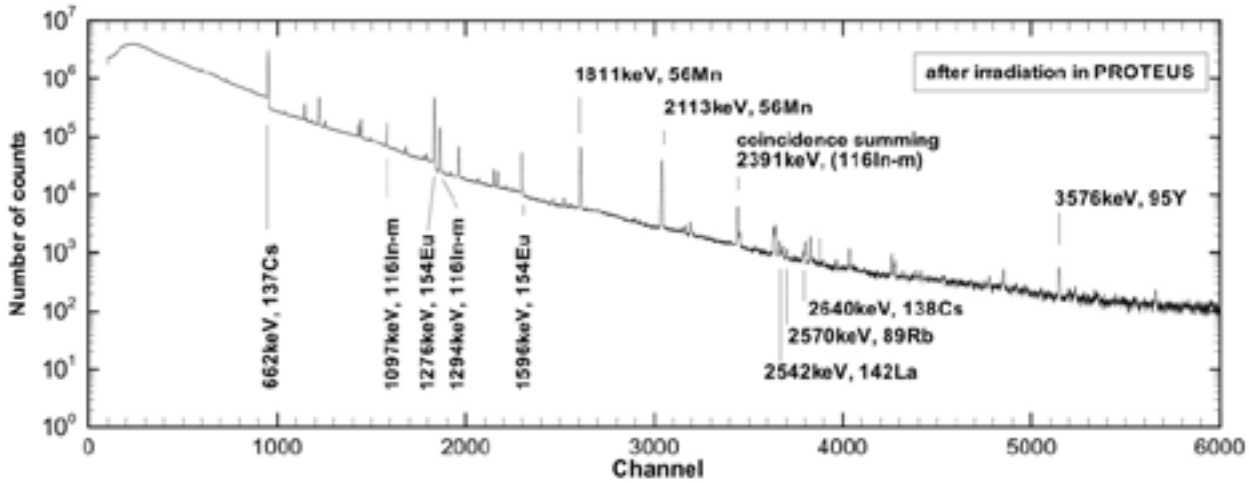
Figur 3: Vorhersage der Versagenswahrscheinlichkeiten mit einer ausgewählten HRA-Analysenmethode (Dampferzeugerheizrohrbruch-Szenarien).

(qualitative Vorhersage). Die niedrige Wahrscheinlichkeit für die zweite sowie die relative hohe Vorhersage für die letzte Aufgabe (siehe Fig. 3) deuten an, dass diese Analysemethode gewisse Faktoren falsch gewichtet oder einige Probleme nicht berücksichtigt. Die im Simulator erfassten Daten ermöglichten eine umfassende Bewertung der Analysenmethoden, die neben dem Vergleich der numerischen Resultate auch die zugrunde liegenden Ursachen für die Leistungsfähigkeit respektive Unzulänglichkeit der Methoden identifizieren konnte. Eine solche Bewertung der HRA Analysenmethoden unterstützt die risikoorientierte Entscheidungsfindung, indem sie eine gut fundierte Basis darstellt für die Wahl der Methoden in den Analysen.

Proteus – Life@Proteus Programme [3]

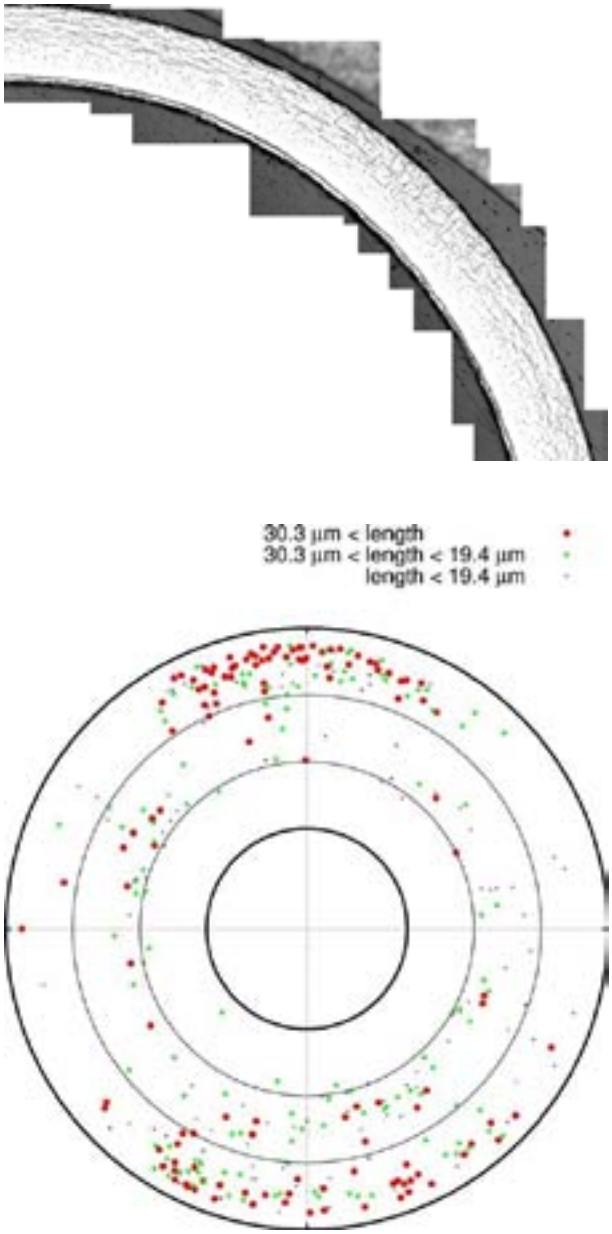
In die Testzone des Forschungsreaktors *Proteus* war im Berichtjahr 2009 ein Gitter geladen, das einen «Supercritical Water Cooled Reactor (SCWR)» simuliert. Diese Konfiguration besitzt den Vorteil, dass nur die eigenen Treiberstäbe (5 % angereichertes UO_2) benötigt wurden. Es wurden SCWR-typische Leistungsverteilungen und Reaktivitätswerte von einzelnen Brennstäben experimentell bestimmt. Zudem wurde das Testgitter genutzt, um neue Messtechniken für das geplante Experimentierprogramm «Life@Proteus» zu entwickeln.

Das wesentliche Ziel von Life@Proteus ist die Durchführung von Experimenten mit stark abgebrannten (40 MWd / kg U bis 60 MWd / kg U) und frischen DWR-Brennstoffstäbe, um die Physik des Übergangs zwischen frischem und abgebranntem DWR-Brennelement besser zu verstehen und die entsprechenden Rechenmethoden zu testen. Dazu wurden neue Messtechniken entwickelt, um die Leistungsverteilung auch in abgebrannten Brennstoff ermitteln zu können. Zum einem basieren die Techniken auf verzögerten Neutronen und zum andern auf von Spaltprodukten emittierten Gammastrahlen. Zur Weiterentwicklung beider Methoden erfolgten umfangreiche Bestrahlungen mit abgebrannten Brennstabsegmenten (Abbrand bis 64 MWd / kg U).



Figur 4: Beispiel eines Gammaspektrums eines abgebrannten Brennstabsegments nach der Bestrahlung im Proteus.

Mittels eines Transportbehälters und eines Probenwechslers wurden mehrere frische und abgebrannte Segmente in die Testzone des *Proteus* eingeführt und bestrahlt. In jedem Segment wurden die induzierten Spaltraten gemessen. Ein Beispiel eines Spektrums hoch energetischer Gammastrahlen (>2500 keV), die von kurzlebigen Spaltprodukten emittiert werden, ist in Fig. 4 dargestellt. Danach wurde die relative Leistung zwischen frischen und abgebrannten Segmenten abgeleitet, die in guter Übereinstimmung mit MCNPX-Rechnungen sind.



Figur 5: Schliffbild eines Hüllrohrabschnitts mit Hydriden (oben) und Verteilung radialer Hydride über dem gesamten Hüllrohr-Querschnitt nach thermo-mechanischer Belastung.

Für die geplanten anspruchsvollen Experimente mit grösseren Mengen von abgebranntem LWR-Brennstoff muss die gesamte Anlage modernisiert und der Reaktor neu ausgelegt werden. 2009 wurden Arbeiten zu Erdbebenanalysen und entsprechende Ertüchtigungsmassnahmen der Gebäudestrukturen lanciert. Dabei ist ein wesentliches Ziel, den Nachweis zu erbringen, dass *Proteus* eine Kernanlage mit geringem Gefährdungspotenzial bleibt. Vor dem Hintergrund gestiegener Anforderungen an Kernanlagen und des verbesserten Planungsstandes sind leider höhere als die ursprünglich veranschlagten Projektkosten zu erwarten.

Auf Grund der hohen Temperaturen an der Oberfläche von Brennstäben im Reaktor kommt es zur Dissoziation des den Brennstab umgebenden Wassers. Der freiwerdende Sauerstoff führt hauptsächlich zur Oxidation des Hüllrohrs, während ein Teil des frei werdenden Wasserstoffs in das aus einer Zirkonium-Legierung bestehende Hüllrohr diffundiert.

Bei hohen Temperaturen ist der Wasserstoff in Lösung. Wird jedoch die Löslichkeitsgrenze überschritten, so kommt es zu einer Ausscheidung des Wasserstoffs in Form von Hydriden. Die Hydride orientieren sich, beeinflusst durch die Textur des Hüllrohrs, in transversaler Richtung. Diese Orientierung kann bei ungünstigen Temperatur- und Druckverläufen aufgehoben werden. Es ist offensichtlich, dass Hydride, die in radialer Orientierung aneinandergereiht vorliegen, eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Hüllrohrs mit sich bringen: Alleine das mikroskopische Erscheinungsbild lässt bereits die Assoziation mit einem beginnenden Riss zu (Fig. 5).

Am PSI wurde eine Software entwickelt, die die Orientierung von Hydriden über den kompletten Umfang des Hüllrohrs anhand von Schliffbildern quantifiziert. Es konnte festgestellt werden, dass für die Umorientierung der Hydride der Wasserstoffgehalt in der Legierung, die mechanischen Spannungen sowie der Temperaturverlauf eine Rolle spielen. Der Einfluss der Bestrahlung auf die Hydrid-Umorientierung ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Integer (Bauteilsicherheit) [5]

Das Projekt *Integer* befasst sich mit Alterungsmechanismen in Druck führenden Primärkreislauf-

komponenten sowie mit deren möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer und Sicherheit von Kernkraftwerken und wird stark durch die Schweizer Aufsichtsbehörde ENSI und durch KKW finanziell unterstützt. Die thermo-mechanische Ermüdung (TMF) ist ein wichtiger Schädigungsmechanismus der mit zunehmendem Anlagenalter an Bedeutung gewinnt und vereinzelt auch zu Ermüdungsrissbildungen und Leckagen in Druck führenden Komponenten geführt hat.

Innerhalb der Projekte *Diagnostik-II* und *KORA-Ii* wird im Rahmen einer Dissertation die Rissbildung und das Kurzrisswachstum infolge TMF an Luft in zwei verschiedenen rostfreien Stählen, wie sie in Schweizer KKW zum Einsatz kommen, eingehend experimentell charakterisiert. Hauptziel dieser Doktorarbeit ist ein vertieftes, mikroskopisches Verständnis der der TMF zugrunde liegenden, metallphysikalischen Prozesse. Daneben liefern die Experimente einerseits Referenzprüfkörper mit TMF-Schädigung zur Kalibrierung unserer mikro-magnetischen Messmethoden zur TMF-Früherkennung im Rahmen von *Diagnostik-Ii*, und andererseits die TMF-Lebensdauerkurven an Luft, die wir als Vergleichsbasis zur Untersuchung des Einflusses des Reaktorkühlmittels auf die TMF-Rissbildung in *KORA-Ii* benötigen.

Zu diesem Zwecke wurde im Rahmen der Dissertation eine komplexe TMF-Versuchsanlage aufgebaut, die zurzeit für Versuche unter simulierten Reaktorkühlmittelbedingungen erweitert wird. Das TMF-Verhalten zweier verschiedener, rostfreier Stähle an Luft wurde zwischen 100 und 340 °C bei unterschiedlichen Dehnamplituden eingehend untersucht. Zu Vergleichszwecken wurden auch isotherme, niederzyklische, mechanische Ermüdungsversuche bei 100 und 340 °C durchgeführt.

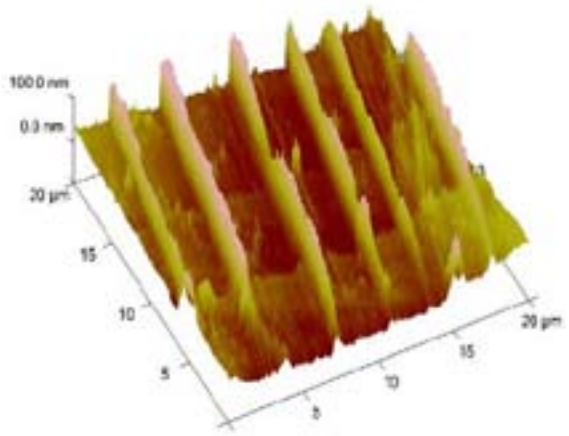
Die Entwicklung der Oberflächentopographie und Mikrostruktur während den TMF-Experimenten wurde mittels Atomkraft-, Licht- sowie Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie charakterisiert (Fig. 6). Aufgrund dieser mikroskopischen Untersuchungen kann eine schlüssige metallphysikalische Erklärung der Prozesse bei der TMF gegeben werden, was für die Entwicklung von zuverlässigeren, mechanistischen Lebensdauermodellen entscheidend ist. Trotz des stark unterschiedlichen, zyklisch-plastischen Verhaltens und der verschiedenen Rissbildungs- und Kurzrisswachstumsmechanismen unterscheidet sich die Ermüdungslebensdauer im untersuchten Parameterbereich für beide Werkstoffe und für thermo-mechanische und isotherme mechanische zyklische Beanspruchung aus technischer Sicht nur wenig. Dies gilt bei Kontakt zum Reaktorkühlmittel oder kleinen Dehnamplituden hingegen nicht mehr.

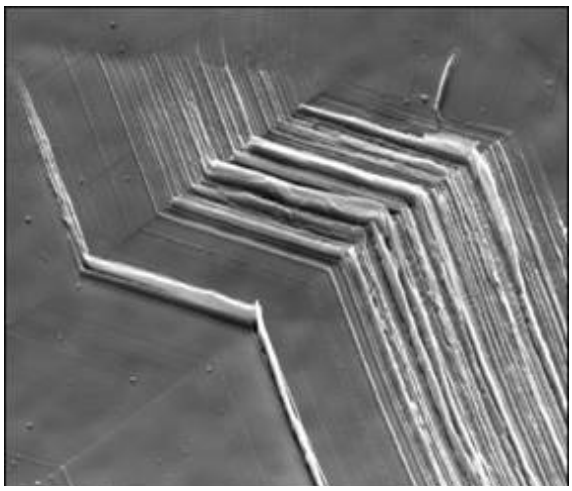
Forschung zu schweren Unfällen [6]

Förderung und Pflege von internationalen Kooperationen rund um das PSI-Projekt *Artist*.

Das Auftreten eines Dampferzeugerheizrohrbruchs (Steam Generator Tube Rupture, SGTR) in einem Druckwasserreaktor (DWR) kann sich zu einer besonderen Sicherheitsherausforderung entwickeln, wenn er sich in Kombination mit anderen Versagen ereignet, und damit möglicherweise zu einer direkten Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten in die Umgebung führen kann. Obwohl solche Ereignisse eine sehr kleine Eintretenswahrscheinlichkeit aufweisen, stellen diese so genannten Bypasssequenzen einen signifikanten – wenn nicht sogar dominanten – Beitrag zum öffentlichen Risiko dar. Die standardmässigen probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA) berücksichtigen typischerweise nur ein minimales oder gar kein Rückhaltevermögen der Spaltprodukte auf der Dampferzeugersekundärseite. Dies obwohl der Dampferzeuger mit seiner komplexen Geometrie eine grosse Oberfläche zum Einfangen von Spaltprodukten zur Verfügung stellt. Das Vorhandensein von Wasser rund um das Dampferzeugerheizrohrbündel kann die Rückhaltung zusätzlich vergrössern. Allerdings sind die verschiedenen Prozesse, welche die Rückhaltung kontrollieren, sehr komplex und es gibt weder zuverlässige physikalische Modelle noch empirische Daten, um qualifizierte Abschätzungen durchzuführen.

Das PSI hat bereits im Jahre 2000 das experimentelle und analytische Projekt *Artist* (Aerosol Trapping in a Steam Generator) lanciert, um die verschiedensten und unterschiedlichsten Aspekte der Aktivitätsrückhaltung auf der Sekundärseite von Dampferzeugern zu untersuchen. Von 2000 bis 2002 waren die Untersuchungen die zentrale Aktivität im Projekt SGTR des 5. Forschungsrahmenprogramms der EU, in welchem neben dem PSI VTT and Fortum (beide Finnland), NRG (Holland), ReJ (Tschechische Republik) and Ciemat (Spanien) teilgenommen haben. Der Schwerpunkt der Untersuchungen war der Einfluss des Flutens der





Figur 6: Ausbildung von Oberflächen-Extrusionen und Transmission von persistenten Gleitbändern an Zwillingskorngrenze in rostfreiem Stahl infolge TMF.

Sekundärseite eines Dampferzeugers mit Wasser auf die Rückhaltung von Aerosolen.

Von 2002 bis 2008 waren die Aktivitäten in einem internationalen Projekt mit mehr als 12 finanziell beteiligten Partnern (US-NRC (USA), JNES (Japan), IRSN (Frankreich), Ringhals und SKI (Schweden), HSE (UK), AVN (Belgien), Ciemat, CSN und Polytechnische Universität Madrid (Spanien), ENSI, KKB und KKG (Schweiz), VTT (Finnland)) unter der Führung des PSI organisiert. Die zweite Phase dieses Projekts startete im Jahre 2009 und wird bis Ende 2011 dauern. Neben der Teilnahme der meisten Partner aus der ersten Phase, sind einige wenige Organisationen neu zum Projekt gestossen. Die verfügbaren Resultate sind bereits in die Risikoberechnungen einbezogen worden und haben die Nützlichkeit der gemessenen Aktivitätsrückhaltefaktoren der verschiedenen Komponenten der Dampferzeugersekundärseite bereits demonstriert. Das Potenzial für eine grosse Reduktion im Vergleich zu den Quelltermen von Nureg 1150[1] ist für einen typischen DWR in Fig. 7 dargestellt. Das Projekt hat neben den Daten für die Modellentwicklung und die Bewertung von Sicherheitsberechnungen auch neue Themen für fundamentale Untersuchungen identifiziert. Entsprechend wurden acht Dissertationen (4 am PSI und 4 bei Partnern) and zwei Masterarbeiten (beide bei Partnern) lanciert und zu einem grossen Teil bereits erfolgreich abgeschlossen.

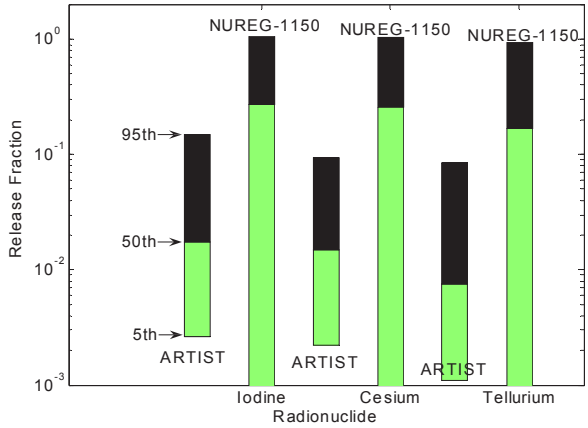
[1] Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants (Nureg-1150), 1990.

Entsorgung radioaktiver Abfälle [7]

Eine wichtige Komponente des Multi-Barrierenkonzepts für Endlager für radioaktive Abfälle ist die Bentonitverfüllung, die die Behälter mit verglastem hochradioaktiven Abfall und abgebrannten Brennelementen im Wirtsgestein umgibt. Bentonit zeichnet sich durch ein sehr hohes Rückhaltevermögen für Radionuklide aus, da sie auf den Bentonitoberflächen sorbieren und damit immobil werden. Berechnungen in Sicherheitsanalysen zeigen, dass viele Radionuklide schon im Bentonit zerfallen. Das Rückhaltevermögen wird in bisherigen Sicherheitsanalysen durch einen konstanten, radionuklidspezifischen Parameter, dem sogenannten Sorptionskoeffizienten (k_D-Wert) charakterisiert, der in Batch-Sorptions-Experimenten für jeweils einzelne Radionuklide bestimmt wird. Neuere geochemische Experimente haben jedoch gezeigt, dass radionuklidspezifische k_D-Werte auch von der Konzentration von gleichwertigen Radionukliden und Hauptionen im Porenwasser abhängen. Es zeigte sich z.B., dass der k_D-Wert von Ni(II) von der Konzentration von anderen zweiwertigen Ionen (Co(II), Mn(II), …) abhängt. Diese kompetitiven Sorptionseffekte sind in bisherigen Sicherheitsanalysen nicht berücksichtigt worden.

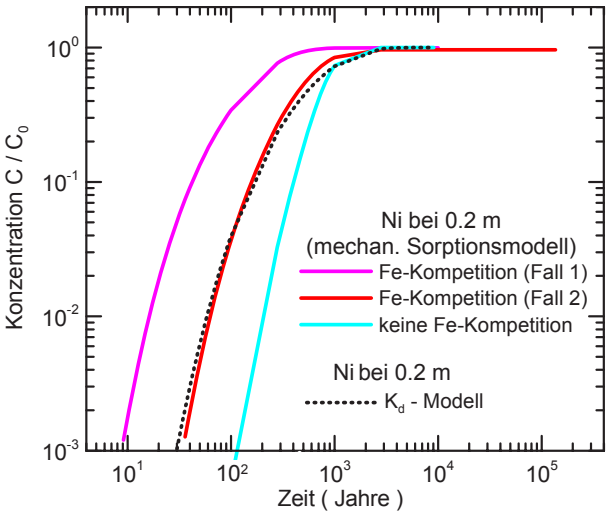
Ein mechanistisches Sorptionsmodell, welches diese kompetitiven Sorptionsprozesse berücksichtigt, und die dazugehörige Datenbank konnten jetzt in den reaktiven Transportcode MCOTAC integriert werden. Damit war es erstmalig möglich, den Einfluss von kompetitiven Sorptionsprozessen auf die Diffusion von Ni(II) durch Bentonit unter Berücksichtigung der Fe(II)-Konzentration zu untersuchen

und mit den Ergebnissen vom herkömmlichen k_D-Konzept zu vergleichen. Die ein-dimensionalen Berechnungen waren für ein geochemisches System, in dem Ni(II) von der Behälteroberfläche bei x = 0 m in den Bentonit diffundiert, wobei die gesamte Porenwasserchemie, die Diffusion von allen Wasserinhaltsstoffen sowie Oberflächenkomplexierungs- und Ionenaustauschreaktionen im Bentonit gleichzeitig mit berücksichtigt wurden. Die Berechnungen erfolgten dann für verschiedene Fe(II) Konzentrationen. Letztere ergeben sich aus der Annahme, dass das Bentonit Porenwasser bzgl. Siderit gesättigt ist, bzw. dass durch Behälterkorrosion weiteres Fe(II) in den Bentonit diffundieren kann. Die Resultate sind in Fig. 8 gezeigt.



Figur 7: Machbarkeit der Risikoreduzierung anhand von Artist-Rückhaltedaten bei spontanen Dampferzeugerheizrohrbrüchen.

Die relative Ni-Konzentration steigt im Bentonit bei x = 0,2 m umso früher an, je höher die Fe(II)-Konzentration im Bentonit-Porenwasser ist, d.h. umso grösser die kompetitiven Sorptionseffekte sind. Ni(II) kann weniger Sorptionsplätze belegen, da diese bevorzugt mit Fe(II) belegt sind. Wird die kompetitive Sorption Ni(II)–Fe(II) vernachlässigt, erfolgt der Ni-Anstieg am Spätesten. Der Vergleich mit dem k_D-Konzept zeigt, abhängig von der Fe(II)-Konzentration, grosse Abweichungen im zeitlichen Beginn des Ni-Anstieg gegenüber den Berechnungen mit dem mechanistischen Sorptionsmodell. Da aber die Fe(II)-Konzentration im Nahfeld eines geologischen Tiefenlagers für hoch radioaktive Abfälle mit der Zeit variieren kann, z.B. durch Behälterkorrosion und Mineralreaktionen, kann eine detaillierte Berechnung der Ni bzw. Radionukliddiffusion nur mit einem reaktiven Transportmodell erfolgen, welches kompetitive Sorptionsprozesse berücksichtigt.



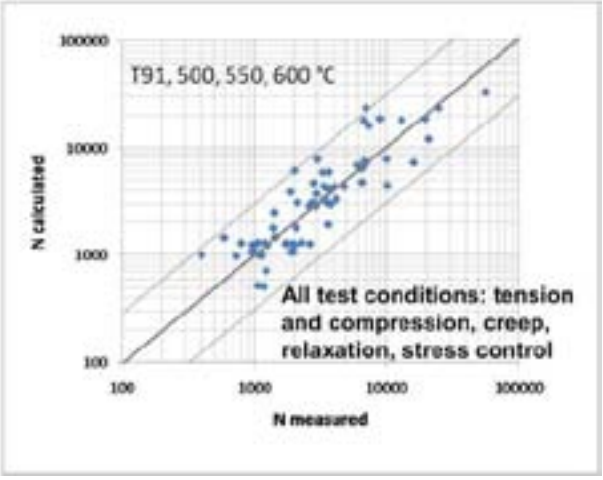
Figur 8: Mit MCOTAC und integriertem mechanistischen Sorptionsmodell berechnete Ni-Konzentration bei x = 0,2 m im Bentonit für verschiedene Fe(II)-Konzentrationen im Vergleich zu Berechnungen mit dem k_D-Konzept. Fall 1: Die Fe(II)-Konzentration im Porenwasser ist bestimmt durch die Löslichkeit von Siderit. Fall 2: Die Fe(II)-Konzentration im Porenwasser ist durch eine 10-mal kleinere Löslichkeit als die von Siderit bestimmt. Die Ni-Konzentration ist $C_0 = 10^{-5}$ M am Rand und zu Beginn 10^{-10} M im Bentonit.

Sicherheitsbezogene Merkmale zukünftiger Reaktorkonzepte

Hochtemperaturmaterialien [8]

Im Rahmen der Forschungsarbeiten zu Hochleistungswerkstoffen für zukünftige Nuklearanlagen (Generation IV) werden Lebensdauer bestimmende Schädigungsmechanismen für relevante Komponenten untersucht. Für das Reaktordruckgefäss zukünftiger Hochtemperaturreaktoren stehen neben den traditionellen Stählen für Leichtwasserreaktoren auch fortschrittliche, martensitische Stähle (modifizierter 9Cr–1Mo Stahl, Grade 91) zur Diskussion. Der Stahl «Grade 91» hat eine weit höhere Kriechbeständigkeit und er wäre daher bevorzugter Kandidat für ein Reaktordruckgefäss, dessen Werkstofftemperatur im Betrieb 400 °C erreicht oder sogar überschreitet. In diesem Temperaturbereich kann aber bei hohen Spannungen Kriechschädigung auftreten. Diese Kriechverformung tritt entweder bei konstanter Spannung auf, oder – als Relaxation –, wenn die Verschiebungen (bzw. Dehnungen) konstant bleiben (wie etwa am Kerbgrund). Technisch besonders bedeutsam ist der Fall der Kombi-Belastung Ermüdung–Kriechen, die dann auftritt, wenn transiente Spannungen, wie sie beim An- und Abfahren vorkommen, während des Betriebs eine Kriechspannung überlagert wird. Obwohl seit

ca. vierzig Jahren im traditionellen Anlagenbau (Flugtriebwerke, Dampf- und Gasturbinen, Kessel) nach Designregeln für diese Art der Belastung geforscht wird, ist man bisher über die Verwendung einer einfachen, linearen Schadensakkumulation noch nicht hinausgekommen. Im Rahmen einer ASME-Designcode-Entwicklung für Hochtemperaturreaktoren bestehen Tendenzen, diese einfache lineare Schadenregel durch besser fundierte Konzepte zu ersetzen. Der Werkstoff «Grade 91» stellt nun insofern eine besondere Herausforderung dar, als seine Streckgrenze durch zyklische Belastung absinkt (zyklische Entfestigung), was wiederum einen Einfluss auf die Kriecheigenschaften hat. Es wurde ein Modell (Strain Range Separation) entwickelt, das unter diesen Bedingungen eine sehr gute Vorhersage der Kriech-Ermüdungslebensdauer ermöglicht, wie in Fig. 9 gezeigt wird.



Figur 9: Vergleich von gemessenen Lebensdauern unter Kriech-Ermüdungsbelastung mit denen, die nach der «Strain Range Separation»-Methode bestimmt wurden. Das Streuband entspricht den Erwartungen aus reinen Ermüdungsversuchen.

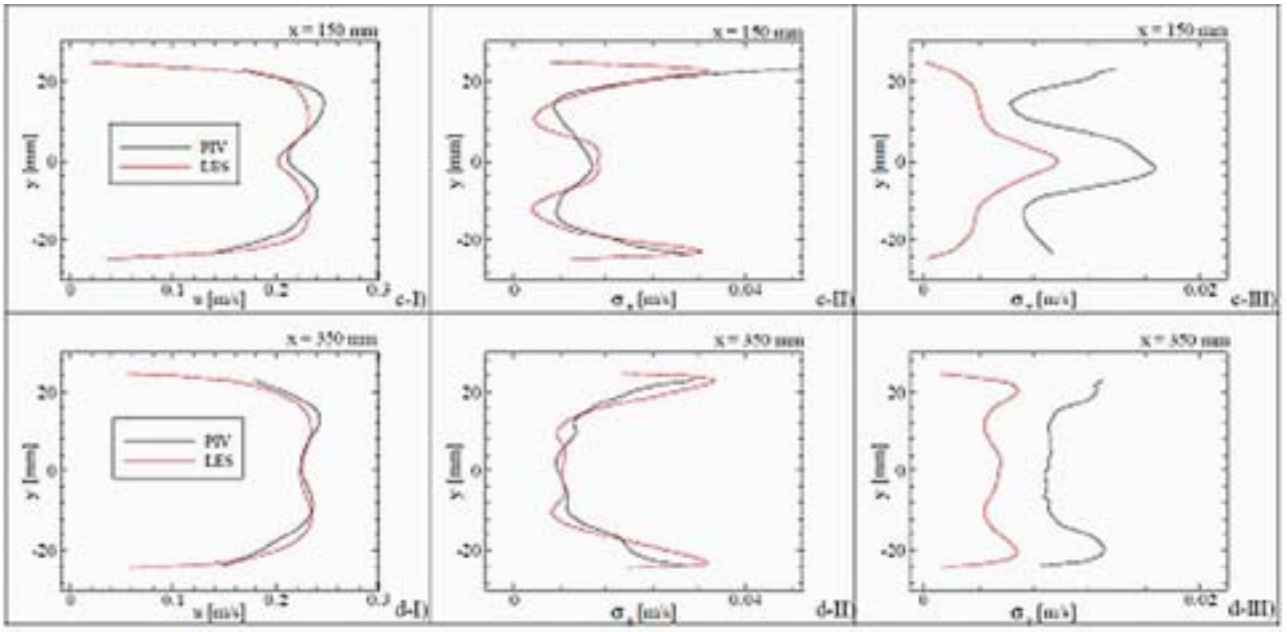
Alpha [9]

Das Labor für Thermohydraulik führt im Rahmen des PLiM-Projekts (Plant Life Management) Untersuchungen zur thermischen Ermüdung von typischen Komponenten in Kernkraftwerken durch. Wird ein Werkstoff zyklischen thermischen Belastungen ausgesetzt, ermüdet er, und dies kann zu Rissbildung führen. Ein besonders schwierig zu beschreibender Fall ist das Vermischen zweier Flüssigkeitsströme unterschiedlicher Temperatur, z.B. in T-Stücken. Um die Lebensdauer der betrachteten Komponente vorhersagen zu können, ist die Kenntnis der Temperaturfluktuationen durch die Vermischung essentiell. Um das fundamentale Verständnis der turbulenten Vermischung und der daraus induzierten thermischen Belastungen zu erweitern, wird im Labor das Mischen zweier mittels Trennplatte geteilter Wasserströme in einem Kanal mit Temperatur- und Dichtedifferenz mit experimentellen und numerischen Methoden untersucht. In der GEMIX-Anlage (Generic Mixing Experiment) wird das Geschwindigkeitsfeld im Kanals mittels PIV (Particle Image Velocimetry) gemessen. Simultan kann mit Gittersensoren das Konzentrationsfeld (als Analogon zum Temperaturfeld), welches Aufschluss über die Vermischung gibt, gemessen werden.

Durch diese simultanen Messungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung kann die turbulente Vermischung im Detail analysiert und charakterisiert werden. Mittels CFD (Computational Fluid Dynamics) werden die Strömungs- und Konzentrationsfelder im GEMIX-Kanal berechnet. Da die direkte numerische Lösung der zugrunde liegenden Impuls- und Skalartransportgleichungen für solch komplexe Strömungssituationen zu rechenintensiv ist, muss auf Turbulenzmodelle zurückgegriffen werden. Im vorliegenden Fall wird hierfür die Grobstruktursimulation (LES, Large Eddy Simulation) verwendet. Fig. 10 zeigt den Vergleich experimenteller und numerischer Daten 150 mm hinter der Trennplatte (obere Reihe) und 350 mm hinter der Trennplatte (untere Reihe). Das mittlere Strömungsprofil (dargestellt in der linken Spalte) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Um das Mischverhalten beider Flüssigkeitsströme zu charakterisieren ist die Varianz der Fluktuationen der Geschwindigkeitskomponenten in Strömungsrichtung (mittlere Spalte) und normal zur Strömung (rechte Spalte) aufgetragen. Auch hier ist eine qualitative Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation zu erkennen, quantitativ wird die Komponente normal zur Strömung im Experiment überbestimmt. Durch diese kombinierte Anwendung von experimentellen und numerischen Methoden ist es möglich, komplexe Strömungsphänomene eingehend zu untersuchen und die eingesetzten Turbulenzmodelle zu überprüfen.

Fast [10]

Vergleich von neutronischen und sicherheitsrelevanten Parametern im Gleichgewichtsbrennstoffzyklus für fortgeschrittene Reaktoren der vierten



Figur 10: Vergleich experimenteller und numerischer Ergebnisse für eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 0,2 m/s, 150 mm hinter der Trennplatte (obere Reihe) und 350 mm hinter der Trennplatte (untere Reihe). Aufgetragen ist das mittlere Strömungsprofil (linke Spalte), die Varianz der Fluktuationen der Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung (mittlere Spalte) und normal zur Strömungsrichtung (rechte Spalte).

Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR).

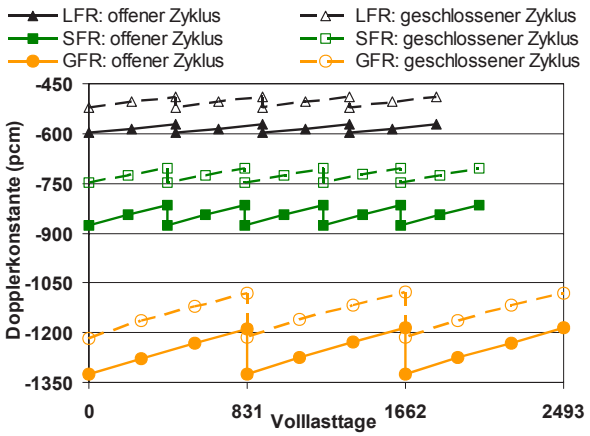
Die fortgeschrittenen Reaktorkonzepte der vierten Generation mit schnellem Neutronenspektrum sollten in der Lage sein, ihren eigenen Brennstoff aus schlecht spaltbarem ^{238}U zu erzeugen und die minoren Aktinide aus ihrem abgebrannten Brennstoff zu reziklieren. Dieses Recycling, oder eigentlich die vollständige Schliessung des Brennstoffzyklus', kann die Menge an langlebigem radioaktivem Abfall stark reduzieren und die Nachhaltigkeit von Uran als Brennstoff erheblich erhöhen. Es hat jedoch einen negativen Einfluss auf die sicherheitsrelevanten Reaktoreigenschaften.

Bei mehrmaligem periodischem Ablauf des Brennstoffzyklus (Abbrand, Abkühlung und Aufarbeitung) konvergiert der Brennstoff zu einem Gleichgewicht. Im Projekt FAST wurde eine numerische Prozedur EQL3D (*EQuilibrium fuel cycLe procedure*) zur Analyse von Gleichgewichtsbrennstoffzyklen entwickelt. Diese Prozedur nutzt die Vorteile des *Eranos 2.1 Code* und kann vorerst für zwei Gleichgewichtszenarien angewendet werden: für einen offenen und einen geschlossenen Brennstoffzyklus. In beiden Fällen wird ein spezifisches Brennstoffmanagement explizit simuliert bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Die Prozedur kann typischerweise 33 Energiegruppen für den Neutronenfluss und eine hexagonal-z-3D-Kerngeometrie simulieren. Diese Geometrie erlaubt es, den Gleichgewichtsbrennstoffzyklus für komplexe Kernladungsszenarien zu charakterisieren.

Die Ziele dieser Studie sind (1) die EQL3D-Prozedur für den gasgekühlten schnellen Reaktor (GFR), den natriumgekühlten schnellen Reaktor (SFR) und den bleigekühlten schnellen Reaktor (LFR) anzuwenden, (2) die Bestätigung der Möglichkeit den GFR, SFR and LFR mit einem geschlossenen Brennstoffzyklus zu betreiben und (3) die berechneten Gleichgewichtsparameter der verschiedenen Systeme (Reaktivität beim Gleichgewicht, Brutverhältnis, Brennstoffzusammensetzung und sicherheitsrelevante Parameter) zu vergleichen. Für die drei betrachteten Kerne wurde eine Kernbeladungsstrategie gewählt, bei der die Brennelemente mit gleicher Abbrandgeschichte immer ringförmig gruppiert sind. Die Resultate wurden für einen offenen und einen geschlossenen (mit Natururan als Zusatzmaterial) Brennstoffzyklus verglichen. Die auslegungsspezifischen Zyklen für den GFR, SFR und LFR bestehen aus 3, 5 und 4 Kampagnen mit 2493, 2050 and 1824 Volllasttagen.

Die Tauglichkeit der drei Systeme mit einem geschlossenen ^{238}U–^{239}Pu-Brennstoffzyklus zu arbeiten, wurde bestätigt. Des Weiteren wurde herausgefunden, dass im Gleichgewicht alle drei Systeme

als «Iso-Brüter» arbeiten und die Menge an produziertem ^{239}Pu gleich der Menge an verbranntem ^{239}Pu ist. Als Konsequenz: auch die Verhältnisse der ^{239}Pu/^{238}U-Massen sind ähnlich für alle drei Kerne (~0,12), obwohl dieses Verhältnis vom Brennstoffzusatz und dem Neutronenspektrum abhängt. Die Schliessung des Brennstoffzyklus hat auch negative Folgen für die sicherheitsrelevanten Parameter der verschiedenen Kerne. Als Illustration dient Fig. 11, in der die Dopplerkonstanten für den offenen und den geschlossenen Brennstoffzyklus verglichen werden. Trotz der ähnlichen ^{239}Pu/^{238}U-Verhältnisse unterscheiden sich die sicherheitsrelevanten Parameter der Systeme sehr. Dies ist hauptsächlich auf die verschiedenen Neutronenspektren und Kühlmittel (Voidkoeffizient) zurückzuführen. Trotzdem zeigt sich, dass alle drei Kerne (nach Optimierung) als nachhaltige und saubere Energiequelle genutzt werden können.



Figur 11: Dopplerkonstante für LFR-, SFR- und GFR-Reaktoren in offenem und geschlossenem Brennstoffkreislauf während ihres spezifischen Kernzyklus Technologiebewertung [11].

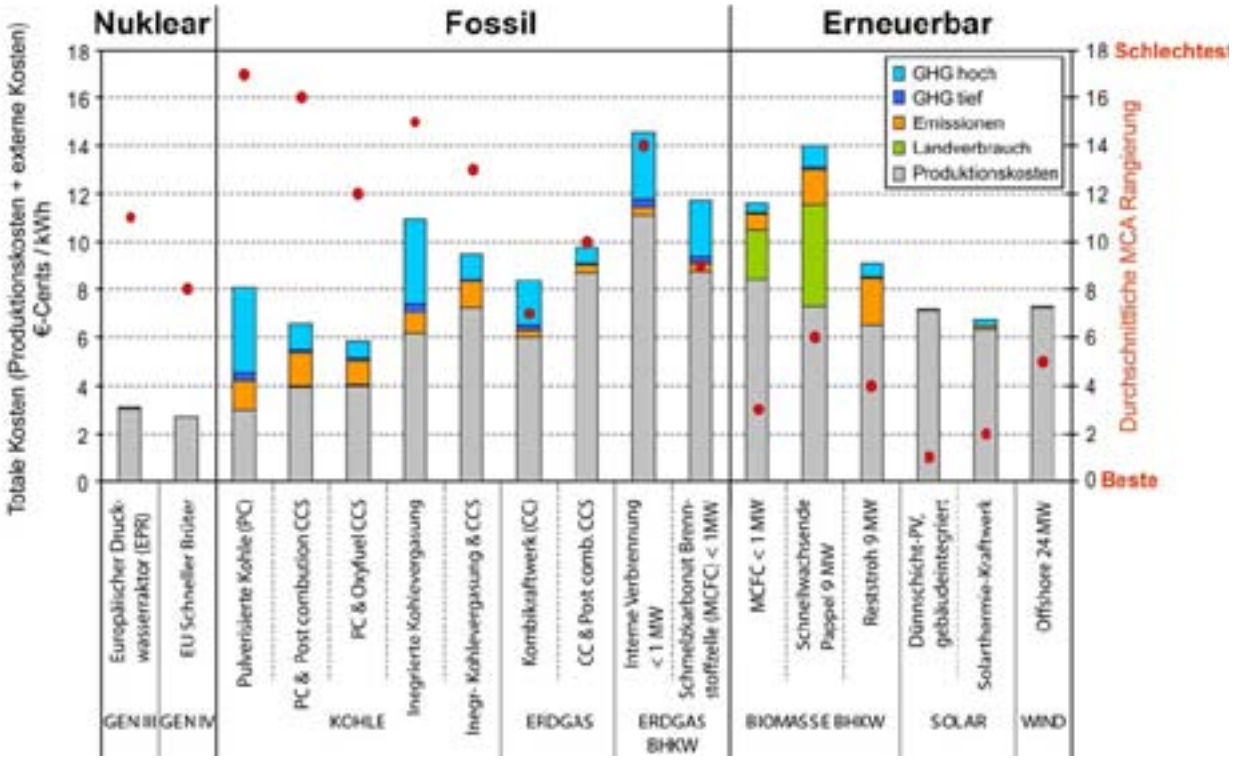
Die *Technologie Assessment Gruppe* war 2009 in eine Vielzahl von Projekten involviert: Europäische Forschungsprojekte zu Nachhaltigkeit und Energiesicherheit (NEEDS, SECURE); Forschung im Verbund mit den ETH-Kompetenzzentren zu CO_2-Management bei der Stromerzeugung (CARMA); Emissionen durch Biomasseverbrennung (*Imbalance*); Arbeiten im Rahmen von Ecoinvent; Beiträge zum *Energietrialog Schweiz*; und eine Reihe von kleineren Projekten für Industrie und Behörden.

Im Projekt NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability) wurde die Nachhaltigkeit von insgesamt 26 Stromerzeugungstechnologien für das Jahr 2050 anhand von 36 Indikatoren bewertet, welche die umweltbezogenen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekte der Nachhaltigkeit erfassen. Fig. 12 zeigt die aggregierten Durchschnittsresultate der Multikriterienanalyse (MCA), basierend auf den Nachhaltigkeitsindikatoren und deren Gewichtung durch verschiedene Anspruchsgruppen.

Zusätzlich werden die Technologie-Rangfolgen der MCA und der Gesamtkostenrechnung einander gegenübergestellt. Innerhalb des externe Kosten Bewertungsrahmen weist die Kernenergie die tiefsten Gesamtkosten (Produktionskosten und externe Kosten) auf, während sie bei der MCA eine mittlere Rangierung erreicht, wofür primär gewisse soziale Aspekte verantwortlich sind, die in den externen Kosten nur bedingt reflektiert sind. Deshalb rangiert die Kernenergie zumeist tiefer als die Erneuerbaren, da bei letzteren in der MCA von einer stark verbesserten Wirtschaftlichkeit ausgegangen wird. Erneuerbare (insbesondere solare Technologien) zeigen ein stabileres Verhalten in der MCA, da ihre Rangierung im Gegensatz zu fossilen Technologien und Kernenergie weniger durch Änderungen der Stakeholder-Gewichtungsprofile beeinflusst wird. Kohle schneidet generell schlechter ab als Erdgas-Kombikraftwerke, die sich im Mittelfeld platzieren, ähnlich wie Kernenergie. Fossile Technologien mit «Carbon Capture and Storage» (CCS) können besser oder schlechter abschneiden als die entsprechenden Technologien ohne CCS, je nach verwendeter CCS-Option.

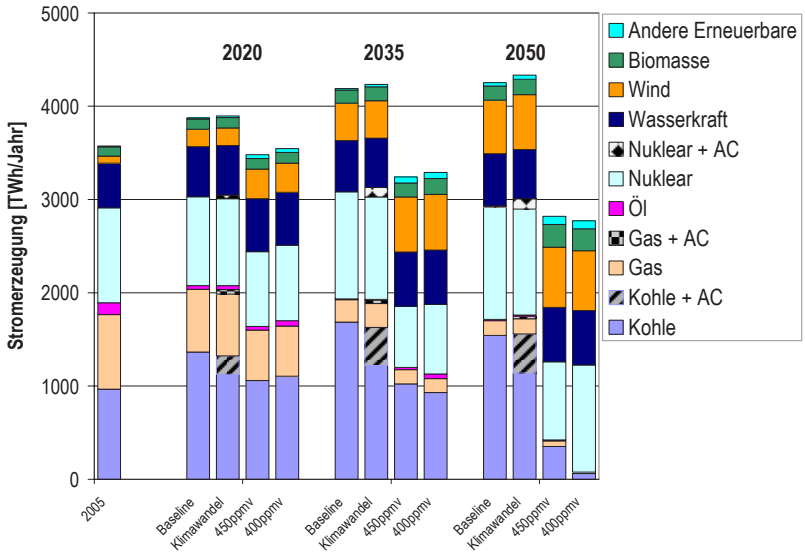
Energiewirtschaft [12]

In der Forschungsgruppe Energiewirtschaft (EEG) werden quantitative Analysen von Energiesystemen auf schweizerischer, europäischer und globaler Ebene zur Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen Energie, Ökonomie, Umwelt und Technik durchgeführt. Als Beispiel wurde in der Berichtsperiode das Modell EuroMM entwickelt, welches den Europäischen Energiesektor repräsentiert. Das Modell beschreibt verschiedene fossile Kraftwerkstypen mit und ohne CCS-Ausstattung zur Stromerzeugung, Technologien basierend auf erneuerbaren Energien und Nuklear-Technologien sowie das Stromnetz. Als Ergänzung sind weitere Energieumwandlungstechnologien (Raffinerien und Produktionstechnologien für Wasserstoff und Bio-Treibstoffe) im Modell



Figur 12: Durchschnittliche MCA-Rangierung und Gesamtkosten für ausgewählte Stromerzeugungstechnologien im Jahr 2050. GEN III: fortschrittliche Kernreaktoren; GEN IV: zukünftige Reaktorkonzepte; CCS: CO_2-Abscheidung und Speicherung. Quelle: S. Hirschberg et al. (2009).

beschrieben. Das Modell EuroMM wurde im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts ADAM entwickelt und genutzt, um den Einfluss des Klimawandels auf den Energiesektor zu quantifizieren sowie Strategien aufzuzeigen, wie der Ausstoss des Treibhausgases CO_2 reduziert werden kann, um Emissionsreduktionsziele zu erreichen.



Figur 13: Stromerzeugung basierend auf verschiedenen Energieträgern für vier Szenarien (Baseline, Klimawandel, 450 ppmv und 400 ppmv CO_2-eq Emissionsreduktion). AC bezeichnet neue Kühlsysteme bei thermischer Stromerzeugung. «Andere Erneuerbare» umfassen Technologien im Bereich Solar, Geothermie und Ozean.

In den erstmals in dieser Form durchgeführten Untersuchungen zur Abschätzung des Einflusses des Klimawandels auf den Energiesektor wurden Faktoren wie die Abnahme der thermischen Effizienz und die Verfügbarkeit von thermischen Kraftwerken analysiert sowie Änderungen der Stromerzeugung aus Wasserkraftwerken auch im Hinblick auf saisonale Verschiebungen berücksichtigt.

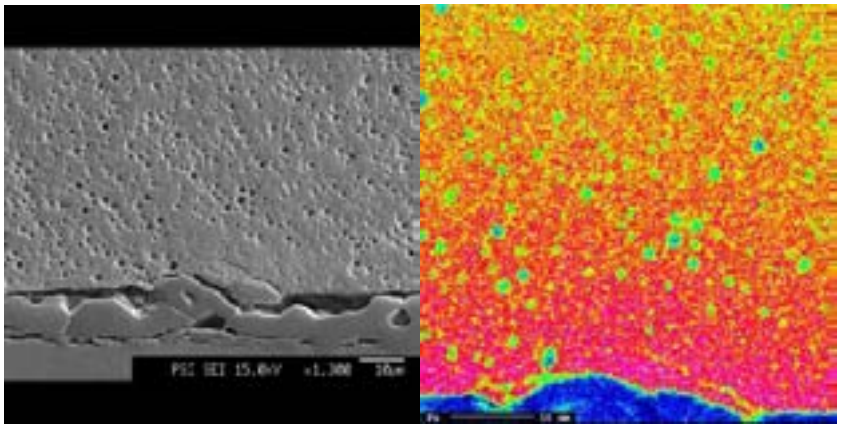
Des weiteren wurden erhöhte Stromübertragungsverluste sowie die erwartete Verschiebung der Stromnachfrage vom Winter- in die Sommermonate modelliert. Die untersuchten Emissionsreduktions-

szenarien beschreiben die Entwicklung des Energiesektors unter der Bedingung, dass die Treibhausgas-Konzentrationen bei 450 ppmv bzw. 400 ppmv CO_2-eq stabilisiert werden. Die Resultate zeigen, dass die ambitionierten Emissionsreduktionsziele technisch erreicht werden können (Fig. 13), der Stromsektor in Europa jedoch praktisch vollständig dekarbonisiert werden muss. In allen untersuchten Szenarien (Klimawandel und Emissionsreduktionsziele) werden vergleichbare Kosten im Energiesektor erwartet. Um dies zu erreichen, muss in den Emissionsreduktionsszenarien die Energienachfrage reduziert werden, was die gesamten Investitionskosten reduziert und es müssen fossile Kraftwerke durch teurere CO_2-neutrale Kraftwerke ersetzt werden. Unter dem Einfluss des Klimawandels werden steigende Kosten erwartet, da eine stärkere Nachfrage erwartet wird, die Investitionen in mehr neue Kraftwerke und den Ersatz alter Kraftwerke nötig macht.

Forschungseinrichtungen

Hotlabor [13]

Das PSI-Hotlabor ist als einzige schweizerische Forschungsanlage zur Bearbeitung und Untersuchung aller Arten von radioaktiven Materialien und stark radioaktiver Komponenten (oder Teilen davon) von Kraftwerken und Forschungs-Beschleunigeranlagen ausgerüstet. Als PSI-Grossanlage ist es gemäss Kernenergieverordnung eine der schweizerischen Kernanlagen und erfüllt die für solche Anlagen erforderlichen Sicherheitsstandards. Seit Anfang 2008 ist die neue PSI-Abteilung Hotlabor (AHL) zuständig für die Operation des Labors.



Figur 14: Untersuchung einer bestrahlten Brennstoffprobe mit dem neuen EPMA im Hotlabor; links: Sekundärelektronenbild der Probe; rechts: Plutonium Verteilungsbild am Übergang Hüllrohr / Brennstofftablette.

Die Anlage wird von ca. 35 Mitarbeitenden betrieben, die verantwortlich für die Hausinstallationen, die *Heissen Zellen* aber auch für die anspruchsvollen fortschrittlichen Instrumentalanalytiken sind. Die hauptsächlich bearbeiteten wissenschaftlichen Dienstleistungs- und Forschungsschwerpunkte bestehen in der

- Kleinstprobenvorbereitung von bestrahlen hoch radioaktiven Keramiken und Metallen für externe Benutzer;
- Charakterisierung des Bestrahlungsverhaltens von heutigen und fortschrittlichen LWR-Brennstäben;
- Analyse von verschiedenen Ablagerungen auf Reaktorkomponenten (z.B. Brennstoffe und Hüllrohre);
- Beurteilung der Radionuklidausbreitung aus einem zukünftigen Abfall-Endlager;
- Eignungsabklärung von Containments aus einer Blei/Bismuth-Legierung für das PSI-Spallationstarget.

Im Berichtsjahr wurde die analytische Infrastruktur des Labors mit der Inbetriebnahme des neuen Elektronenstrahl-Mikro-Analysators (EPMA) weiter verbessert. Diese neue Einrichtung erlaubt detaillierte Analysen an hoch radioaktiven Materialien inklusiv bestrahlten Brennstoffen (Fig. 14).

Nationale Zusammenarbeit

Viele der im NES durchgeführten Projekte werden aufgrund ihrer Thematik in enger Zusammenarbeit mit den Betreibern der Schweizer Kernkraftwerke, der Elektrizitätswirtschaft und dem ENSI durchgeführt. Arbeiten zur Entsorgung radioaktiver Abfälle finden in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der Nagra statt. Aufgrund gemeinsamer Projekte und der engen personellen Verbindungen mit den Schweizer Universitäten, den Eidgenössischen Technischen Hochschulen sowie einer Vielzahl von Fachhochschulen ergeben sich auch im Bereich der Ausbildung enge Verbindungen, insbesondere auch im Rahmen von Dissertationen, Master- und Diplomarbeiten sowie von Semesterarbeiten.

Internationale Zusammenarbeit

Alle im NES laufenden und oben aufgeführten Projekte finden im Rahmen intensiver internationaler Zusammenarbeiten statt. Über die Beteiligung an Projekten internationaler Organisationen wie der Euratom, der OECD/NEA, des Internationalen Forums der Reaktor-Generation IV und der IAEA sowie durch direkte vertragliche Vereinbarungen ergeben sich Zusammenarbeiten mit rund 30 Partnern aus etwa 10 Ländern, wobei sowohl alle wichtigen Forschungsinstitutionen wie auch die grössten Hersteller von Nuklearsystemen, aber auch diverse Aufsichtsbehörden vertreten sind. Eine detaillierte Auflistung befindet sich auf: http://nes.web.psi.ch/int_cooperations.html.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Im Jahr 2009 wurden die Ziele aller Projekte erreicht. Die beiden neuen Organisationseinheiten, das Labor für Nukleare Materialien (LNM), das sich der nuklearen Materialforschung widmet, und die Abteilung Hotlabor (AHL), welche die PSI-Grossanlage Hotlabor mit Ihrer Infrastruktur betreibt, haben, nach ihrem erfolgreichen Start per 1. Januar 2008 ihren Normalbetrieb innerhalb des Bereichs NES aufgenommen. Der im Jahre 2008 eingesetzte starke Personalwechsel wurde ausgezeichnet bewältigt und hat u.a. zum Ersatz von etwa der Hälfte der Leitungsfunktionen geführt.

Trotz der erhöhten Nachfrage nach verschiedenartigen Fachleuten im Nuklearbereich ist es dem NES gelungen, seine Mannschaft durch sehr geeignetes Personal zu ergänzen. Das erfreulich gestartete neue Master-Ausbildungsangebot der beiden Technischen Hochschulen (ETHZ und EPFL), das sich im zweiten Durchführungsjahr befindet, gibt gute Hoffnung, dass sich das abzeichnende Personalnachwuchsproblem im Nuklearbereich befriedigend auffangen lassen wird.

Auf der Vertragsseite wurden im Jahre 2009 mehrere Verträge mit dem ENSI erneuert, u.a. für die Projekte STARS, KORA, MELCOR und PISA; ebenso wurden zwei neue Projekte mit dem Thema neue Reaktoren vereinbart. Für das Projekt ARTIST wurde eine zweite Projektphase mit über zehn internationalen Partnern vertraglich vereinbart. Eine Verlängerung des bestehenden Zusammenarbeitsvertrags mit der Areva NP mit dem Thema Siedewasserreaktor der dritten Generation, inklusive einer Doktorarbeit, ist in Vorbereitung.

Im Rahmen der EU-Forschungsprogramme wurden 2009 vier neue Projekte gestartet: *Getmat*, *CP-ESFR*, *Catclay*, und *Actnet-I3*. Zusätzlich ist das Projekt *Ercosam*, bei dem NES erstmals als Projektkoordinator auftritt, nach seiner generellen Bewilligung zurzeit in den Vertragsverhandlungen mit der EU-Kommission.

Besonders hervorzuheben ist auch die Vereinbarung mehrerer zweijähriger Arbeitsprogramme mit Swissnuclear im Rahmen des Vertrags zur Förderung der Kernenergieforschung und der Nachwuchsförderung. Sie sichern die Fortführung von

NES-Forschungsarbeiten in verschiedenen wichtigen und interessanten Gebieten. Nach dem Abschluss eines Rahmenvertrags mit Resun hinsichtlich der geplanten neuen Schweizer Kernkraftwerke, ist zurzeit ein erstes Arbeitsprogramm in Verhandlung.

Neben den fortlaufenden Projektarbeiten werden auch im Jahre 2010 verschiedene auslaufende Verträge erneuert werden müssen, um die Kontinuität in den einzelnen Forschungsgebieten aufrecht zu erhalten. Eine wichtige Aktivität werden die Arbeiten zur Aufrüstung des Nullleistungsreaktor Proteus und zur Erlangung der entsprechenden Baubewilligung darstellen. Nach dem Abschluss der ersten Etappe des Energie-Trialogs, werden mögliche Beiträge des PSI zur nächsten Trialog-Etappe diskutiert werden. Bezüglich des OECD-Projekts *SETH-2*, stehen umfangreiche Arbeiten zu Projektvorschlägen und Partnerabsprachen hinsichtlich einer Verlängerung nach 2010 an.

Liste der F+E-Projekte

[1] H. Ferroukhi, (hakim.ferroukhi@psi.ch), PSI, Villigen, Stars, http://stars.web.psi.ch

[2] V. N. Dang (vinh.dang@psi.ch), PSI, Villigen, HRA, http://safe.web.psi.ch

[3] G. Perret (gregory.perret@psi.ch), PSI, Villigen, Life@Proteus; http://proteus.web.psi.ch

[4] J. Bertsch (johannes.bertsch@psi.ch), PSI, Villigen, Nukleare Brennstoffe, http://lnm.web.psi.ch/ssi/lnm_projects_nf.html

[5] H. P. Seifert, (hanspeter.seifert@psi.ch), PSI, Villigen, Integer, http://lnm.web.psi.ch/ssi/lnm_projects_cs.html

[6] S. Güntay, (salih.guentay@psi.ch), PSI, Villigen, Forschung zu schweren Unfällen, http://sacre.web.psi.ch

[7] M. Bradbury (michael.bradbury@psi.ch), PSI, Villigen, Entsorgung radioaktiver Abfälle, http://les.web.psi.ch/groups/index.html

[8] W. Hoffelner (wolfgang.hoffelner@psi.ch), PSI, Villigen, Hochtemperaturmaterialien, http://lnm.web.psi.ch/ssi/lnm_projects_htm.html

[9] H-M. Prasser (horst-michael.prasser@psi.ch), PSI, Villigen, Alpha, http://lth.web.psi.ch/LTH.htm

[10] K. Mikityuk (konstantin.mikityuk@psi.ch), PSI, Villigen, Fast, http://fast.web.psi.ch

[11] P. Burgherr, (peter.burgherr@psi.ch), PSI, Villigen, Technology Assessment, http://gabe.web.psi.ch

[12] H. Turton, (hal.turton@psi.ch), PSI, Villigen, Energy Economics, http://eem.web.psi.ch/.

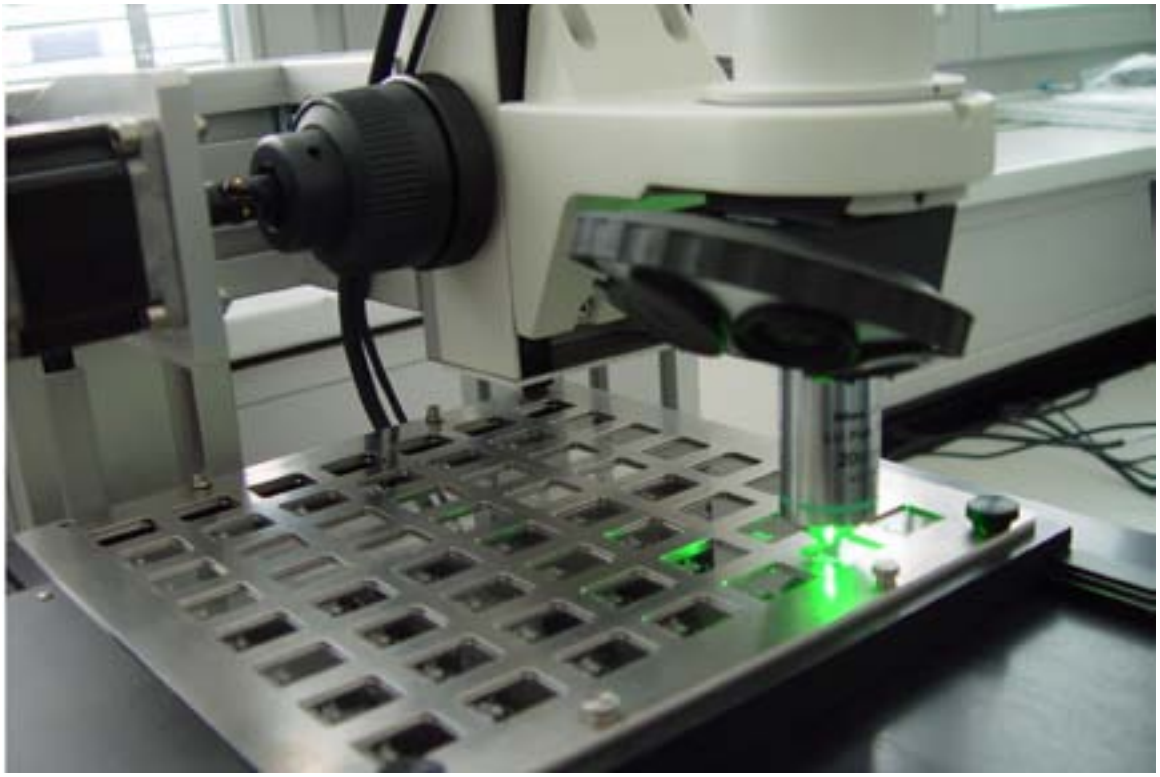
[13] D. Gavillet (didier.gavillet@psi.ch), PSI, Villigen, Hotlabor, http://lwv.web.psi.ch/lwv/hotlab.shtml

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Forschungsprogramm Regulatorische Sicherheitsforschung

Reiner Mailänder

reiner.mailaender@ensi.ch



Projekt Strahlenmesstechnik

Auswertung des Detektormaterials CR-39 für die Personen-Neutronendosimetrie. Auf das Detektormaterial einfallende Neutronen hinterlassen darin Spuren. Sie werden in einem chemischen Ätzprozess sichtbar gemacht und mittels computergestützter Bildanalyse und digitaler Mikroskopie ausgewertet. Dazu wird das hier gezeigte TASL-System mit Mikroskop und Objekt-Tisch verwendet. (Quelle: PSI)

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung vergibt und koordiniert das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) Forschungsaufträge mit dem Ziel, den aktuellen wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand zu ermitteln, zu erweitern und für die Aufsicht verfügbar zu machen. Diese Forschungsprojekte tragen zu Erhaltung und Ausbau der hohen Sicherheit der Schweizer Kernanlagen bei. Das ENSI betreibt nationale und internationale Forschungsprojekte in den vier folgenden Themenbereichen:

- Im Bereich **Reaktorsicherheit** stehen die Materialforschung für die Alterungsüberwachung sowie die Forschung über Stör- und Unfälle zur Weiterentwicklung von Sicherheitsanalysen im Vordergrund. Zudem beteiligt sich das ENSI an einer Reihe von internationalen Datenbankprojekten und erhält so Informationen über Ursachen, Häufigkeit und Verläufen von Störfällen.
- Der **Strahlenschutz** dient dem Schutz des Personals, der Bevölkerung und der Umgebung der Kernanlagen vor ionisierender Strahlung. Hier liegen die Schwerpunkte in den Bereichen Strahlenmesstechnik und Radioanalytik.
- Im Bereich **Entsorgung** geht es um die Untersuchung geeigneter Gesteinsformationen für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle. Zudem werden die in einem Tiefenlager ablaufenden physikalisch-chemischen Prozesse betrachtet, um Einschluss- und Rückhaltungsvermögen der technischen und natürlichen Barrieren zu bestimmen.
- **Mensch, Organisation und Sicherheitskultur** haben einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherheit einer Kernanlage. Die dazu vom ENSI unterstützten Forschungsprojekte beschäftigen sich mit dem Einfluss menschlicher Handlungen in Störfallsituationen und mit Anforderungsprofilen für das Personal von Kernkraftwerken (KKW).

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Reaktorsicherheit

KORA – Korrosionsrisswachstum in austenitischen Strukturwerkstoffen [1]: KORA beschäftigt sich mit Alterungsvorgängen an Stahlkomponenten des Primärkreislaufs von KKW, namentlich mit zwei Prozessen: Spannungsrisskorrosion und Korrosionsermüdung. Spannungsrisskorrosion kann lange und dünne verzweigte Risse hervorrufen, die mit dem blossen Auge nicht zu erkennen sind. Einflussfaktoren sind mechanische Belastungen, die Umgebung (Wasserchemie des Primärkreislaufs) und die Werkstoffeigenschaften. Korrosionsermüdung ist eine ähnliche Form des umgebungsbedingten Risswachstums als Folge zyklischer mechanischer Belastung, z. B. durch Schwingungen. Die Ergebnisse des Projekts sollen auch dazu beitragen, Anforderungen für den Langzeitbetrieb der KKW festzulegen. Das Projekt KORA gliedert sich in der zweiten Phase 2009-11 in drei Teilprojekte:

- Das Teilprojekt I (Korrosionsermüdung in austenitischen Stählen) beschäftigte sich 2009 mit Initiierungsprozessen von Ermüdungsrissen, insbesondere bei langen Phasen konstanter Belastung im Anschluss an schnell ablaufende Transeinten. Zudem wurden zwei neue Prüfstände konzipiert und einer davon bereits aufgebaut (Fig. 1). Die Prüfstände sind für Untersuchungen zur Schwingrisskorrosion an durchströmten Hohlproben ausgelegt, wobei die Umgebungs- und Lastbedingungen im KKW nachgebildet werden.
- Im Teilprojekt II geht es um Spannungsrisskorrosion in Schweissnähten aus hoch und niedrig legierten Stählen (Mischnähten). Es wurden Testkörper für zerstörungsfreie Prüfungen erzeugt, mit denen die Prüftechnik weiterentwickelt werden soll.
- Das Teilprojekt III befasst sich mit der zerstörungsfreien Messung der Initiierung von Spannungskorrosionsrissen in rostfreien und niedrig legierten Stählen. Dazu wurde die zuvor aufgebaute Messtechnik zum elektrochemischen Rauschen weiter optimiert.

PISA – Pressure Vessel Integrity and Safety Analysis [2]: Für Langzeitbetrieb der Schweizer Kernkraftwerke ist nachzuweisen, dass die Integrität des

Reaktordruckbehälters (RDB) für Normalbetrieb, Betriebsstörungen und postulierte Störfälle gewährleistet bleibt. Das Projekt *PISA* wurde 2009 als Nachfolger des Projekts *Diagnostik* begonnen. Es soll den Wissensstand auf dem Gebiet der Sprödbruch-Sicherheitsnachweise des RDB analysieren. Daraufhin werden erweiterte Messungen und Modellberechnungen zur Strukturintegrität des RDB unter Langzeitbedingungen durchgeführt.

Das Projekt umfasst folgende Teile:

- Untersuchungen zu fortschrittlichen Messmethoden mit dem Ziel, den Versprödungsgrad des RDB-Materials zerstörungsfrei zu bestimmen. Die im Vorgängerprojekt als aussichtsreich eingestufte Messung des thermoelektrischen Effekts (Seebeck-Koeffizient) soll messtechnisch verbessert werden. Erste Anpassungen des Versuchsaufbaus im Jahre 2009 zeigten eine deutliche Reduzierung der Messwertstreuung und eine höhere Reproduzierbarkeit für Einzelmessungen.
- Es wurden Literaturstudien begonnen zum aktuellen Kenntnisstand der Schädigungsmechanismen und Modelle der mikrostrukturellen Vorgänge bei Neutronenbestrahlung von RDB-Stählen.
- Schliesslich wurden Untersuchungen zu probabilistischen Methoden gestartet, die im Rahmen der Sicherheits- und Sprödbruch-Sicherheitsnachweise des RDB eingesetzt werden können. Mittels Vergleichstests werden Software-Module hinsichtlich Tauglichkeit für Sicherheitsanalysen zur Werkstoffalterung evaluiert.

Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern für den Langzeitbetrieb von Kernkraftwerken [3]: Der RDB altert vor allem in Form von Versprödung, welche durch die Neutronenbestrahlung hervorgerufen wird. Deshalb müssen die Materialeigenschaften des RDB im Rahmen der Überwachung durchgängig gemessen und bewertet werden. In den laufenden Anlagen bestehen die Überwachungsprogramme aus Proben des Grundwerkstoffs und der Schweissmaterialien des RDB. Diese Proben werden mit mechanischen und bruchmechanischen Werkstoffprüferfahren geprüft. Bei der klassischen Methode zur Bewertung der Neutronenversprödung, dem RT_{NDT}-Konzept, wird eine materialspezifische Referenztemperatur und deren bestrahlungsinduzierte Verschiebung zur Justierung einer universellen Bruchzähigkeitskurve ermittelt. Die Bewertung basiert auf Messwerten aus dem Kerbschlagbiegeversuch.

Figur 1: Die neu entwickelte Einrichtung für Versuche zur thermomechanischen Ermüdung von Werkstoffen unter Umgebungs- und Lastbedingungen im KKW (Quelle: PSI)

In der im Oktober 2009 abgeschlossenen Projektphase wurde eine alternative Methode untersucht, die bereits in den USA als Standard (ASTM E1921) verwendet wird. Dieses so genannte Masterkurve(MC)-Konzept beschreibt die Temperaturabhängigkeit der Bruchzähigkeit K_{Jc} im spröd-duktilen Übergangsbereich ferritischer Stähle auf probabilistischer Grundlage. Sie basiert auf einer statistisch definierten Universalkurve, die mit einer Referenztemperatur T_0 werkstoffspezifisch justiert werden kann. Dabei wird T_0 direkt aus bruchmechanischen Versuchen mit Kleinproben ermittelt. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die MC-Referenztemperatur T_0 mit guter Genauigkeit weitgehend unabhängig von der Probengrösse und Risslänge bestimmt werden kann. Differenzen von T_0 von ca. 15 Kelvin ergaben sich bei der Verwendung von verschiedenen Probentypen, Biegeproben und Kompaktzugproben. Dieser Unterschied ist je nach Probentyp bei der Festlegung der unteren Grenzkurve der Bruchzähigkeit zu berücksichtigen. Mit dem MC-Konzept steht eine alternative bruchmechanische Methode zur Verfügung, die im Rahmen des Sprödbruch-Sicherheitsnachweises angewendet werden kann. Der Vorteil der Methode besteht in der Übertragbarkeit der T_0-Bestimmung auf grosse Bauteile und der Verwendung von Kleinproben, die in den Bestrahlungskapseln im Reaktor vorhanden sind. Die Ergebnisse gehen in das neue Regelwerk des ENSI ein.

Machbarkeitsstudie für zerstörungsfreie Messungen an der Stahldruckschale des Primär-Containments von Kernkraftwerken [4]: Der Primärkreislauf inklusive Reaktordruckbehälter wird im Rahmen der gestaffelten Sicherheitsbarrieren von einer Stahldruckschale umschlossen. Diese ist je nach Konstruktion des Kernkraftwerks im Auflagebereich des Fundaments sowohl von der inneren wie auch der äusseren Oberfläche direkt von einem Betonmantel umgeben.

Da es durch unerwartete Borsäure-Einwirkung zu lokalen Korrosionsangriffen an der Stahldruckschale kommen kann, ist eine periodische Überprüfung auf mögliche Wanddickenabnahmen wichtig. Die dafür übliche Ultraschallmessung ist an den frei zugänglichen Bereichen der Stahldruckschale relativ einfach, nicht dagegen in den vom Fundament umgebenen Bereichen. Dort werden bisher an ausgewählten Stellen Betonkernbohrungen durchgeführt, die nach Abschluss der Messungen wieder verschlossen werden.

Das ENSI hat zur Beurteilung von neuartigen Prüfverfahren an einer verdeckten Stahldruckschale im Jahre 2009 eine Machbarkeitsstudie gestartet. Dazu wird an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) ein Testkörper aufgebaut, welcher die schwierige Prüfsituation nachbilden soll. Dieser besteht aus einem massiven Stahlblech, in das unterschiedliche Fehlstellen eingebracht sind und das zum Teil in direktem Kontakt mit armiertem Beton einschliesslich Zwischenschichten aus Mineralwolle steht. An dem Testkörper sollen unterschiedliche zerstörungsfreie Messverfahren theoretisch und experimentell hinsichtlich ihrer Eignung zur Inspektion von verdeckter Korrosion an einer Stahldruckschale überprüft werden.

STARS V – Safety Research in Relation to Transient Analysis for the Reactors in Switzerland [5]: Die Aufgabe des seit 1988 laufenden STARS-Projekts ist die Pflege und Weiterentwicklung von Methoden und Rechenprogrammen für die Durchführung von deterministischen Sicherheitsanalysen. STARS führt stationäre und störfallbedingte neutronenphysikalische und thermohydraulische Berechnungen für Systeme, Reaktorkerne und andere Konfigurationen wie Lager oder Behälter durch und unterstützt so das ENSI bei der Beurteilung der Einhaltung des gestaffelten Sicherheitskonzepts als auch der Wirksamkeit (Integrität) der hintereinander gestaffelten Barrieren der Kernkraftwerke. Neu kam 2009 die Hilfe beim Aufbau der ENSI-Sektion «Deterministische Sicherheitsanalysen» hinzu. Die im Jahre 2009 durchgeführten Forschungsarbeiten umfassten:

- Im Bereich Brennstoffverhalten wurde das Rechenprogramm *Falcon* durch die Implementierung experimentell validierter physikalischer Modelle weiter entwickelt.
- Für den Bereich Systemtechnik wurden die bestehenden Modellierungen aller Schweizerischen Kernanlagen auf das Rechenprogramm *Trace* übertragen, dem aktuellsten Programm für die Simulation des Systemverhaltens von Leichtwasserreaktoren. Die Modelle wurden anhand bestehender Anlagendaten, durch die Nachrechnung von Experimenten an grosstechnischen Versuchsanlagen und durch den Vergleich mit anderen bereits überprüften Rechenprogrammen validiert. Ein langfristiges Ziel ist zudem die Einführung integraler Analysemethoden, mit denen beispielsweise physikalische Modelle, der Detaillierungsgrad der räumlichen

Modellierung und die Schnittstellen zwischen den Analyseprogrammen problemspezifisch herangezogen werden (multi-physics). Als Prototyp wurde eine Prozedur entwickelt, mit der ein 3D-Modell des RDB des *European Pressurized Water Reactors* (EPR) generiert werden konnte. Schliesslich wurden Anwendungen von CFD-Programmen (Computational Fluid Dynamics) für den EPR und den Siedewasserreaktor BWR/6 (KKW Leibstadt) entwickelt.

– Der Bereich Reaktorkern beschäftigte sich mit der Quantifizierung von Unsicherheiten bei der Analyse von Reaktorkern- und Anlagentransienten bei der Verwendung von multi-physics-Programmsystemen. STARS beteiligte sich an einem OECD-Vergleichstest mit der Analyse von Auswirkungen der Unsicherheiten von Wirkungsquerschnittsdaten (Mass für die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung von Neutronen mit Atomkernen). Dabei werden die direkten Unsicherheiten der Wirkungsquerschnitte ebenso betrachtet wie diejenigen ihrer Modellierung in einem dynamischen 3D-Reaktormodell. Die Berechnung des nuklearen Aufheizvorgangs eines Siedewasserreaktors zeigte die erwartet starke Abhängigkeit des Reaktor-Leistungsverlaufs von den Wirkungsquerschnitten, da bei kleinen Leistungen die Wechselwirkung zwischen nuklearen und thermohydraulischen Effekten stark ist.

OECD SCIP – Studsvik Cladding Integrity Project [6]: Die Hüllrohre der Brennelemente umschliessen den als Tabletten (Pellets) vorliegenden nuklearen Brennstoff und bilden die primäre Barriere gegen die Freisetzung von radioaktiven Spaltprodukten. Sie müssen vielfältigen Belastungen standhalten, insbesondere bei erhöhten Abbränden. Das ENSI beteiligt sich zusammen mit 24 anderen Organisationen seit Mitte des Jahres 2009 am OECD-Projekt SCIP. Dieses befasst sich mit den wichtigsten Schädigungsmechanismen, die in den Hüllrohren aus Zirkoniumlegierungen – auch unter Einbeziehung des Pelleteinflusses – ablaufen können. Dazu werden Versuche sowohl am Forschungsreaktor Studsvik in Schweden als auch am Halden-Reaktor in Norwegen durchgeführt. Das Projekt SCIP lief in einer ersten Phase von 2004 bis Mitte 2009. Bis Ende 2009 wurde das Programm der auf fünf Jahre angesetzten Projektphase II konkretisiert, die sich vor allem mit folgenden Themen beschäftigen wird:

– *Mechanische Interaktion zwischen Brennstoff und Hüllroh*r: Die Brennstofftabletten verändern bei Leistungsänderungen ihre Form und können dadurch stellenweise starken Druck auf das Hüllrohr ausüben.

– *Interaktion zwischen Brennstoff und Hüllrohr durch Spannungsrisskorrosion*: Beim Betrieb anfallende gasförmige Spaltprodukte werden teilweise aus der festen oxidischen Tablettenmatrix in die Hohlräume im Inneren des Hüllrohrs freigesetzt. Beim Kontakt mit dem Hüllrohr können sie besonders an mechanisch beanspruchten Stellen die Rissbildung fördern (Spannungsrisskorrosion).

– *Durch Wasserstoff induzierte Hüllrohr-Schwächung*: Wasserstoff wird bei der Korrosion des Hüllrohrs freigesetzt und dringt von aussen in die Zirkoniumlegierung des Hüllrohrs ein. Dabei kann der Wasserstoff in Hydridform zu einer allgemeinen Versprödung des Hüllrohrs führen oder die Rissbildung von aussen forcieren.

MELCOR – Überprüfung und Weiterentwicklung des Rechencodes MELCOR für die Analyse schwerer Unfälle in Leichtwasserreaktoren [7]: Das Rechenprogramm MELCOR dient der Simulation von schweren Unfällen in Leichtwasserreaktoren. Es bildet Unfälle vom einleitenden Ereignis bis zur Freisetzung radioaktiver Substanzen in die Umgebung ab und wird laufend den aktuellen Erkenntnissen der Unfallforschung angepasst.

Als besonders bedeutsam für die Beschreibung von schweren Unfällen gilt die Oxidation der Brennstoff-Hüllrohre bei trocken gelegten Brennstäben im Reaktorbehälter oder im Brennstofflagerbecken. Das Phänomen kann zu beschleunigter Kernzerstörung und erhöhter Freisetzung von Spaltprodukten führen. Typischerweise erfolgt die Oxidation unter sauerstoffreichen Bedingungen anfänglich sehr schnell und geht mit dem Anwachsen der schützenden Oxidschicht nach einigen Minuten in einen linearen Verlauf über. Bei Temperatursprüngen können Teile der dickeren Oxidschicht jedoch abbrechen, womit sich an diesen Stellen die Oxidationsreaktion wieder beschleunigt. Auf der Grundlage von Experimenten am Forschungszentrum Karlsruhe wurde am PSI für diesen physikalischen Prozess ein genaueres Modell entwickelt. Das Modell wird nun in MELCOR implementiert und auf seine Kompatibilität mit dem Standard MELCOR-Modell getestet.

MSWI – Melt-Structure-Water Interactions during Severe Accidents in LWR [8]: Das Projekt liefert Erkenntnisse zu den komplexen Abläufen bei schweren Unfällen insbesondere in Siedewasserreaktoren, auf deren Grundlage möglichst präzise Modellierungen erstellt werden. Die Stossrichtung liegt auf einem möglichst umfassenden Verständnis des Zusammenspiels der Prozesse bei einer Kernschmelze und auf der Anwendbarkeit der Resultate. Dadurch werden z.B. belastbarere Quantifizierungen des Risikos einer grossen Freisetzung radioaktiver Stoffe möglich. Sie sind wichtig für Entscheide über technische Nachrüstungen sowie bei der Optimierung von Unfallbeherrschungsstrategien und der Notfallplanung. In den vier Projektbereichen wurden 2009 folgende Ergebnisse erzielt:

- *Kühlbarkeit einer Kernschmelze im RDB und Unfallbeherrschungsstrategien (INCOSAM)*: Mittels des im Projekt erweiterten Rechenprogramms RELAP wurde die Wirksamkeit der Steuerstabsantriebskühlung auf den Wärmetransfer in der Kernschmelze simuliert. Im Zentrum stand, wie stark der Wasserdurchfluss gegenüber normalem Durchfluss zu erhöhen ist, um ein Kriechversagen der Steuerstab-Führungsrohre zu verhindern.
- *Formation von Schmelzpartikelschüttungen inner- und ausserhalb des RDB (DEFOR)*: Basierend auf Versuchsreihen zur Porosität der Kernschmelze, welche von verschiedenen Faktoren abhängt, wurde eine numerische Simulation weiter entwickelt. Mit diesem können die verschiedenen Rückkopplungs- und Selbstorganisationsprozesse in der Schmelzpartikelschüttung analysiert werden.
- *Kühlbarkeit der Schmelzpartikelschüttung inner- und ausserhalb des RDB (POMECO)*: Es wurden Versuche zur Charakterisierung der Druckverluste von Flüssigkeitsströmungen in Partikelschüttungen durchgeführt. Darauf aufbauend wurde ein Modell für die Simulation dieser Prozesse ermittelt.
- *Risikobeurteilung von Dampfexplosionen beim Eintritt von Kernschmelze in Wasser (SERA)*: Es wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein einzelner Tropfen eines geschmolzenen oxidischen Ersatzmaterials in eine Wasservorlage fällt. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei Temperaturen, die rund 200 °C über dem Schmelzpunkt lagen, energiereiche Dampfexplosionen stattfanden.

OECD Halden Reactor Project (HRP), Teil Brennstoff- und Materialverhalten [9]: Am OECD Halden Reactor Project (HRP) nehmen über 130 Wissenschafts-, Behörden- und Industrieorganisationen aus 19 Staaten teil. Es hat zwei Stossrichtungen: Brennstoff- und Materialverhalten sowie Mensch-Technologie-Organisation (MTO). Im Bereich Brennstoff und Materialverhalten stehen zurzeit der Hochabbrand von Brennstoffen in Leichtwasserreaktoren und der Einfluss von Strahlung, Wasserchemie sowie mechanischen und thermischen Belastungen auf die Materialalterung von Kerneinbauten im Vordergrund. Der Bereich MTO wird im Kapitel «Mensch, Organisation und Sicherheitskultur» ausgeführt [23].

Im Berichtsjahr wurden zwölf experimentelle Kernbrennstoff-Anordnungen mit geringem bis hohem Abbrand bestrahlt, wobei die thermohydraulischen Bedingungen von Leichtwasserreaktoren simuliert werden. Es wurden Kenngrössen der keramischen Brennstoffe, vorab Uranoxide mit verschiedenen Zusätzen (Additiven), unter Betriebs- und Störfallbedingungen ermittelt. In vergleichenden Bestrahlungen wurden zudem Brennstab-Hüllrohre bezüglich Korrosion und Abscheidungen auf der Hüllrohr-Aussenseite untersucht.

Die Versuche an Hochabbrand-Brennstoffen aus kommerziellen Reaktoren unter Bedingungen, wie sie bei einem Kühlmittelverlust-Störfall auftreten, wurden fortgesetzt. Es wurden je zwei Tests an Brennstoffen für Druck- und Siedewasserreaktoren (DWR bzw. SWR) durchgeführt. Insbesondere die beiden Brennstoffproben aus dem KKW Leibstadt lieferten interessante Ergebnisse bezüglich Gasfreisetzung aus dem Brennstoff bzw. Hüllrohrdehnung und Brennstoffschwellen.

Ein Experiment zur Spaltgasfreisetzung aus Uranoxid-Brennstoffen mit Additiven bei hoher linearer Stableistung wurde abgeschlossen, und die Nachuntersuchungen sind im Gang. Ein neues Experiment zur Spaltgasfreisetzung mit Additivbrennstoff wird vorbereitet. Das Inertmatrixbrennstoff-Experiment, für welches das Paul Scherrer Institut (PSI) den Brennstoff produziert hatte, wurde aus dem Halden-Reaktor ausgebaut, und die Untersuchungen in den Heissen Zellen wurden abgeschlossen.

Die Versuche mit Reaktormaterialien gelten vorab der strahlungsinduzierten Spannungsrisskorrosion in normaler und reduzierender Wasserchemie. Interessante Ergebnisse bezüglich strahlungsinduzierten Veränderungen der Eigenschaften erhielt man für rostfreie Stähle von Reaktorstrukturen. Der günstige Einfluss der reduzierenden Wasserchemie auf das Risswachstum unter Bestrahlung konnte experimentell nachgewiesen werden.

OECD CABRI Waterloop Project [10]: Am Forschungsreaktor CABRI in Cadarache, Frankreich, werden Versuche zum Hochabbrandverhalten von Brennstäben bei schnellen Reaktivitätsstörfällen durchgeführt. Das sind Störfälle, bei denen der Reaktor durch schnelle unkontrollierte Bewegung eines Steuerelements bzw. Steuerstabs kurzzeitig überkritisch wird. Das Projekt stützt sich auch auf Tests Programms *Prometra*, welches das mechanische Verhalten bestrahlter Hüllrohrproben bei den für RIA (Reactivity Initiated Accident) typischen hohen Dehnungsraten untersucht. Die wichtigsten Arbeiten im Jahre 2009 umfassten:

- Der Umbau der Kernstruktur, erforderlich für die Umstellung von Natrium- auf Wasserkühlung, wurde inklusive der nötigen Tests abgeschlossen. Vorausberechnungen zu mehreren geplanten CABRI-RIA-Versuchen wurden durchgeführt.
- Mehrere mechanische Dehungsversuche an bestrahlten Zr-4-Hüllrohren wurden bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Das Verformungsverhalten hängt ausser von der Temperatur auch von der Dicke der äusseren Schicht mit ausgeschiedenen Hydriden ab.
- Am PSI wurden Messungen zur Verteilung der Hydridausscheidungen in SWR-Prometra-Proben durchgeführt. Für ein Hüllrohrsegment aus dem KKW Leibstadt lagen sie zwischen 4,7 % und 16,8 %.

OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction [11]: Das Projekt OECD MCCI (*Melt Coolability and Concrete Interaction*) bezieht sich auf schwere Unfälle, bei denen der Reaktorkern wegen fehlender Kühlung schmilzt und anschliessend auch der Reaktordruckbehälter versagt. Dann gelangt die Schmelze im Reaktorgebäude auf das Betonfundament, dessen Durchschmelzen durch Kühlung verhindert werden soll. Am *Argonne National Laboratory* in Chicago werden Versuche zur Kühlbarkeit von Kernschmelze und der Wechselwirkung zwischen Kernschmelze und Beton durchgeführt. Im Jahre 2009 wurden vor allem folgende Arbeiten durchgeführt:

- Im April 2009 wurde Test Nr. 12 der Reihe *Small--Scale Water Ingression and Crust Strength* (SSWICS-12) durchgeführt. Erstmalig wurde die Kühlung der aufgeheizten Kernschmelze durch am Fundament angebrachte Düsen eingeleitet; dabei wurden Wasser und Stickstoff eingespeist. Die beobachtete Effektivität der Kühlung war deutlich höher als in den bisherigen Tests der Reihe SSWICS. Zudem ergaben sich Daten zur erforderlichen Dimensionierung (Förderdruck, Durchfluss) der Kühlungseinrichtung.
- Ein erster Test der Reihe Water-Cooled Basemat (WCB-1) wurde im Juli 2009 durchgeführt (Dauer 230 Minuten). Unterhalb des Fundaments, welches mit der Kernschmelze in Wechselwirkung steht, befindet sich ein mit Kühlwasser durchströmtes Rohrleitungssystem. Zusätzlich gibt es ein System zur Flutung mit Kühlwasser von oberhalb, welches aktiviert wurde, nach dem sich die Kernschmelze auf etwa 2000 °C aufgeheizt hatte. In der Flutungsphase stabilisierte sich die Temperatur bei etwa 1700 °C, und die Betonabtragung am Fundament endete, bevor eine nennenswerte Beschädigung des darunter befindlichen Kühlsystems auftrat (Fig. 2).

Figur 2: Zustand des Fundament-Kühlsystems, fotografiert nach WCB-1-Testende und Demontage (Quelle: OECD/MCCI-2009-TR05).

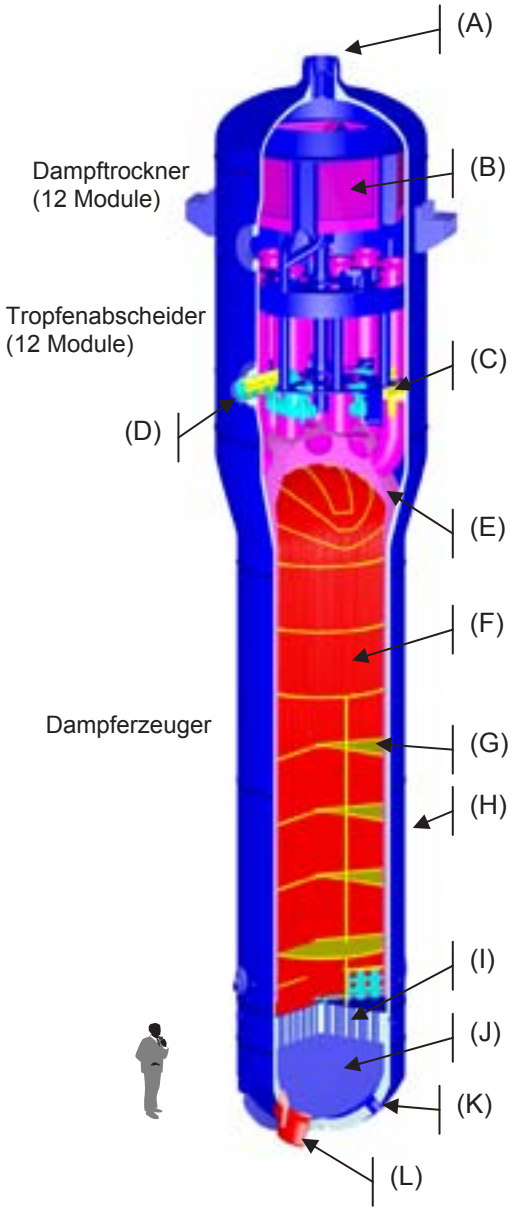
Datenbankprojekte der OECD [12–16]: Diese Projekte fördern den internationalen Erfahrungsaustausch über Störfälle sowie Schäden an KKW-Komponenten, die Störfälle auslösen können. Dazu werden themenspezifische Datenbanken aufgebaut, in die systematisch Schadensfälle und Ereignisse aus den teilnehmenden OECD-Staaten eingegeben werden. Die Daten werden anschliessend statistisch ausgewertet mit dem Ziel, Hinweise auf Schadens- bzw. Störfallursachen zu erhalten. Ein Zusammenschluss auf internationaler Basis ist dazu notwendig, weil die relevanten Ereignisse und Schäden in KKW selten sind. Das ENSI beteiligte sich 2009 an folgenden Projekten:

- *OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project* [12]: Diese Datenbank beinhaltet Informationen von Schadensbefunden an sicherheitstechnisch klassierten und risikorelevanten Rohrleitungen in Kernkraftwerken, die zu Wandstärkeschwächungen, Rissen, Leckagen oder Brüchen geführt haben. Die internationale Arbeitsgruppe des Projektes hat den Status-Bericht für die Projekt-Periode 2002–2008 fertiggestellt und im November 2009 veröffentlicht. Die Sammlung von Schadensfällen an Rohrleitungen in Kernkraftwerken wurde 2009 weitergeführt. Drei der vier Schweizer KKW-Betreiber haben ihre aktive Teilnahme am Projekt aufgenommen. Die neu eingegebenen Datensätze aus Schweizer KKW betreffen Schäden, die keine grösseren Auswirkungen auf den sicheren Betrieb der Anlagen hatten und im Rahmen der Instandhaltung behoben werden konnten.
- *OECD SCAP – Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project* [13]: Mit dieser Datenbank werden Schäden aus den KKW gesammelt und ausgewertet, die auf Spannungsrisskorrosion an Behältern und Rohrleitungen zurückzuführen sind, oder durch Alterung an elektrischen Kabeln entstehen. Die Schweiz beteiligt sich seit 2009 an am SCAP-Teilprojekt zur Spannungsrisskorrosion. Zu diesem Thema wurde 2009 eine umfangreiche Wissensdatenbank erstellt. Aus der Vielzahl an Datenbankeinträgen, die für die unterschiedlichen Arten der Spannungsrisskorrosions-Befunde gesammelt wurden, wurden wichtige Referenz-Schadensfälle identifiziert. Der aktuelle Kenntnisstand zu den wichtigsten Mechanismen der Spannungsrisskorrosion wurde in einem durch internationale Experten erstellten Bericht zusammengefasst.
- *OECD ICDE – International Common Cause Failure Data Exchange* [14]: Diese Datenbank beschäftigt sich mit Ereignissen, bei denen gleichartige Fehler an mindestens zwei (sicherheitsrelevanten) Komponenten aufgrund gemeinsamer Ursache auftraten, so genannte «Common Cause Failure (CCF)»-Ereignisse. Die Datenbank enthält mit den 2009 erfolgten Eingaben etwa 1500 Datensätze zu potenziellen oder effektiven CCF-Ereignissen für zehn verschiedene Komponententypen. Darüber hinaus wurden Kodierungsrichtlinien und Analyseberichte für verschiedene Komponenten aktualisiert, konzipiert bzw. fertig gestellt. Die Datenbankanwendung wurde um zusätzliche Funktionen erweitert, um die Verwaltung und Auswertung der Datensätze zu erleichtern.
- *OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange* [15]: Das Ziel des 2003 gestarteten Projekts ist es, mit der Erhebung und der Analyse von Daten zu Brandereignissen in Kernkraftwerken dazu beizutragen, Ursachen, Ausbreitung und Auswirkungen von Bränden besser zu verstehen. Ausserdem soll die Brandverhütung weiter optimiert und die phänomenologische und statistische Basis für probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) von KKW verbessert werden. Im Jahre 2009 wurden planmässig Daten zu weiteren Brandereignissen gesammelt, soweit möglich auch zurückgehend bis 1990. Zudem wurden erste detaillierte Analysen mit Hilfe der Datenbank durchgeführt. Zur Dokumentation der zweiten Projektphase wurde ein Bericht erstellt.
- *OECD Compsis – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety* [16]: Im Compsis-Projekt werden Betriebserfahrungen von rechnerbasierten Systemen gesammelt, speziell von digitalen Leittechniksystemen. Dies kann Informationen liefern über die Ursachen und Fehlerarten von Ereignissen mit rechnerbasierten Systemen und über die wechselseitige Beeinflussung von Hard- und Software. Hauptziel war 2009 weiterhin die Erfassung und Bereitstellung von Daten. Eine erste Analyse gibt Hinweise, welche Fehlerarten und Tätigkeiten im Lebenszyklus rechnerbasierter Systeme besonders zu beachten sind. Zudem wurde eine Qualitätsmanagement-Vorschrift für Kriterien von Meldungen und Publikationen überarbeitet.

Strahlenschutz

Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik [17]: Dieses Projekt befasst sich der Eichung und Kalibrierung von Dosimetrieystemen und Strahlenmessgeräten. Einerseits ist dabei die Personenosimetrie wichtig, also die Messung der äusseren und inneren Strahlenexposition von Menschen. Zudem geht es um Messungen zur Freigabe von Materialien aus kontrollierten Zonen und zur Überwachung der Abgaben radioaktiver Stoffe an die Umgebung. Die wichtigsten Ergebnisse im Jahre 2009 waren:

- Das Gebiet um die KKW Mühleberg und Gösgen wurde aeroradiometrisch ausgemessen. Mit Ausnahme der Betriebsareale der Kernanlagen wurden keine erhöhten Messwerte registriert. Auf den Betriebsarealen wurden die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten.
- PSI-Vertreter beteiligten sich an der Revision der internationalen Strahlenschutznormen ISO 7503 (Messung und Beurteilung von Oberflächenkontaminationen) und ISO 2889 (Sampling Airborne Radioactive Materials from Stacks and Ducts of Nuclear Facilities).
- Zur Validierung der Monte-Carlo-Kalibrierung des PSI-Ganzkörperzählers wurde die Detektorgeometrie bestimmt und das virtuelle Detektormodell erstellt. Anschliessend wurden Messungen im Ganzkörperzähler mit einfachen Geometrien durchgeführt, das Detektormodell wurde verifiziert und angepasst. Erste Messungen mit komplexen Geometrien zeigten aber noch nicht die gewünschte Genauigkeit.
- Die Verwendung des Materials CR-39 als Detektor in der Personen-Neutronendosimetrie wurde untersucht. Auf das Detektormaterial einfallende Neutronen hinterlassen darin Spuren. Sie werden in einem chemischen Ätzprozess sichtbar gemacht und mittels computergestützter Bildanalyse und digitaler Mikroskopie ausgewertet. Das PSI überprüfte die Reproduzierbarkeit der Auswertung, die Linearität im Dosisbereich von 0,5 bis 100 mSv und den Einfluss der Ätzparameter Temperatur und Zeit auf die Ergebnisse.
- Es konnte gezeigt werden, dass die neuen MADUK-Sonden (Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der KKW) extrem empfindlich sind. Selbst Erhöhungen der Ortsdosisleistung um ungefähr 20 nSv/h aufgrund der Abgabe von Positronenstrahlern im West-Areal des PSI konnten nachgewiesen werden. Unter Strahlenschutz-Gesichtspunkten ist diese Erhöhung unerheblich.



Figur 3: Dampferzeuger eines Druckwasserreaktors (Framatome Design 33/19): (A) Dampfaustritt; (B) Trockner Schikanen; (C) Wasserabscheider; (D) Haupt-Speisewassereintritt; (E) Leitmantel; (F) U-Rohrbündel (3238 U-Rohre); (G) Rohrhalter (7 Platten); (H) Druckmantel; (I) Rohrboden; (J) Trennwand; (K) Hauptkühlmittelaustritt; (L) Hauptkühlmitteleintritt; (Quelle: PSI/KKB).

Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Radioanalytik [18]: In der Radioanalytik werden chemische und physikalisch-chemische Untersuchungen in Verbindung mit Kernstrahlungsmessungen an verschiedensten radionuklidhaltigen Proben durchgeführt. Im Jahr 2009 wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Eine Schnellmethode zur Bestimmung der Strontiumisotope ^{89}Sr und ^{90}Sr in Frischmilch wurde entwickelt. Sie basiert auf einer organischen Verbindung, welche zusammen mit dem Strontium einen Komplex (Chelat) bildet.
- Die Entwicklungsarbeiten für die simultane Bestimmung der Plutoniumisotope ^{241}Pu, ^{240}Pu, ^{239}Pu und ^{238}Pu in Schlammproben mittels der Methoden *Liquid Scintillation Counting* (LSC), sowie *Alpha- und Massenspektrometrie* (MS) wurden beendet.
- Ein Verfahren zur Bestimmung des Wasserstoffisotops ^{3}H (Tritium) und des Kohlenstoffisotops ^{14}C (Radiokarbon) in Schlammproben und Reaktorrückbaukomponenten mittels eines geschlossenen Gasextraktionssystems wurde entwickelt.
- Bei Vergleichsmessungen auf internationaler Ebene liess sich eine sehr gute Übereinstimmung der PSI-Resultate mit den Referenzwerten feststellen.

ARTIST – Aerosol Trapping in the Steam Generator [19]: Das internationale Projekt ARTIST untersucht DWR-Unfallsequenzen mit Kernschmelze, Dampferzeuger-Heizrohrbruch und fehlerhafter Isolation des Dampferzeugers (Fig. 3). Bei solchen Unfallsequenzen können radioaktive Stoffe unter Umgehung der Sicherheitssysteme direkt an die Umwelt abgegeben werden. Daher sind sie trotz ihrer nach heutigem Kenntnisstand ausserordentlich geringen Eintretenshäufigkeit wichtig. Im Projekt ARTIST wird untersucht, welcher Anteil der bei einem solchen Unfall freigesetzten Spaltprodukte in Form von Aerosolen und Tropfen im Dampferzeuger zurückgehalten wird. Der 2009 gestartete Projektabschnitt ARTIST-II konzentriert sich in fünf Teilprojekten (Phasen I, II, V, VI und VIII) auf verschiedene Einzelaspekte des Aerosol- und Tropfentransports, die bisher noch nicht betrachtet wurden und im Laufe von ARTIST-I zusätzliche Bedeutung erlangt haben. Sie beschäftigen sich mit unterschiedlichen Bereichen innerhalb des Dampferzeugers. Die Ablagerungs- und Wiederaustragungsprozesse werden bei unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten, Aerosolgrössen und -materialien und Wasserständen im Dampferzeuger studiert.

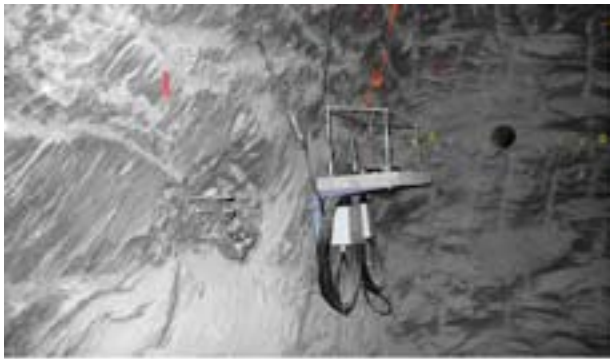
Eines der Ziele des Jahres 2009 war die Entwicklung von Methoden, mit denen Aerosole in hohen Konzentrationen und in einer Form erzeugt werden, bei der die Resuspension von an Oberflächen abgeschiedenen Aerosolen minimiert wird. Dies ist wichtig für die Projektphasen I und II zur Aerosol-Rückhaltung in den Dampferzeugerrohren bzw. dem Nahbereich des Heizrohrbruches. Die geplanten Versuche der Phasen V (Aerosol-Rückhaltung bei gefluteter Sekundärseite des Dampferzeugers) und VIII (Aerosol-Rückhaltung bei geflutetem Tropfenabscheider) wurden erfolgreich durchgeführt. In den vier Tests der Phase V wurde die Aerosol-Rückhaltung bei minimalen und maximalen Gasdurchsätzen für zwei unterschiedliche Aerosolgrössen bestimmt. Die Rückhaltung steigt demnach mit zunehmendem Gasdurchsatz und zunehmender Partikelgrösse. Einer der Tests der Phase VIII wurde bei minimalem Gasdurchsatz durchgeführt, während bei den weiteren beiden Tests der Gasdurchsatz in vier Stufen vom minimalen bis auf den maximalen Wert erhöht wurde. Die Rückhaltung ist bei allen Tests sehr hoch und praktisch unabhängig vom Gasdurchsatz und von der Partikelgrösse. Der Abscheideprozess wird dominiert durch die hohe Wasservorlage und das komplexe Strömungsverhalten im gefluteten Tropfenabscheider.

Transport und Entsorgung

Forschungsprojekt Felslabor Mont Terri [20]: Das internationale Forschungsprojekt Felslabor Mont-Terri hat zum Ziel, die geologischen, hydrogeologischen, geochemischen und felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons zu untersuchen. Diese Eigenschaften sind für die Beurteilung der Sicherheit und der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für radioaktive Abfälle in diesem Gestein massgebend.

Der Schwerpunkt der ENSI Forschungsarbeiten lag 2009 auf dem RC-Experiment («Rock Mass Characterisation»), welches von der Ingenieurgeologie der ETH Zürich durchgeführt wird. Im Vordergrund dieses mehrjährigen Experimentes stehen einerseits die Untersuchung der durch den Bau eines neuen Stollens (Galerie-08) induzierten Deformationen und andererseits die Erfassung der sehr langsam ablaufenden langfristigen Verformungen. Von besonderem Interesse ist der Einfluss bestehender Diskontinuitäten (Trennflächen wie Klüfte, Scherzonen, Störungen, Schichtung) auf das mechanische Gebirgsverhalten des Opalinustons. Die Verformungsmessungen in Beobachtungsbohrungen, die geodätischen Verschiebungsmessungen am Hohlraumrand sowie die mittels Laseraufnahmen evaluierten flächenhaften Verschiebungen im

Versuchsabschnitt wurden zum grössten Teil wissenschaftlich ausgewertet. Anhand der Daten zeigt sich, dass das Gebirgsverhalten stark von der Gesteins- und Gebirgsanisotropie sowie von Heterogenitäten kontrolliert wird. Die Beobachtungen während des Ausbruchs des Stollenabschnittes zeigen, dass das mechanische Verhalten des Opalinustons durch eine Kombination von Gleitverschiebungen entlang von bestehenden Trennflächen (Scherzonen, Klüfte), Scherversagen entlang der Schichtung sowie spröden Bruchprozessen bestimmt wird. Um dieses Gebirgsverhalten zu verifizieren, wurden zudem Laborversuche an Opalinuston-Gesteinsproben zur Ermittlung felsmechanischer Kennwerte durchgeführt (ETH Zürich zusammen mit der Technischen Universität Graz).



Figur 4: Messanordnung des CD-Experimentes mit 3D-Jointmeter (links) und Crackmeter (rechts) zur Erfassung der Öffnung und Schliessung diskreter Schichtfugen im Opalinuston in Abhängigkeit vom Lokalklima (Quelle: ETH Zürich).

Das ENSI beteiligte sich ferner an zwei weiteren kleinen Folgeexperimenten in der EZ-B Nische des ENSI: Im Cyclic-Deformation(CD)-Experiment, dargestellt in Fig. 4, wird das zyklische Austrocknungsverhalten der Stollenwand in Abhängigkeit des Stollenklimas (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) untersucht. Mit dem Evaporation-Logging(FM-D)-Experiment evaluiert das ENSI zusammen mit Swisstopo eine neue Methode der Durchlässigkeitsbestimmung (evaporation logging) in Bohrungen.

FORGE – Fate of Repository Gases [21]: Die in einem geologischen Tiefenlager eingelagerten Metalle und organischen Stoffe produzieren durch Korrosionsprozesse oder aufgrund des Stoffwechsels von vorhandenen Mikroben Gase wie Wasserstoff und Methan in den Einlagerungsstollen. In dichten Wirtgesteinen kann dieses Gas nur langsam abgeführt werden, und es kommt zu einem Druckaufbau in den Lagerstollen. Die für die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers wichtige Frage ist, ob durch diesen Druckaufbau die Rückhaltefähigkeit des Wirtgesteins durch die Bildung von Rissen gefährdet wird.

FORGE ist ein Projekt der EU mit 24 Teilnehmern. Es soll die sicherheitstechnische Bedeutung der durch Gase verursachten Prozesse im Nah- und Fernfeld eines Tiefenlagers untersuchen. Die Arbeiten sind in 5 Teilrogramme (Work Packages WP) unterteilt. Das ENSI arbeitete 2009 am WP1 (Behandlung von Gas in Sicherheitsanalysen) mit. Die Arbeiten beinhalten die Erstellung einer Bestandesaufnahme des technisch-wissenschaftlichen Wissens zur Gasproblematik, die Definition von vergleichenden Berechnungen zum Gastransport und die Durchführung von sicherheitstechnisch relevanten Berechnungen. Im Jahr 2009 wurde von den Projektteilnehmern ein Übersichtsbericht zur sicherheitstechnischen Bedeutung der durch Gase verursachten Prozesse im Nah- und Fernfeld eines Tiefenlagers erstellt. Zusätzlich wurden in der Arbeitsgruppe die Vergleichsberechnungen definiert.

Mensch, Organisation und Sicherheitskultur

HRA – Human Reliability Analysis [22]: Im Projekt HRA wird die Zuverlässigkeit von menschlichen Handlungen unter Berücksichtigung von verschiedenen Randbedingungen untersucht. Stand der Technik ist die Bestimmung der Fehlerwahrscheinlichkeiten für Handlungen, die während eines Störfalls gefordert sind, aber unterlassen werden. Hingegen fehlt eine effiziente Methode zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung von ungeplanten Handlungen, welche den Verlauf eines Störfalls negativ beeinflussen, den so genannten EOC (Errors of Commission). Im Jahre 2009 wurden folgende Punkte bearbeitet:

- Methodenentwicklung zur systematischen Identifizierung und Quantifizierung von EOC sowie Anwendung der Methode für ein Schweizer KKW: Die in der Projektphase HRA-II entwickelte CESA-Methode (Commission Errors Search and Assessment) zur EOC-Ermittlung und -Bewertung wurde anhand internationaler Erfahrungen überprüft und, wo notwendig, verfeinert. Dazu wurden auch Simulatordaten verwendet, die im Rahmen des OECD *Halden Reactor Project* gewonnen wurden. Es wurde unter anderem geprüft, ob die bekannten HRA-Methoden die relevanten Einflussfaktoren für die Zuverläs-

sigkeit von Operateurhandlungen richtig vorhersagen und bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die CESA-Methode diese Faktoren gut vorhersagt. Die CESA-Methode wurde zudem 2009 für ein zweites schweizerisches KKW getestet. Mit ihr wurden insgesamt 6 Handlungen mit «EOC-Potenzial» identifiziert und quantifiziert. Ein Teil davon hat demnach eine vergleichbare Wichtigkeit wie einige der Handlungen, die bereits in der werkspezifischen probabilistischen Sicherheitsanalyse berücksichtigt worden sind. Jedoch ist der Einfluss aller identifizierten EOC auf die Kernschadenshäufigkeit geringfügig. Die Analyse dieser EOC-Fälle gab keinen Anlass, Störfallvorschriften zu verbessern.

– *Entwicklung dynamischer Modelle, welche die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Anlage abbilden, um die HRA zu unterstützen:* Ziel ist es, mit einem dynamischen Modell für das Anlagen- und Personalverhalten die HRA zu unterstützen. Die mit diesem Modell ermöglichte Darstellung des Zeitverlaufs der Anlageparameter im Wechselspiel mit den Operateurhandlungen soll insbesondere die Modellierungsgrundlagen der Diagnoseprozesse der Operateure verbessern. Die Arbeiten konzentrierten sich 2009 auf die Simulation von Störfallszenarien und deren Auswertung für die HRA. Wichtig dabei war die Entwicklung einer Methode zur systematischen Auswertung der Simulationen.

OECD Halden Reactor Project (HRP), Teil Mensch–Technologie–Organisation (MTO) [23]: Das OECD Halden Reactor Project (HRP) wurde weiter oben mit seinem Bereich Brennstoff- und Materialverhalten beschrieben [9]. Im hier dargestellten Bereich MTO werden empirische Studien durchgeführt zum Zusammenspiel zwischen Reaktoroperateuren und den Kontrollanzeigen und Steuerpulten, die ihnen in den Kontrollräumen zur Verfügung stehen (Human–System Interface Design). Dabei stehen zukünftige technische Systeme und deren Schulung im Vordergrund. So wurde eine Datenerhebung mit Leistungstests und Interviews zu innovativen Anzeigesystemen abgeschlossen. Elektronische Visualisierungsinstrumente dienen dazu, die Strahlenexposition bei Arbeiten im Kernkraftwerk zu reduzieren, indem Aufgaben in der virtuellen Umgebung geplant, geübt und daraufhin optimiert werden. Dazu wurden eine Übersicht über Richtlinien für die Auslegung von Kontrollräumen fertiggestellt und eine Software entwickelt, mit der in einem virtuellen Modell einer Kernanlage Strahlenquellen und Abschirmungsmassnahmen dargestellt werden. Die Studien im Bereich der menschlichen Zuverlässigkeit (Human Reliability Analysis) dienen dazu, Analysemethoden für Auslöser und Wahrscheinlichkeit von menschlichem Versagen weiter zu verbessern. Es wurden Simulatorversuche mit zehn Operateurgruppen durchgeführt, um Referenzdaten für deren Handlungen bei Störfällen zu erhalten. Für die Szenarien «Dampferzeuger-Heizrohrbruch» und «Speisewasserverlust bei einem Druckwasserreaktor» wurden erste Resultate publiziert. Schliesslich wird die immer grösser werdende Abhängigkeit auch der nuklearen Sicherheitstechnik von rechnerbasierten Systemen und deren Zuverlässigkeit betrachtet. Zu den dabei wichtigen Fehlern, die durch die gleiche Ursache ausgelöst werden (so genannte Common Cause Failures), wurde eine Software für die Überwachung der Reaktorleistung in einem Simulator geprüft. Zudem wurden verschiedene Leittechnik-Modernisierungsprojekte in einer retrospektiven Studie bezüglich der Anforderungen an das zu entwickelnde System untersucht.

Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer Kernkraftwerken [24]: Die Aufgaben des Personals (Schichtchef, Reaktoroperateure, Pikett-Ingenieur) im Kommandoraum eines KKW verlangen ihrer Tätigkeit angepasste Persönlichkeitsmerkmale. Die entsprechenden Anforderungen wurden letztmals Ende der achtziger Jahre aktualisiert. Seither haben sich die Anforderungen an alle diese Personen erweitert und bedürfen einer eingehenden Überarbeitung. Dabei stellte sich die Frage, ob sich für die drei Personengruppen abgeschlossene Anforderungsprofile erstellen lassen, wie weit sich diese Profile überschneiden und ob sich eine Methode entwickeln lässt, welche es auch Personen ohne spezielle Kenntnisse in der Eignungsdiagnostik ermöglicht, diese Profile den sich verändernden Bedürfnissen anzupassen.

Die bereits im Vorjahr erstellten Anforderungsprofile für den Normalbetrieb wurden 2009 noch um die Anforderungsprofile für den Störfall erweitert. Die vorangegangenen Untersuchungen hatten gezeigt, dass für die Erstellung signifikanter Profile die Befragung einer kleineren Anzahl von Personen genügt. Deshalb, und auch aus Ressourcengründen, wurden die Befragungen für Störfälle nur in drei Werken für Reaktoroperateure und Schicht-

chefs durchgeführt. Für Pikett-Ingenieure erübrigte sich die Befragung, da diese ohnehin nur im gestörten Betrieb zum Einsatz kommen, was schon in der ersten Projektphase berücksichtigt wurde. Entgegen oft geäusserter Befürchtungen erwies sich die Anzahl der Fähigkeiten, die sich für die beiden Werkzustände (Normalbetrieb und Störfall) signifikant unterscheiden, als gering. Dies gilt sowohl bei der Tätigkeit als Reaktoroperateur als auch als Schichtchef. Damit verfügen die Kernkraftwerke nun über aktuelle Anforderungsprofile für die Rekrutierung von zulassungspflichtigem Betriebspersonal. Ausserdem wurde ein elektronisches Hilfsmittel erstellt, das die Werke befähigt, unabhängig von externer Unterstützung die Anforderungsprofile bei Veränderungen des Arbeitsumfeldes zu erheben.

Nationale Zusammenarbeit

Innerhalb der Schweiz haben die Institute, welche die Forschungsarbeiten ausführten, effizient und kooperativ zusammengearbeitet. Regelmässige Gespräche mit dem ENSI ermöglichten eine Ausrichtung der Fachinhalte entsprechend der aktuellen Bedürfnisse. Dabei wurde die Umsetzung der Resultate in die schweizerische Sicherheits- und Aufsichtspraxis berücksichtigt. Neben dem Paul Scherrer Institut arbeitet das ENSI im Rahmen der regulatorischen Sicherheitsforschung insbesondere mit folgenden Institutionen zusammen: ETH Zürich, Universität Zürich, Eidgenössische Materialprüfungsanstalt Empa.

Internationale Zusammenarbeit

Die folgenden Projekten sind direkt oder indirekt Teil von internationalen Kooperationsprogrammen inkl. EU-Rahmenprogrammen (Details in einzelnen Projektberichten, s. u.):

KORA [1], PISA [2], STARS [5] OECD-SCIP [6], MELCOR [7], MSWI [8], OECD Halden Reactor Project [9, 23], OECD CABRI Water Loop Project [10],OECD MCCI [11], OECD OPDE [12], OECD SCAP [13], OECD ICDE [14], OECD FIRE [15], OECD COMPSIS [16], ARTIST [19], Mont Terri [20], FORGE [21].

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

Die Projekte konnten im Berichtsjahr grösstenteils planmässig abgewickelt werden. Sie lieferten wichtige wissenschaftliche Grundlagen, welche direkt oder indirekt in die Aufsichtstätigkeit des ENSI einfliessen werden. Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse in die operativen Bereiche des ENSI und umgekehrt erfolgt dank der 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. Die Forschungsprojekte, welche im Jahr 2010 gestartet werden, orientieren sich inhaltlich ebenfalls an den oben beschriebenen Schwerpunkten. Grösstenteils wird es sich dabei um Nachfolgeprojekte der im Berichtsjahr abgeschlossenen Aktivitäten handeln.

Liste der F+E-Projekte

Jahresberichte (JB) und Referenzen zu allen Projekten sowie weitere Informationen finden sich im *Erfahrungs- und Forschungsbericht 2009* des ENSI. Er kann unter www.ensi.ch heruntergeladen oder dort als Druckversion bestellt werden.

[1] H.P. Seifert, M. Breimesser, H. Leber, M. Ramesh, S. Ritter (hans-peter.seifert@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **KORA II – Environmentally-Assisted Cracking in Austenitic LWR Structural Materials** (JB)

[2] M. Niffenegger, H.P. Seifert, Q. Guian, H. Leber and P. Simon (markus.niffenegger@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **PISA – Pressure Vessel Integrity and Safety Analysis** (JB)

[3] H.-W. Viehrig, C. Zurbuchen (h.w.viehrig@fzd.de), Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, D-01314 Dresden, **Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung zur Überwachung der Neutronenversprödung von Reaktordruckbehältern** (JB)

[4] K. Germerdonk (klaus.germerdonk@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **Machbarkeitsstudie für zerstörungsfreie Messungen an der Stahldruckschale des Primär-Containments von Kernkraftwerken** (JB)

[5] H. Ferroukhi, A. Manera, A. Vasiliev, G. Khvostov und Projekt Team, (hakim.ferroukhi@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **STARS – Safety Research in relation to Transient Analysis of the Reactors in Switzerland** (JB)

[6] R. Mailänder (reiner.mailaender@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD SCIP – Studsvik Cladding Integrity Project** (JB)

[7] J. Birchley, Y. Liao (jonathan.birchley@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Development and Assessment Program for the MELCOR Code** (JB)

[8] W.M. Ma, P. Kudinov, A. Karbojian, R.C. Hansson, C.T. Tran, L.X. Li, F. Cadinu, (ma@safety.sci.kth.se), Division of Nuclear Power Safety – Royal Institute of Technology, Sweden, **MSWI – Melt-Structure-Water Interactions During Postulated Severe Accidents in LWRs** (JB)

[9] W. Wiesenack, Ø. Berg (wolfgang.wiesenack@hrp.no), Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project, NO-1751 Halden, **OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation** (JB)

[10] A. Gorzel (andreas.gorzel@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD CABRI Waterloop Project** (JB)

[11] B. Reer (bernhard.reer@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD MCCI – Melt Coolability and Concrete Interaction** (JB)

[12] S. Schulz (susanne.schulz@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD OPDE – Piping Failure Data Exchange Project** (JB)

[13] K. Germerdonk (klaus.germerdonk@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD SCAP – Stress Corrosion Cracking and Cable Ageing Project** (JB)

[14] R. Beutler (roland.beutler@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD ICDE – Common Cause Failure Data Exchange** (JB)

[15] A. Ramezanian (annette.ramezanian@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD FIRE – Fire Incident Record Exchange** (JB)

[16] R. Jäggi (rudolf.jaeggi@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **OECD COMPSIS – Exchange of Operating Experience Concerning Computer-based Systems Important to Safety** (JB)

[17] Ch. Schuler, G. Butterweck, M. Boschung, S. Mayer und C. Wernli (christoph.schuler@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Strahlenmesstechnik** (JB)

[18] J. Eikenberg, M. Jäggi, (jost.eikenberg@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Entwicklungs- und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Radioanalytik** (JB)

[19] T. Lind, D. Suckow, S. Güntay, (terttaliisa.lind@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **ARTIST II– Aerosol Trapping in the Steam Generator** (JB)

[20] F. Amann, E. Button, R. Thöny , S. Löw (florian.amann-@erdw.ethz.ch), Chair for Engineering Geology, ETH Zürich, ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich, **RC-Experiment Rock Mass Characterisation** (JB)

[21] F. Altorfer (felix.altorfer@ensi.ch), ENSI, 5200 Brugg, Bewertung des Projekts **FORGE – Fate of Repository Gases** (JB)

[22] V.N. Dang, L. Podofillini, D. Mercurio, (vinh.dang@psi.ch), Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, **Human Reliability Analysis (HRA)** (JB)

[23] W. Wiesenack, Ø. Berg (wolfgang.wiesenack@hrp.no), Institutt for energiteknikk, OECD Halden Reactor Project, NO-1751, Halden, Norway, **OECD Halden Reactor Project: Fuels and Materials / Man, Technology, Organisation** (JB)

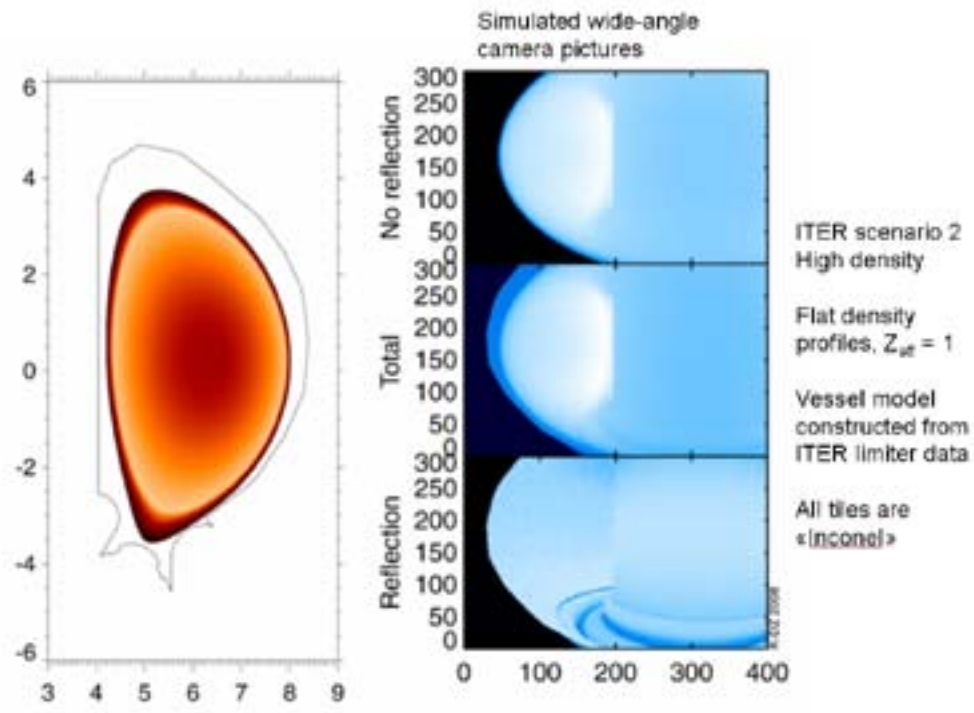
[24] S. Schumacher, M. Kleinmann, Universität Zürich, Psychologisches Institut, Arbeits- und Organisationspsychologie, Zürich, **Anforderungsanalyse für das Personal in Schweizer Kernkraftwerken. Erstellen werkzustandsabhängiger Profile und Abschluss des Projektes** (JB)

Rapport de synthèse 2009 du chef de programme OFEN
Synthesebericht 2009 des BFE-Programmleiters

Programme de recherche
Fusion thermonucléaire contrôlée

Claude Vaucher[*)]

claude.vaucher@sbf.admin.ch



Simulation de lumière réfléchie par le plasma d'ITER

Simulated pictures of *bremsstrahlung* at 500 nm based on the density and temperature profiles of the high density 400 MW inductive scenario in ITER-like geometry. Top: direct contribution. Middle: direct contribution plus reflected components. Bottom: Reflected component only. All wall elements have the reflectivity of the JET Inconel tiles. All three pictures are shown on the same normalized colour scale (Basle University).

[*)] Rapport de synthèse élaboré par, Minh Quang Tran et Laurent Villard, CRPP, EPFL Lausanne, ainsi que par Laurent Marot, Département de physique, Université de Bâle

Centres de gravité

ITER

En 2009, la participation formelle de la Suisse dans le projet du réacteur expérimental *thermonucléaire international* (ITER) [1] a été ratifiée par le Parlement et est entrée en force. Les travaux de génie civil du site progressent comme prévu. L'impact du *ITER Design Review* sur les aspects techniques, les coûts, la planification et le management du projet sont toujours en cours d'examen par la Direction du Projet (*ITER Organization*, IO). Les points importants qui doivent être confirmés sont la planification et les risques inhérents, l'augmentation du coût et son financement.

Coopération européenne dans le cadre d'Euratom

Les instruments actuels de la coopération européenne dans le cadre d'Euratom ont été décrits dans le rapport de synthèse 2008 du programme Fusion Thermonucléaire Contrôlée. En parallèle avec la ratification de la participation à *ITER*, la Suisse a également ratifié sa participation au *Joint Undertaking Fusion for Energy* (F4E) [3].

Il a été décidé en 2009 de poursuivre l'exploration scientifique du *Joint European Torus* (JET) jusqu'en 2011. Cette phase permettra de mettre en valeur les nouvelles installations (recouvrement interne en béryllium, diverteur utilisant du tungstène, augmentation du chauffage). Cette décision aura un impact sur le financement des programmes nationaux en 2011.

Euratom et la Suisse

L'Accord de coopération entre la Confédération Suisse et Euratom dans le domaine de la fusion, conclu le 14 septembre 1978, est un accord-cadre de durée illimitée. Trois accords généraux d'exécution fixent les modalités d'exécution avec Euratom : l'Accord sur la Mobilité qui encourage et facilite les échanges de personnel dans le cadre de la fusion, le Contrat d'Association et l'*European Fusion Development Agreement* (EFDA). Ces deux derniers accords règlent les modalités de collaboration entre les laboratoires suisses associés au programme fusion, d'une part, et Euratom et les autres laboratoires européens, d'autre part. De plus EFDA, à travers des *Implementing Agreements*, permet à la Suisse de participer à l'exploitation de grandes infrastructures communes. En 2009, deux *Implementing Agreements* sont en force : le *JET Implementing Agreement* qui règle l'utilisation du *tokamak* européen *JET* et le *High Performance Computer Implementing Agreement* (HPC-IA). Le HPC-IA a été mis en œuvre en 2009 et permet aux laboratoires européens de fusion d'exploiter un ordinateur européen extrêmement performant dédié seulement à la R&D en fusion. Le processus de signature du HPC-IA par la Suisse est en cours. Les laboratoires suisses ont toutefois déjà accès à l'ordinateur européen.

Le CRPP, l'Association Suisse/Euratom et ITER

Le Centre de recherches en physique des plasmas (CRPP) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a continué en 2009 à participer aux activités scientifiques et technologiques du programme Euratom. Ses recherches en matière de fusion thermonucléaire contrôlée sont effectuées sur deux sites : à l'EPFL, les activités portent sur la physique du *tokamak*, la théorie et la simulation numérique, et la technologie de la fusion (en particulier, le chauffage du plasma et la génération de courant par ondes hyper-fréquences) ; au PSI, les activités sont consacrées à la supraconductivité et aux matériaux.

Le *TCV* (*Tokamak à configuration variable*) est la plus grande installation expérimentale exploitée sur le site de l'EPFL. Elle présente deux propriétés uniques au monde : d'une part, la grande flexibilité de sa conception et de son mode d'opération permet la création et le contrôle de plasmas de formes très différentes ; ce qui s'avère essentiel pour vérifier les simulations numériques et planifier la géométrie optimale du cœur des futurs réacteurs de fusion ; d'autre part, la densité de puissance hyper-fréquence injectée dans le plasma est un record mondial. C'est en utilisant ces deux caractéristiques uniques que les recherches sur le *TCV* se poursuivent. La campagne expérimentale 2009 a commencé à la mi-mars, après une période d'ouverture consacrée à des réparations et des améliorations de plusieurs diagnostics.

Parmi les nombreux résultats obtenus sur le *TCV*, mentionnons en particulier :

- De nouvelles mesures, obtenues grâce à une meilleure résolution spatiale et temporelle et un nouveau système de contrôle en temps réel ont

permis l'étude détaillée de la rotation spontanée du plasma entre deux relaxations internes du plasma successives (phénomène dits de «dents-de-scie»), et également de vérifier une théorie sur l'effet de la symétrie de la forme du plasma sur la rotation. Une série d'expériences sur la rotation sont d'ailleurs faites en collaboration avec le MIT, USA.

– Des mesures de fluctuations de température ont été effectuées dans le cœur du plasma du *TCV*. Elles ont mis en évidence une décroissance de l'amplitude de la turbulence avec le taux de collisions et une influence de la forme du plasma, en relation avec un transport de chaleur diminué, et donc un confinement amélioré.

– Alors que toutes les méthodes de chauffage appliquées sur le *TCV* (ohmique et micro-ondes hyper-fréquence) déposent leur énergie primairement sur les électrons, un chauffage des ions par transfert d'énergie des électrons rapides via l'émission d'ondes ioniques acoustiques a été mis en évidence et modélisé théoriquement. L'absorption de ces ondes acoustiques créée une population anisotrope d'ions rapides.

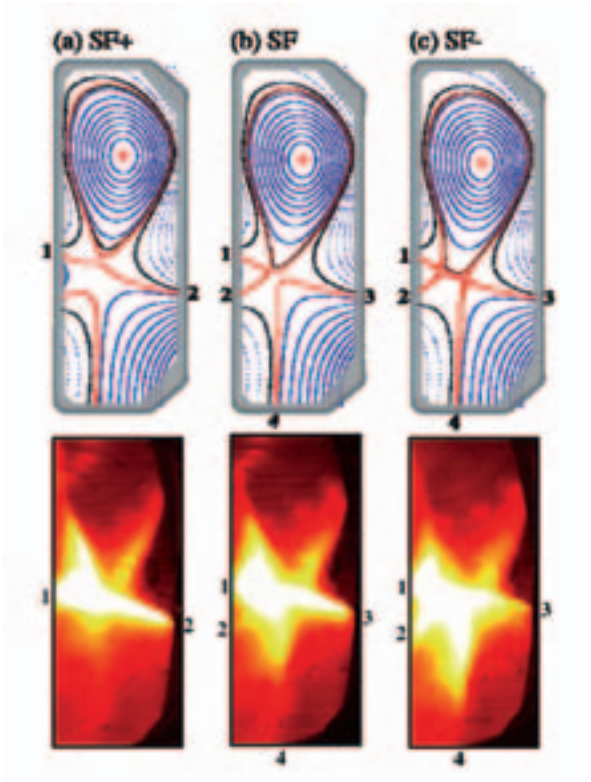


Figure 1 : configurations « snowflakes » obtenues dans le TCV : reconstructions d'équilibres (en haut) et images de la caméra CCD (en bas) (CRPP).

La flexibilité du système hyper-fréquence du *TCV* a permis de mettre en évidence, selon le positionnement du dépôt de puissance, soit une stabilisation, soit une déstabilisation, de certains modes dans le plasma, et ainsi de tester les modèles physiques utilisés pour l'extrapolation à *ITER*.

– Des états de confinement amélioré avec *barrière de transport* au bord du plasma ont été obtenues dans des configurations dites *snowflake* permettant une meilleure répartition de la puissance de sortie (Figure 1).

– Des mesures détaillées de la puissance de sortie impactant les parois et de sa répartition spatiale ont été effectuées, permettant notamment de caractériser les asymétries durant les événements de relaxation du bord du plasma, appelés *Edge Localized Modes*, durant lesquelles des pics de puissance importants se produisent.

Les activités du groupe de théorie et simulation numérique portent sur les domaines suivants : la turbulence et le transport de chaleur et de particules dans les *tokamak*s, l'analyse de l'équilibre et de la stabilité MHD (magnéto-hydrodynamique) des *tokamak*s et des *stellarators*, l'application d'ondes radio-fréquence et la prospection et l'optimisation de nouvelles configurations de confinement magnétique. Dans le domaine de la simulation de la turbulence, un code de calcul numérique développé au CRPP a montré une excellente « scalabilité » sur des superordinateurs massivement parallèles jusqu'à 32768 processeurs. Cela ouvre la voie à l'exploitation du code sur plusieurs plateformes de calcul à haute performance et permettra de traiter des problèmes physiques plus complexes et des systèmes de taille plus élevée. Un autre résultat important a été le calcul analytique et numérique de l'instabilité «dent-de-scie» en tenant compte de la position précise de déposition de puissance de chauffage radio-fréquence sur le *tokamak JET* : les expériences conduites par le CRPP sur *JET* ont largement confirmé les prédictions théoriques.

Les recherches du groupe de physique des plasmas de base ont pour but la compréhension des fluctuations, de la turbulence et des phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés toriques. L'avantage de la machine TORPEX est qu'elle permet des mesures *in situ* à haute résolution spatio-temporelle. Parmi les résultats obtenus

en 2009, mentionnons l'étude de la propagation de filaments de plasmas (ou «blobs») en présence d'un limiteur faisant un angle variable avec les lignes de champ magnétique, l'investigation de l'interaction entre les ions énergétiques et la turbulence électrostatique du plasma, le développement de techniques d'imagerie du plasma et de sa turbulence en utilisant des caméras rapides, l'observation d'un gradient critique de pression pour la stabilisation de certains modes générant la turbulence, l'amélioration du design des sondes et de l'analyse des données, le développement d'un code de simulation numérique fluide tridimensionnel de la turbulence dans TORPEX, et le développement d'un système à fluorescence induite par LASER ayant pour but de mesurer la fonction de distribution des ions dans le plasma.

Le groupe *Fusion Technology Materials*, au PSI, a pour objectif principal l'étude des effets des dégâts provoqués par l'irradiation des matériaux structurels entourant les futurs réacteurs de fusion. Dans ces machines, les neutrons de fusion à haute énergie produiront des cascades de déplacements et des transmutations nucléaires. Les activités de R&D se sont portées sur le développement et la caractérisation de matériaux métalliques à faible activation pour les réacteurs de fusion, notamment des aciers ferritiques et des matériaux à base de tungstène, et la qualification de ces matériaux pour ITER et pour IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*), un projet d'installation destinée à tester les matériaux de fusion sous irradiation. L'approche scientifique est basée sur une analyse à échelle multiple (micro-, méso- et macroscopique) et comporte un volet expérimental et un volet de modélisation. Les expériences d'irradiation ont été effectuées sur la *Swiss Spallation Neutron Source* (SINQ) au PSI, ainsi que sur d'autres installations en Belgique, aux Pays-Bas et en Hongrie.

Le groupe *Superconductivity*, au PSI, a été actif dans le test de supraconducteurs pour les aimants utilisés dans la fusion magnétique, notamment ITER et JT60-SA, ainsi que dans diverses activités de R&D portant sur le développement de joints, d'amenées de courant, de pertes AC et de résistance inter-filaire. Des travaux de préparation pour la future installation de test EDIPO ont également été effectués.

Une part importante des travaux effectués au CRPP en 2009 est étroitement liée à ITER :

- Le développement de sources hyper-fréquences (gyrotrons) pour ITER. L'inspection d'un premier prototype de gyrotron à 170 GHz/2 MW, après une période de tests, a révélé des dégâts inattendus dans le tube. Cela a conduit à un *redesign* complet de certains de ses composants.
- L'installation d'un banc d'essai pour le test des gyrotrons d'ITER s'est poursuivie, avec l'installation d'un générateur de haute puissance et haute tension.
- Le lanceur d'ondes hyper-fréquences pour ITER. Le CRPP est l'Association principale impliquée dans la conception, l'analyse et le test de ce lanceur.
- L'usage de l'installation SULTAN pour le développement et le test des supraconducteurs d'ITER. L'installation SULTAN est unique au monde pour qualifier les supraconducteurs qui seront utilisés pour ITER. En 2009, plusieurs échantillons destinés aux bobines de champ toroïdal ont été testés pour leurs propriétés de courant critique et de pertes AC (Figure 2). Des expériences visant à caractériser le comportement thermo-hydraulique du flux d'hélium dans les conducteurs d'ITER ont également été effectuées.

Figure 2 : assemblage d'échantillons de test de supraconducteurs pour le champ magnétique torique d'ITER (CRPP/PSI).

- Le développement des diagnostics magnétiques sur ITER s'est poursuivi en 2009, avec la signature du consortium *Itermag* et le développement de prototypes et la calibration de senseurs hors chambre.
- Des simulations numériques complètes du *tokamak* ITER, servant à la modélisation de scénarios, combinant un code de calcul d'évolution de l'équilibre et d'un code de transport, ont été effectuées. Mentionnons en particulier le contrôle simultané des profils de courant et de température.

Le CRPP a activement participé à l'exploitation du *tokamak* Européen JET. Des études de la physique du bord du plasma ont été entreprises, portant en particulier sur les phénomènes de relaxation récurrente, appelés *Edge Localized Modes*, et de la densité de puissance instantanée qui leur est associée. Des expériences, couronnées de succès, visant à démontrer le contrôle de certaines instabilités par l'application de puissance radiofréquence sous forme d'ondes se propageant dans le tore, ont été faites. Enfin, des milliers de mesures de fréquence et d'amortissement de certains modes potentiellement déstabilisés par les ions rapides ont été prises. L'analyse de ces mesures a porté en particulier sur l'effet de l'élongation de la section du plasma.

Toutes ces activités de recherches ont abouti en 2009 à une centaine d'articles scientifiques dans des revues spécialisées et à une centaine de communications lors de congrès internationaux, dont plusieurs en tant que papiers invités.

L'excellence scientifique se manifeste aussi dans la formation : le CRPP a environ 40 doctorants sur un effectif total d'environ 160 personnes. Enfin, en 2009, le CRPP a maintenu ses tâches d'enseignement de base et ses nombreuses activités de relations publiques visant à expliquer la physique des plasmas et la fusion thermonucléaire contrôlée à des non-spécialistes.

En parallèle, le CRPP a poursuivi les actions qui lui ont été confiées par le SER/SBF dans le cadre des engagements suisses pour l'« Approche élargie » (*Broad Approach*). Ceux-ci portent sur :

- Des études d'ingénierie sur un système d'alimentation haute tension pour les gyrotrons du *tokamak* japonais JT60-SA ;
- Des études préliminaires sur le système cryogénique pour une installation de test des aimants supraconducteurs du *tokamak* japonais JT60-SA ;
- La conception d'une cellule de test (la « *creep fatigue test cell* ») pour IFMIF ;
- La R&D en vue de la caractérisation des matériaux en utilisant des mini échantillons ou éprouvettes dans le cadre du futur DEMO.

En plus, le CRPP assure la tâche de promotion industrielle dans le domaine de la fusion et d'ITER. Un conseiller industriel a été engagé.

Collaboration nationale

Studies related to plasma-wall interaction in ITER, Université de Bâle [2, 8] :

Une modification de JET, ayant pour but de fournir une expérience de l'opération en conditions stationnaires et transitoires avec une paroi semblable à ITER, est en cours de préparation. Un des aspects de ce changement est que la réflectivité des composants métalliques est substantiellement plus élevée que celle des fibres de carbone composites utilisées jusqu'à présent. Des mesures de réflectivité d'échantillons de tuiles de JET ont été effectuées à l'Université de Bâle. Ces données sont utilisées afin de prédire les contributions additionnelles aux mesures spectroscopiques additionnelles.

Le rhodium (Rh) est considéré comme une des matériaux les plus prometteurs pour les miroirs des systèmes de diagnostics d'ITER. Il est ainsi envisagé d'utiliser des dépôts de couches minces de rhodium sur des substrats métalliques polis. Afin d'assurer la fiabilité de ces composants dans un environnement de fusion nucléaire, il est nécessaire de déterminer leur stabilité chimique et, notamment, la réactivité du rhodium aux impuretés typiques d'un *tokamak*, telles que l'oxygène. En effet, tout changement dans la composition de la surface va affecter la réflectivité du miroir et donc le signal mesuré par le système de diagnostic. Pour étudier la question, des tests de recuit (10 fois pendant 5 h à 200 °C dans l'air) ont été effec-

tués. Aucune évolution de la réflectivité n'a été observée. Les observations optiques n'ont révélé aucune modification ou délamination de la couche. Afin d'étudier la procédure de recuit d'ITER, un échantillon déposé sur du molybdène a été porté pendant 6 h à 400 °C dans le vide. Les observations à la suite de ce traitement ont été similaires, c'est-à-dire qu'aucuns changements de la réflectivité, ni de délamination ou de modification de la surface n'ont été relevés.

Collaboration dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie

Le programme de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [9] dans le domaine de la fusion nucléaire est étroitement coordonné avec les programmes de recherche nationaux et avec d'autres programmes internationaux, y compris le programme « Fusion » d'Euratom. Les *Implementing Agreements* (IA) de l'AIE 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 ces IA, et les chercheurs suisses sont directement impliqués dans deux de ces IA, l'un concernant la recherche sur les matériaux (CRPP), l'autre étudiant les interactions plasma-paroi du réacteur (Université de Bâle).

À travers Euratom, le CRPP poursuit des collaborations avec les laboratoires de fusion du monde entier.

Références

[1] Site internet CRPP : http://crppwww.epfl.ch

[2] Site internet Universität Basel : http://pages.unibas.ch/phys-esca

[3] Site internet Joint Undertaking F4E : http://fusionforenergy.europa.eu/index_en.htm, Informations sur le Joint Undertaking «Fusion For Energy» et ses activités, incluant des appels d'offres ou des offres d'emplois

[4] Site internet ITER-industry : www.iter-industry.ch Informations sur les offres d'emplois et sur les appels d'offres en relation avec le projet ITER ou sur la recherche européen dans le domaine de la fusion

[5] Site internet EFDA : www.efda.org, Informations sur la recherche européenne dans le domaine de la fusion

[6] Site internet ITER : www.iter.org, Informations sur le projet ITER

[7] Site internet JET : www.jet.efda.org, Informations sur le Joint European Torus JET

[8] L. Marot, P. Oelhafen, Universität Basel : **Studies related to plasma-wall interaction in ITER** (RA/JB)

[9] http://pages.unibas.ch/phys-esca/fusion.html

[10] Site internet des Accords d'exécution en fusion nucléaire de l'AIE : www.iea.org/Textbase/techno/technologies/fusion.asp

Rapport de synthèse 2009 de la cheffe de programme OFEN
Synthesebericht 2009 der BFE-Programmleiterin

Forschungsprogramm Radioaktive Abfälle

Simone Brander

simone.brander@bfe.admin.ch

Kommunikation mit der Gesellschaft

An der Tagung «Bevölkerung – Fachleute – Behörden: Wie ist «gute» Kommunikation möglich?» vom 23. September 2009 wurden die Ergebnisse des Forschungsprojekts *Kommunikation mit der Gesellschaft* vorgestellt.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Das Forschungsprogramm *Radioaktive Abfälle* hat zum Zweck, die regulatorischen Forschungstätigkeiten des Bundes zu koordinieren. Im Rahmen des Forschungsprogramms werden neben technisch-naturwissenschaftlichen Projekten auch solche aus geistes- und sozialwissenschaftlichen Bereichen durchgeführt. Das Programm wurde von einer Arbeitsgruppe aus Vertreterinnen und Vertretern des Bundesamtes für Energie (BFE), der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)[1], der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), der Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) sowie einer Fachhochschule in den Jahren 2006/07 erarbeitet und mit der Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (Agneb) konsolidiert. Eine Ad-hoc-Untergruppe der Agneb entwarf im April 2008 einen Zeitplan für die anstehenden Forschungsprojekte und diskutierte die Abhängigkeiten der einzelnen Forschungsprojekte untereinander. An der Agneb-Sitzung vom 12. September 2008 wurde das Forschungsprogramm *Radioaktive Abfälle* verabschiedet. Mit diesem ist der Forschungsbedarf im Bereich Entsorgung radioaktiver Abfälle des Bundes bis ca. 2013 abgedeckt. Das BFE betreut die geisteswissenschaftlichen Projekte und das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) die regulatorische Sicherheitsforschung. Sowohl das BFE als auch das ENSI initiieren die Projekte in ihrem Bereich, vergeben die Aufträge und stellen die Finanzierung sicher. Die Agneb begleitet und koordiniert die Umsetzung und Aktualisierung des Forschungsprogramms *Radioaktive Abfälle*. Die einzelnen Forschungsprojekte werden wissenschaftlich begleitet. In diesen Begleitgruppen sind je nach Projekt die entsprechenden Bundesstellen vertreten und/oder Vertretende der Hochschulen sowie weitere Expertinnen und Experten. Im Jahr 2009 bildeten die Themen *Kommunikation mit der Gesellschaft* sowie *Wissenserhalt und Markierungskonzepte* die Schwerpunkte des BFE. Das ENSI arbeitete am Forschungsprojekt *Abfallbewirtschaftung im Vergleich*. Detaillierte Angaben zu diesem Projekt finden sich im Erfahrungs- und Forschungsbericht des ENSI.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Kommunikation mit der Gesellschaft

Das Projekt *Kommunikation mit der Gesellschaft* startete im Juni 2007. Das Ziel war, Grundlagen für die Informations- und Kommunikationstätigkeiten der Behörden und der partizipativen Gremien während der Umsetzungsphase des *Sachplans geologische Tiefenlager* zu liefern und aufzuzeigen, wie Vertrauen zwischen den Akteurinnen und Akteuren aufgebaut und ein konstruktiver Dialog geführt werden kann. Das Projekt wurde von externen Fachleuten durchgeführt und von einer Begleitgruppe unter der Leitung des BFE unterstützt.

Die Resultate des Projektes sind in zwei Berichten festgehalten: Einer enthält die Synthese der ausgewerteten Fallstudien in Belgien, Deutschland und Schweden, ein anderer Grundlagen guter Kommunikationspraxis. Darauf basierend wurde ein Leitfaden für die Kommunikation in den Standortregionen erstellt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt sind: Kommunikation im Standortauswahlverfahren muss Vertrauen bilden, die Rollen der Akteurinnen und Akteure klar machen, die Bevölkerung mit einbeziehen, primär lokal ausgerichtet und verständlich sein. Im Umgang mit Medien wurde gefolgert, dass auf Emotionen Rücksicht genommen werden und die lokalen Medien als Stimme für die Region für den Prozess gewonnen werden sollten.

Grenzen des Forschungsprojektes waren, dass Kommunikation nicht isoliert betrachtet werden kann, und deren Wirkung dadurch schwierig abschätzbar ist, sowie dass qualitative Interviews jeweils nur Teilaspekte wiedergeben.

Wissenserhalt und Markierungskonzepte

Das im Sommer 2008 gestartete Projekt hat zum Ziel, einen Überblick über den heutigen Stand der Kenntnisse bezüglich des möglichen Vorgehens zur langfristigen Weitergabe von Informationen sowie über den internationalen Stand der Vorhaben und Anforderungen an die Markierung von Tiefenlagern zu schaffen. Methodisch wird dabei so vorgegangen, dass zuerst System und Zeitrahmen und daraus abgeleitet die Fragestellungen definiert werden. Danach wird anhand bestehender Literatur analysiert, in welchen Punkten der Wissensstand zur Beantwortung der Fragen ausreicht bzw. wo noch Lücken bestehen. Das Thema Markierung und Wissenserhalt ist wegen seiner Interdisziplinarität anspruchsvoll. Das Forschungsprojekt wird eine Grundlage zur weiteren Diskussion des Vorgehens bezüglich der langfristigen Weitergabe von Informationen sowie über Art und Weise der Markierung von Tiefenlagern im schweizerischen Kontext darstellen. Die Bestandesaufnahme wird im 2010 abgeschlossen.

Abfallbewirtschaftung im Vergleich

Das ENSI bearbeitet das Projekt *Abfallbewirtschaftung im Vergleich* zusammen mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU), dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) sowie der Kommission für nukleare Sicherheit (KNS). Für spezifische Fragestellungen werden Spezialistinnen und Spezialisten der Nuklearindustrie (Abfallproduzierende und die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra) einbezogen. Das Projekt beinhaltet strategische und technisch/wissenschaftliche Überlegungen zur aktuellen Bewirtschaftung der radioaktiven und nicht-radioaktiven Abfälle. Sie betreffen unter anderem die Abfallminimierung, den Umgang mit organikahaltigen radioaktiven Abfällen und die Verbringung metallischer Werkstoffe in geologische Tiefenlager.

Die Zielsetzung für das Projekt *Abfallbewirtschaftung im Vergleich* ist eine systematische Analyse der heutigen Bewirtschaftungspraxis für radioaktive und nicht-radioaktive Abfälle. Es wird geprüft, ob relevante Regelungen und Prinzipien des Umweltschutzgesetzes in der Gesetzgebung zur Bewirtschaftung radioaktiver Abfälle nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden. Die Studie soll aufzeigen, wo bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle diesbezüglich Handlungsbedarf besteht und welche Massnahmen angezeigt sind. In Bereichen, wo kein Handlungsbedarf besteht, soll die Studie dafür überzeugende Begründungen liefern.

Die Abwicklung des Projekts hat im Sommer 2008 mit der Projektplanung und einer Bestandesaufnahme hinsichtlich der gesetzlichen Grundlagen zur Abfallbewirtschaftung (Arbeitspaket AP 1), einer Literaturstudie über nationale Strategien und internationale Empfehlungen zur Bewirtschaftung von radioaktiven und nicht-radioaktiven Abfällen (AP 2) sowie der Beurteilung des Inventars der radioaktiven Abfälle in Hinblick auf organische und metallische Inhaltsstoffe (AP 3) begonnen. Gleichzeitig wurde von der Nagra die Verfügbarkeit von Methoden zur Mineralisierung organischer radioaktiver Materialien wie Ionenaustauscherharze evaluiert.

Im Berichtsjahr konzentrierten sich die Projektarbeiten vorwiegend auf AP 4: Vermeidungspotenzial und Behandlungsverfahren. Zu diesem Zweck wurden die Abfallverursachenden (Kernkraftwerke, Forschungseinrichtungen) nach ihren Prinzipien und Methoden der Abfallbewirtschaftung befragt.

In Hinblick auf die zentralen Fragestellungen des Projekts erweisen sich die folgenden radioaktiven Abfälle als besonders bedeutungsvoll: Harze, Konzentrate und Mischabfälle aus dem Betrieb der Kernkraftwerke sowie Abfälle aus deren Nachbetriebsphase. Die Zusammensetzung der Abfälle (insbesondere Organika und Metalle) ist bekannt und in den entsprechenden Abfallsortenberichten umfassend dokumentiert.

Nationale Zusammenarbeit

Im Auftrag der Agneb führt das BFE das Forschungssekretariat des Forschungsprogramms *Radioaktive Abfälle*. Das Forschungssekretariat stellt im Hinblick auf die Umsetzung der geplanten Forschungsprojekte die Koordination mit dem ENSI und den anderen Bundesstellen sicher. Zu diesem Zweck traf sich im Jahr 2009 die Umsetzungsgruppe *Forschungsprogramm* zu vier Sitzun-

gen (5. Mai 2009, 8. Juli 2009, 25. August 2009, 3. November 2009). Die Umsetzungsgruppe setzte sich aus Vertretungen von BFE, ENSI, KNS, PSI und Swisstopo zusammen. Zudem wurde das Forschungsprogramm *Radioaktive Abfälle* gemeinsam von BFE und ENSI aktualisiert, von der Agneb am 27. November zur Kenntnis genommen und am 14. Dezember 2009 von der BFE-Geschäftsleitung zur Veröffentlichung empfohlen sowie ins BFE-Forschungsprogramm aufgenommen.

Am 23. September 2009 hat das BFE in Baden eine Tagung mit dem Titel «Bevölkerung – Fachleute – Behörden: Wie ist «gute» Kommunikation möglich?» durchgeführt und die Ergebnisse des Forschungsprojekts *Kommunikation mit der Gesellschaft* präsentiert. In Referaten und einer Podiumsdiskussion wurden Erfahrungen aus Schweden, Belgien und der Schweiz beleuchtet und davon Grundsätze für eine «gute» Kommunikation abgeleitet.

Am 24. November 2009 fand ein Austauschtreffen zwischen der Professur Scholz (ETH Zürich) und der Sektion Entsorgung radioaktive Abfälle statt. Diskutiert wurden die (Zwischen-)Ergebnisse von Forschungsprojekten in den Bereichen Kommunikation, Wahrnehmung langer Zeiträume, Gerechtigkeits- und Prozessfairness, geschlechtsspezifische Informationsverarbeitung sowie Meinungsbildung bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Internationale Zusammenarbeit

Vom 25.–27. März 2009 traf sich das *Radioactive Waste Management Committee* (RWMC) der OECD in Paris. Neben der Berichterstattung aus diversen Arbeitsgruppen wurden die Schwerpunkte «Nationality of waste» und «Qualified human resources in the specific field of waste management and disposal» diskutiert. Weiter wurde der Vorschlag für ein neues Forschungsprojekt «Long-term memory and the preservation of information» gemacht. Viele Staaten sind am Projekt interessiert. Die Schweiz hat ihre Mitarbeit zugesagt.

In Bar-le-Duc (F) fand vom 7.–9. April mit dem Thema «Repositories and host regions: Envisaging the future together» ein nationaler Workshop des *Forum on Stakeholder Confidence* FSC statt. Es wurde über das französische Entsorgungsprogramm und über die laufenden Arbeiten rund um das unterirdische Forschungslabor von Meuse/-Haute Marne (Bure) informiert. Es werden grosse Anstrengungen im Bezug auf Information der Bevölkerung unternommen. Anspruchsvoll im französischen Verfahren ist die Schaffung von transparenten und klaren Abläufen und Entscheidkompetenzen.

Vom 15.–17. September 2009 fand in Paris das 10. Jahrestreffen des FSC statt. Nebst dem Informationsaustausch über die verschiedenen Tätigkeiten des FSC, anderer internationaler Gruppen und der Mitgliedsländer wurde der Einbezug regionaler Behörden in Auswahlverfahren verschiedener Länder betrachtet. Dabei zeigte sich, dass bei existierender föderaler oder dezentraler Struktur der Einbezug gewählter regionaler Behörden für das Verfahren wichtig und vertrauensbildend sein kann. Ihnen sind die regionalen Gegebenheiten bekannter als nationalen Behörden. Ein weiteres, an dem Treffen behandeltes Thema war die Frage, wie dauerhafte Beziehungen zwischen den Entsorgungsverantwortlichen, institutionellen Akteurinnen und Akteuren sowie der Standortgemeinde aufgebaut werden können.

In Göteborg fand vom 15.–17. Dezember 2009 die internationale und interdisziplinäre Konferenz «Managing Radioactive Waste – Problems and Challenges in a Globalizing World» mit mehr als 100 Teilnehmenden statt. Organisiert wurde die Konferenz von CEFOS, dem *Centre for Public Sector Research* der Universität Göteborg. Die Tatsache, dass noch kein Land ein Lager für hoch aktive Abfälle gebaut hat, stellt eine Renaissance der Kernenergie in Frage. Werden mehr Kernkraftwerke in mehr Ländern gebaut, hat dies nicht nur grössere Abfallmengen zur Folge, sondern auch eine Verteilung des radioaktiven Abfalls über einen grösseren Raum. Zudem wird die Nuklearindustrie durch die fortschreitende Globalisierung immer mehr privatisiert, konzentriert und internationalisiert, was zu Unsicherheiten bei den Zuständigkeiten führen kann: Wer ist verantwortlich für einen sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen? Unter diesem Oberthema beleuchteten und diskutierten die Teilnehmenden der Konferenz verschiedene

Aspekte wie z. B. Kommunikation mit Stakeholdern, die Rolle der Geografie, Unsicherheiten und unsicheres Wissen, Akzeptanz und Risikowahrnehmen sowie Ethik bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Im Tagungsblock «What Future Governance – Local, National or International?» präsentierte das BFE ein Paper mit dem Titel «A method for Identifying Social Structures of Siting Regions for Radioactive Waste Repositories in Switzerland». Darin wird eine Methode zur Erfassung der vorhandenen Sozialstruktur in den Standortregionen des Sachplanverfahrens zur Diskussion gestellt, die im Hinblick auf den Aufbau der Partizipation zur Anwendung kommen soll.

Ausblick 2010

Im Jahr 2010 sollen diverse neue Forschungsprojekte gestartet werden. Unter der Federführung des BFE sollen die Themen *Werthaltungen und Interessen in der Entsorgung radioaktiver Abfälle* sowie *Umweltpolitische Fragen* und *Gesellschaftliche Veränderungen und Entsorgung* angegangen werden. Die beiden letztgenannten greifen dringende ethische und juristische Fragen auf, die für den weiteren Verlauf der Sachplanverfahrens äusserst interessant sind.

Zudem wird 2010 voraussichtlich die Literaturstudie zur Markierungsthematik abgeschlossen und das weitere Vorgehen für den zweiten Projektteil festgelegt.

Die Weiterbearbeitung des Projekts *Abfallbewirtschaftung im Vergleich* sieht für die erste Hälfte 2010 eine Konsolidierung des Arbeitspakets (AP) 4 vor: Varianten der *Abfallbewirtschaftung – Vermeidungspotential und Behandlungsverfahren*. Im parallel dazu bearbeiteten AP 5 (Risiko-orientierte Abfallbewirtschaftung) werden die bezüglich der geologischen Tiefenlagerung sicherheitsrelevanten Abfalleigenschaften identifiziert und beurteilt. Wo angezeigt, werden Massnahmen zur Minderung des Sicherheitsrisikos entwickelt. Arbeitsschwerpunkt des 2. Halbjahres 2010 wird das AP 6 (Gesamtbeurteilung und Handlungsempfehlungen) bilden. Gemäss aktuellem Terminplan werden die Projektergebnisse gegen Ende 2010 vorliegen.

Aus dem Forschungsbereich «Endlagerkonzepte» werden unter der Leitung des ENSI im Jahr 2010 zwei technisch-wissenschaftliche Projekte vorbereitet und abgewickelt. Das Projekt *Auslegung und Inventar des Pilotlagers* beinhaltet die Erarbeitung von technischen und sozio-ökonomischen Anforderungen, die später zum zielorientierten Betrieb des Pilotlagers beitragen. *Monitoringkonzept und -einrichtungen* bezweckt die Entwicklung von konzeptionellen und technischen Grundlagen im Hinblick auf die Überwachung des Pilotlagers während dessen Betrieb und nach dem Verschluss des geologischen Tiefenlagers.

Publikationen

[1] Gallego Carrera D., Schenkel W. et al. (2009): Sachplan geologischeTiefenlager – Forschungsprojekt *«Kommunikation mit der Gesellschaft»: Grundlagen für die Kommunikation in den Standortregionen*, Bundesamt für Energie BFE, Bern.

[2] Gallego Carrera D., Schenkel W. et al. (2009): Sachplan geologische Tiefenlager – Forschungsprojekt *«Kommunikation mit der Gesellschaft»: Wissenschaftlicher Schlussbericht*, Bundesamt für Energie BFE, Bern.

[3] Schenkel W. (2009): *Sachplan geologische Tiefenlager – Arbeitshilfe für die Kommunikation in den Standortregionen*, Bundesamt für Energie BFE, Bern.

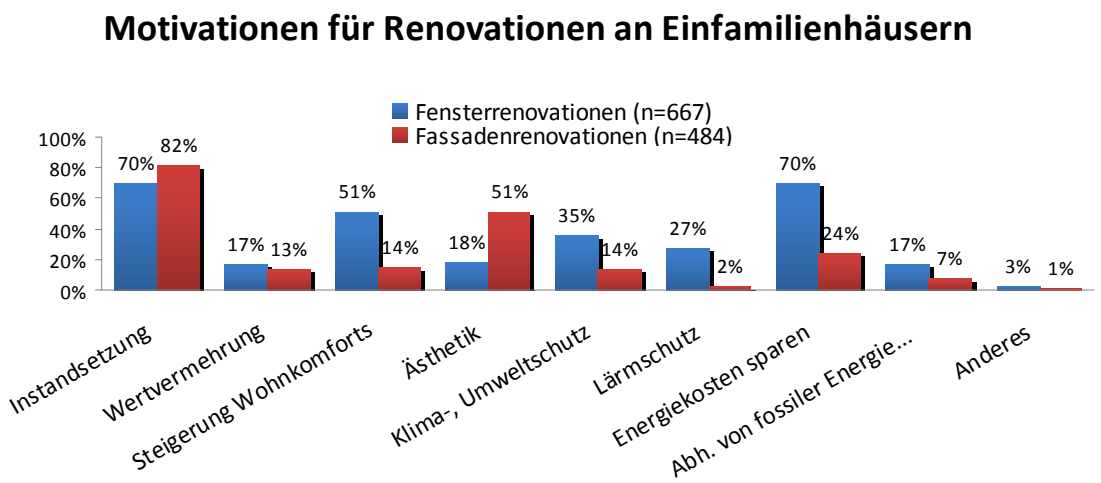
[1] Seit 1.1.2009 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)

Rapport de synthèse 2009 de la cheffe de programme OFEN
Synthesebericht 2009 der BFE-Programmleiterin

Forschungsprogramm Energie–Wirtschaft–Gesellschaft

Nicole A. Mathys

Nicole.Mathys@bfe.admin.ch



Erste Auswertung der Umfrage bei EFH-Besitzern, S. Banfi, M. Filippini, C. Ramseier [1]

Schweizer Einfamilienhausbesitzer renovieren ihre Fenster vor allem zur Instandsetzung des Hauses, und um Energiekosten einsparen zu können. Weiter sind Wohnkomfort und Klima- und Umweltschutz wichtige Aspekte. Bei der Renovation der Fassade steht die Instandsetzung im Vordergrund, gefolgt von Ästhetik und Einsparung von Energiekosten.

Programmschwerpunkte und anvisierte Ziele

Im **Forschungsprogramm Energie–Wirtschaft–Gesellschaft (EWG)** des Bundesamts für Energie (BFE) werden ökonomische, soziologische, psychologische sowie politische Fragestellungen bezüglich der Produktion, der Verteilung und der Nutzung von Energie untersucht. Das Ziel ist es zu ergründen, wann staatliche Eingriffe nötig sind und falls ja, welches die beste Intervention ist.

Das im Forschungsprogramm erarbeitete Wissen ist die Basis für die Behandlung sowohl politischer Geschäfte (politiknahe Forschung) als auch für die längerfristige Ausrichtung der Energiepolitik und die Weiterentwicklung der internationalen Energieforschung (angewandte Forschung). Es dient somit der Erarbeitung neuer und der Überprüfung bestehender politischer Instrumente. Die Forschungsresultate kommen nebst der Wissenschaft den Kantonen, der Energiewirtschaft sowie verschiedenen Verbänden und Organisationen zugute.

Die energiewirtschaftliche Forschung befasst sich mit den energiepolitischen Rahmenbedingungen in den vier Wirtschaftsektoren **Haushalte** (Gebäude und Elektrogeräte), **Verkehr**, **Dienstleistungen und Industrie** (dieses Jahr wurden dazu keine Studien erarbeitet), wie sie auch den Perspektivmodellen zu Grunde liegen. Dazu kommen die **Sektor übergreifende Energiepolitik**, der **Technologietransfer** und der **Energieumwandlungssektor (Strom- und Wärmeerzeugung, Raffinerien)**.

Das Forschungsprogramm verfolgt zudem aktiv alle wesentlichen nationalen (und falls angebracht internationalen) Aktivitäten im sozioökonomischen Bereich. Das vorliegende Konzept beschränkt sich jedoch auf eine Auswahl der vom BFE mitfinanzierten Projekte.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2009

Haushalte (Gebäude und Elektrogeräte)

Durch energetische Erneuerungen können bedeutende Energieeinsparpotenziale ausgenutzt werden. Angesichts der langen Renovationszyklen von bis zu 40 Jahren und mehr ist es zudem wichtig, dass bei heutigen Erneuerungen energetische Kriterien mitberücksichtigt werden. Deshalb erarbeiten zwei Studien die Beweggründe und Hemmnisse von Sanierungen, und eine weitere Studie berechnet die aktuellen effektiven CO_2-Vermeidungskosten bei Wohngebäudeerneuerungen.

Projekt: Ökonomische Analyse des Renovationsverhaltens von EFH-Besitzern

Dieses Projekt [1] befasst sich mit den Renovationsentscheiden von EFH-Eigentümern analysiert, wie häufig und welche energetische Erneuerungen an der Gebäudehülle in den letzten Jahren durchgeführt worden sind. Spezielle Beachtung wird auf die Beweggründe gelegt, welche einem Entscheid für eine bestimmte Art von Erneuerung (Unterhalt oder energieeffiziente Erneuerung) zugrunde liegen. Es wurde eine schriftliche Umfrage in fünf Kantonen (AG, BE, BL, TG, ZH) durchgeführt, mit der das tatsächliche Renovationsverhalten von rund 1580 EFH-Eigentümern erfasst wurde. Aus der ersten Umfrage wurde ersichtlich, dass rund 60 % der EFH-Eigentümern in den letzten 16 Jahren eine Erneuerung an einem oder mehreren Teilen der Gebäudehülle vorgenommen haben. Die meisten Erneuerungen wurden über mehrere Jahre durchgeführt. Energetische Erneuerungen wurden hauptsächlich bei den Fenstern und dem Dach durchgeführt. Jene Besitzer, die in den vorangegangenen Jahren reine Unterhaltsarbeiten durchgeführt haben, gaben hauptsächlich ökonomische/finanzielle Gründe für diesen Entscheid an. Weiter wird eine Stichprobe von EFH-Eigentümern über ihr zukünftiges, hypothetisches Erneuerungsverhalten (Choice Experiment) befragt.

Beide Umfragen sollen Hinweise dazu geben, welche Bedeutung den ökonomischen Rahmenbedingungen, den wirtschaftspolitischen Massnahmen und den sozio-psychologischen Aspekten (z. B. Einstellung der Befragten zu energie- und umweltpolitischen Fragestellungen) bei Erneuerungsentscheiden zukommt. Das Projekt wird zudem wirtschaftspolitische Empfehlungen erarbeiten, mit denen mögliche Hemmnisse bei der Durchführung

von energetischen Investitionsentscheiden abgebaut werden können.

Eine Umfrage bei rund 250 Architekten und Architektinnen aus der deutschen Schweiz ergab, dass Energieeffizienz verstärkt ein Thema bei Erneuerungen ist. Gleichzeitig sehen die Architekten aber auch den zusätzlichen Bedarf an weiteren finanziellen Mitteln, um den Kapitalzugang zu erleichtern. Auch rechtliche und institutionelle Probleme (Denkmalschutz, Baurecht) wurden genannt, welche es durch geeignete Instrumente zu überwinden gilt.

Projekt: Investitionsverhalten von MFH-Besitzern und Marktpotenziale hinsichtlich neuer Renovationstechniken und -konzepte

Dieses Projekt [2] wird detaillierte und vertiefte Informationen zum Entscheidungsprozess bei Erneuerungen von Mehrfamilienhäusern (MFH) liefern, wobei das Augenmerk bei Erneuerung mit neuen Retrofit-Technologien liegt. Mit Hilfe einer Umfrage bei Hauseigentümern in ausgewählten Kantonen (AG, BE, BL, TG und ZH) wird die Studie aufzeigen, über welche Informationen MFH-Eigentümer verfügen, welche Informationskanäle sie nutzen und welche Informationsdefizite bestehen. Zudem sollen mögliche Akzeptanzprobleme gegenüber den neuen Technologien (CCEM-Retrofit-Elemente)[i] frühzeitig erkannt und dadurch das Vorgehen bei Markteinführung angepasst werden.

Anhand der zu erhebenden Daten ist es möglich, die Sensitivität von verschiedenen wichtigen Einflussfaktoren bei Renovationsentscheiden von MFH-Eigentümern zu quantifizieren. Zu diesen Einflussfaktoren gehören die künftigen Energiepreise sowie allfällige Lenkungsabgaben, weitere energiepolitische Instrumente (z. B. Förderbeiträge, steuerliche Anreize, die Einführung eines Energie-Labels u.a.), veränderte Rahmenbedingungen (z. B. Anpassen des Mietgesetzes) sowie die Einführung von neuen Renovationskonzepten (wie sie im CCEM-Projekt entwickelt werden). Der Einfluss der genannten Faktoren wird zum einen anhand von realen Veränderungen zwischen 2000 und 2009 (Energiepreise, Förderprogramme, erhöhte Aktualität des Themas seit etwa 2004) und zum anderen anhand von hypothetischen (künftigen) Veränderungen aufgezeigt. Weiter wurde im Projekt die Umfrage bei den rund 250 Architekten und Architektinnen aus der deutschen Schweiz spezifisch ausgewertet. Zu den neuen Renovationskonzepten sind die Architekten geteilter Meinung mit leichtem Hang zu einer abneigenden Haltung. Hauptgründe dafür sind befürchtete Einschränkungen in ihrer Gestaltungsfreiheit und mangelnde Anpassungsfähigkeit des Renovationskonzepts an unterschiedliche Bedürfnisse des Bauobjekts. Diesem Umstand ist bei der Weiterentwicklung des Retrofit-Konzepts und bei dessen Vermarktung Rechnung zu tragen, z. B. mit einem hohen Flexibilitätsgrad und mit spezifischen Schulungen für Architekten.

Projekt: Gebäudepark Schweiz: CO2-Vermeidungskosten & -Einsparpotenziale

Bei der Konzeption der Energie- und Klimapolitik und bei der Ausgestaltung der Massnahmen zur Mobilisierung der energetischen Potenziale im Gebäudebereich sind die CO_2-Vermeidungskosten und die bestehenden Reduktionspotenziale von Interesse. Sie dienen der Information und Motivation der Gebäudeeigentümer und Gebäudeeigentümerinnen und zeigen – aufgeschlüsselt auf verschiedene Bauteile – die kosteneffizientesten Sanierungsmassnahmen auf. Bisher wurden die Kosten von Energieeffizienzmassnahmen bzw. die CO_2-Vermeidungskosten anhand von Modellrechnungen von Standardkosten für einzelne Gebäude oder für einzelne Sanierungsmassnahmen bestimmt. Vermeidungskosten aufgrund von effektiv aufgetretenen Kosten und Messungen der resultierenden Energieeinsparungen bei durchgeführten Gebäudesanierungen fehlen jedoch weitgehend oder sind nur für Einzelobjekte verfügbar.

Diese Informationslücke für den Sanierungsbereich von Wohngebäuden soll mit dem Forschungsprojekt *Gebäudepark Schweiz: CO2-Vermeidungskosten & Einsparpotenziale* [3] geschlossen werden, indem anhand realisierter energetischer Gebäudesanierungen bestimmt wird, wie hoch die CO_2-Vermeidungskosten bei bestehenden Wohnbauten nach Gebäudetyp sowie nach Massnahme sind, und welchen Streuungen die Vermeidungskosten unterworfen sind. Hierfür werden die Daten von 100 energetischen Sanierungen von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern ausgewertet, welche in den vergangenen Jahren durchgeführt wurden. Einerseits werden die Vollzugsdaten von 50 Objekten des Gebäudeprogramms der Stiftung Klimarappen mittels einer

Befragung der jeweiligen Gebäudeeigentümer für die im Projekt verfolgten Fragestellungen vervollständigt und ausgewertet (Gebäude, deren Erneuerung vor Herbst 2007 abgeschlossen wurde). Daneben werden die Daten von weiteren 50 Wohngebäuden ermittelt und ausgewertet, welche sich im Eigentum von Privaten, institutionellen Anlegern und der öffentlichen Hand befinden.

Verkehr

Im Allgemeinen wird auf kurzfristig steigende Treibstoffpreise mit der Reduktion der Fahrleistung respektive der vermehrten Benutzung des öffentlichen Verkehrs (ÖV) reagiert. Entsprechende Preiselastizitäten können dabei mittels Zeitreihenanalysen ermittelt werden. Die Erwartungen der langfristigen Preisentwicklung von fossilen Treibstoffen gehen jedoch von deutlich höheren Treibstoffpreisen aus, die bisher bekannte Preisniveaus übertreffen. Diese verschiedenen Dimensionen werden in den folgenden Projekten analysiert.

Projekt: Preiselastizität der Treibstoffnachfrage in der Schweiz

In dieser Studie [4] wird mittels Zeitreihenanalyse die Nachfrage nach Treibstoffen (Benzin und Diesel, sowie Benzin separat) in der Schweiz untersucht. Das Ziel des Projekts ist die Ermittlung der lang- und kurzfristigen Eigen-Preiselastizität der Nachfrage. Zu diesem Zweck werden Quartalsdaten über eine lange Zeitperiode (1970 bis 2008) von Benzin- und Dieselmengenabsatz auf gesamtschweizerischer Ebene verwendet und in Beziehung mit verschiedenen Erklärungsvariablen gesetzt. Wie erwartet, ist die Preiselastizität der Treibstoffnachfrage in der Schweiz verhältnismässig schwach (–0,27), selbst auf lange Frist. Die Preiselastizität der Benzinnachfrage ist in absoluten Werten etwas höher (–0,34) als jene der Treibstoffe. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass im Falle des Benzins die Substitutionsmöglichkeiten grösser sind (beispielsweise durch einen Übergang zu Diesel) als im Falle der Treibstoffe (bei denen Diesel bereits eingeschlossen ist). Die kurzfristige Preiselastizität für die Treibstoffnachfrage beläuft sich auf –0,08, jene nach Benzin auf –0,09. In Übereinstimmung mit der Wirtschaftstheorie sind die geschätzten Werte für die kurzfristige Elastizität in absoluten Werten tiefer als jene für die langfristige Elastizität. Die Benzinnachfrage ist ebenfalls elastischer als jene nach Treibstoffen. Die beiden Preiselastizitäten sind allerdings sehr schwach, zeigen sie doch, dass eine Preiserhöhung um 10 % eine Verringerung der nachgefragten Menge um weniger als 1 % nach sich zieht. Die Erhöhung des Mineralölsteuerzuschlags von 1993 zog einen Rückgang der nachgefragten Treibstoffmenge um etwa 3 % und der Benzinnachfrage um 3,5 % nach sich. Diese Abnahme ist zusätzlich zum Verbrauchsrückgang infolge der Preiserhöhung durch den Steuerzuschlag zu sehen. Sie stellt gewissermassen die psychologische Auswirkung der Steuer dar. Eine Erhöhung des Mineralölsteuerzuschlags bewirkt somit zwei Mengenrückgänge: einen ersten allein als Folge der Preiserhöhung, gefolgt von einer weiteren Reaktion der Konsumenten, die sich bewusst sind, dass die Preiserhöhung weder «natürlich» noch vorübergehend ist.

Projekt: Langfristige Treibstoffpreiselastizitäten: Einfluss auf die Mobilitätswerkzeugwahl und Wahl des Wohnstandorts

Dieses Projekt [5] schätzt die Auswirkungen deutlich höherer Treibstoffpreise ab. In einer mehrstufigen hypothetischen Befragung (stated preferences) wurden zunächst mögliche Verhaltensänderungen bezüglich des Besitzes und der Benutzung von Personenwagen und des öffentlichen Verkehrs untersucht. Dabei mussten die Befragten für verschiedene Treibstoffpreisniveaus die für ihren Haushalt ins Auge gefasste Personenwagenflotte bezüglich Motorisierung, Fahrzeugtyp und Fahrleistung spezifizieren. Daneben wurde über die Erfassung des hypothetischen Besitzes von ÖV-Abonnementen und deren Nutzung mögliche Substitutionseffekt mit abgebildet In einem zweiten Teil gaben die Befragten an, wie sie ihre Mobilitätsbedürfnisse an einem alternativen Wohnstandort bei ebenfalls steigenden Treibstoffpreisen befriedigen würden. Im letzten Teil der Befragung wurden die vorgängig spezifizierten Situationen zu Entscheidungssituationen der Wohnstandortwahl kombiniert.

Die befragten Haushalte reagierten bei steigenden Mobilitätskosten vor allem mit dem Wechsel von Benzin- zu Dieselmotoren, von grösseren und stärker motorisierten zu kleineren und schwächer motorisierten Modellen, sowie mit der Reduktion der Fahrleistung. Die aus ökonometrischen Modellen daraus abgeleiteten Elastizitäten sind abhängig vom Preisniveau und bewegen sich für das abge-

fragte Preisband von 1,5 – 5 CHF/l zwischen –0,31 und –0,58 für Benzin, +0,32 und –0,42 für Diesel und –0,24 und –0,99 für den gesamten Treibstoffkonsum. Damit entsprechen die Ergebnisse im unteren und somit vergleichbaren Preisbereich den Werten des Projektes [4].

Bezüglich der Wohnstandortwahl erwies sich die Veränderungswilligkeit, den Wohnstandort zu wechseln, um damit Mobilitätskosten zu verringern, als sehr klein. Basierend auf den Modellresultaten liessen sich Zahlungsbereitschaften des Verbleibens am ursprünglichen Wohnort berechnen. Da die durch die Änderung des Wohnstandortes zu erreichenden Mobilitätskosteneinsparungen nur in Ausnahmefällen der Höhe der Zahlungsbereitschaften des Verbleibens entsprechen, kann davon ausgegangen werden, dass Treibstoffpreiserhöhungen bis 5 CHF/l nur einen geringen Einfluss auf die Wohnstandortwahl ausüben.

Projekt: Tanktourismus

Das Betanken des Fahrzeugs ausserhalb der Landesgrenze, meist motiviert durch Preisüberlegungen der Fahrzeuglenker, wird auch Tanktourismus genannt. Dessen Anteil wird in der Schweiz auf ca. 10 % des gesamten Treibstoffabsatzes geschätzt. Im Projekt *Tanktourismus* [6] werden einerseits die treibenden Kräfte und Mechanismen analysiert, die dieses Phänomen erklären; dazu werden unter anderem Expertengespräche mit Tankstellengesellschaften und -betreibern, sowie mit Transporteuren geführt und ausgewertet. Andererseits wird ein ökonometrisches Modell verwendet, mit dem der Effekt unterschiedlicher Preisentwicklungen, d.h. Veränderungen der Treibstoff-Preisdifferenzen Schweiz/Ausland, abgeschätzt wird. Die quantitative Basis dazu liefert die Analyse der Absatz-Entwicklung einer Grosszahl von Tankstellen in verschiedenen Regionen mit unterschiedlichen Distanzen zur Grenze über die letzten rund 10 Jahre.

Sektor übergreifende Energiepolitik

Ein wichtiges Thema der energiepolitischen Diskussion stellt die offenbar geringe Bereitschaft von Haushalten dar, Investitionen in Energieeffizienz vorzunehmen, obwohl es sich eigentlich finanziell für sie lohnen müsste. Eine mögliche Ursache könnte darin liegen, dass die Haushalte ihren Entscheidungen hohe Diskontierungsraten zugrunde legen. Dies bedeutet, dass die zukünftigen Energiekosteneinsparungen einer Investition in Energieeffizienz so stark abgezinst werden, dass sie aus subjektiver Sicht die höheren Anschaffungskosten nicht rechtfertigen. Diese Problematik wird durch verschiedene Doktorandenprojekte tiefer untersucht.

Projekt: Energieinvestitionen und heterogene Präferenzen

Etwa zwei Drittel der Schweizer Haushalte sind Mieter. In diesen Fällen entscheidet in der Regel der Hauseigentümer über Investitionen in Gebäudehülle und -technik, sowie über die Anschaffung grösserer Haushaltsgeräte wie Kühlschränke oder Waschmaschinen. Während die anfänglichen Investitionskosten vom Eigentümer getragen werden, gehen die Nutzungskosten zu Lasten der Mieter. Somit bestehen für den Eigentümer nur bedingt Anreize, die Lebenszykluskosten insgesamt zu minimieren beziehungsweise in Energieeffizienz zu investieren. Das Forschungsprojekt *Energieinvestitionen und heterogene Präferenzen* [7] geht möglichen Ursachen solcher Investitionsentscheidungen nach. Dazu werden unter anderem Zeitpräferenzen und deren Zusammenhänge zu energiesparenden Investitionen untersucht. Im Schweizer Umweltsurvey 2007 zeigt sich, dass die subjektive Diskontrate weit über dem Marktzins liegt. Frauen weisen eine höhere Diskontrate auf als Männer. Des Weiteren steigt die Diskontrate mit zunehmendem Alter und sinkt mit zunehmendem Einkommen und zunehmender Bildung. Die Zusammenhänge zu umweltrelevanten Verhaltensweisen ergeben kein einheitliches Bild: Es zeigt sich beispielsweise, dass Personen mit höherer Diskontrate vermehrt Ein-Jahres-Halbtaxabos anstelle von mehrjährigen Abonnements kaufen und tendenziell weniger Energiesparlampen verwenden. Bei anderen Verhaltensweisen zeigen sich die erwarteten Zusammenhänge jedoch nicht.

Die Teilnehmer des Umweltsurveys wurden erneut anhand eines schriftlichen Fragebogens befragt, welcher auf das Thema Energiesparen und Zeitpräferenzen fokussiert ist. Des Weiteren wurde als Pretest für die Haupterhebung eine Online-Befragung durchgeführt. Die Stichprobe besteht aus knapp 1500 Studierenden der ETH Zürich (Response-Rate: 37 %).

Projekt: Der Einfluss von Heuristiken und Gewohnheiten auf den Energieverbrauch

Energiekonsumenten sind keine homogene Gruppe. Sie unterscheiden sich in verschiedenen Bereichen wie Gewohnheiten, Denkweisen und Einstellungen. Im Hinblick auf die Entwicklung und Umsetzung von wirksamen Energiesparmassnahmen ist es somit essentiell, die Energiesparmassnahmen spezifisch auf die unterschiedlichen Energiekonsumentengruppen auszurichten. Das Projekt *Der Einfluss von Heuristiken und Gewohnheiten auf den Energieverbrauch* [8] hat zum Ziel, mittels einer repräsentativen schriftlichen Umfrage, das Verbrauchs- und Sparverhalten sowie Einstellungen der Schweizer Bevölkerung im Zusammenhang mit Energie zu erfassen und darauf basierend unterschiedliche Typen von Energiekonsumenten zu identifizieren und zu beschreiben. Um einen ersten Einblick in die Verhaltens- und Denkweisen von Energiekonsumenten zu gewinnen und Ideen für den anschliessenden Fragebogen zu generieren, wurden im Vorfeld der Bevölkerungsbefragung zwei Gruppendiskussionen mit je sieben zufällig aus dem Raum Zürich ausgewählten Teilnehmern durchgeführt. Die Erkenntnisse aus den Diskussionsgruppen wurden anschliessend in die Entwicklung des Fragebogens einbezogen. Die Bevölkerungsbefragung beinhaltet sowohl Fragen zum allgemeinen Energieverbrauchsverhalten als auch personenbezogene Variablen, wie Wissen über das Thema Energie, Werte und Einstellungen, und umfasst die Bereiche Haushalt, Mobilität und Lebensmittel. Der Fragebogen wurde an rund 3'750 zufällig ausgewählte Haushalte in der Deutschschweiz und der Westschweiz verschickt.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts stellt die Untersuchung der Entscheidungsfindungssituation beim Kauf von Haushaltsgeräten dar. Viele Konsumenten denken bei der Auswahl von Haushaltsgeräten kurzfristig und wählen das vom Kaufpreis her günstigere und möglicherweise weniger energieeffiziente Gerät. Mit Hilfe von drei Experimenten wurden Möglichkeiten entwickelt und untersucht, wie man mittels gezielter Veränderung des Entscheidungsrahmens und der Informationspräsentation den Fokus auf Produktinformationen im Zusammenhang mit Stromverbrauch lenken und den Konsumenten entsprechend zu einem langfristigen Denk- und Entscheidungsverhalten motivieren könnte. In einem Experiment wird untersucht, ob durch Darbietung von einfacher zu verarbeitenden Informationen, wie Angabe der langfristigen Stromkosten oder zusätzliche Informationen zu Strompreis und durchschnittlicher Lebensdauer der Fokus stärker auf die langfristigen Kosten gelenkt werden kann. Das Experiment wurde in den oben erwähnten Fragebogen integriert.

Projekt: Die Rolle der Diskontrate für die Nachfrage nach energieeffizienten langlebigen Konsumgütern

Ebenfalls Verhalten bestimmende Faktoren sind die Unsicherheit über die Energiepreisentwicklung sowie die Einschätzung der zukünftigen persönlichen Einkommens- und Vermögenssituation. Diese spielen beim Diskontierungsverhalten ebenso eine Rolle wie die Zeitpräferenzen der Entscheidungsträger selbst. Aus diesem Grund muss ein ökonomisches Modell des Diskontierungsverhaltens alle wichtigen Entscheidungsvariablen enthalten, um Verhalten möglichst realitätsgetreu abbilden zu können. Das Projekt *Die Rolle der Diskontrate für die Nachfrage nach energieeffizienten langlebigen Konsumgütern* [9] dient dazu, ein solches Modell zu erstellen und mit Hilfe von empirischen Daten zu testen. Um verlässliche Daten zum Diskontierungsverhalten von Haushalten zu erhalten, wurde eine umfangreiche Feldumfrage in der deutschsprachigen Schweiz durchgeführt, deren Teilnehmer mittels einer repräsentativen Stichprobe ausgewählt wurden. Jede Person wird innerhalb eines Zeitraumes von 10 Monaten zweimal mit einer Serie von Entscheidungen konfrontiert, die Aufschluss sowohl über Risikoneigung als auch über Diskontierungsverhalten ermöglichen (Longitudinalstudie). Insgesamt wurden 554 Personen rekrutiert, von denen 68 % an der ersten Teilstudie teilgenommen haben. Die zweite Teilstudie soll es erlauben, Aussagen zur Stabilität des Verhaltens zu machen. Die Ergebnisse der Studie dienen zur Unterstützung bei der Wahl und der Gestaltung geeigneter Politikmassnahmen, die darauf abzielen, die Nachfrage nach energieeffizienten langlebigen Konsumgütern zu erhöhen.

Projekt: Energieeffizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass, Eindämmung

Reboundeffekte bezeichnen eine zusätzliche Nachfrage nach einer Dienstleistung oder einem Gut aufgrund höherer Effizienz. Damit die höhere Effizienz ein Nachfragesignal auslöst, muss eine gewisse von Null verschiedene Elastizität vorhan-

den sein, die Effizienz also ein knappes Gut betreffen. Reboundeffekte sind deshalb ganz allgemein Ressourcen-Effizienzeffekte (man könnte in Anlehnung an den neoklassischen Ansatz der Ökonomie noch allgemeiner sagen: Produktionsfaktor-Effizienzeffekte). Es kann sich sowohl um *Zeitressourcen* handeln (Umfahrungsstrassen führen zu höherer Zeiteffizienz und deshalb zu Mehrverkehr), um *Raumressourcen* (erhöhte Raumeffizienz führt zu erhöhter Nachfrage nach raumrelevanten Dienstleistungen oder Produkten: Erhöhen Städte die Ausnützungsziffern, ziehen mehr Personen in die Stadt), um Energieressourcen (Energiesparlampen lässt man länger brennen), oder um andere physikalische Ressourcen. Kein Reboundeffekt liegt hingegen vor, wenn die Nachfrage nach einem Gut oder einer Dienstleistung steigt aufgrund höherer Kaufkraft oder aus aus welchen Gründen auch immer geänderten Konsumentenpräferenzen.

Natürlich ist wirtschaftliches Wachstum aus der Sicht des nachhaltigen Konsums potenziell problematisch. Aber mit Reboundeffekten hat dies nichts zu tun, sondern mit Wirtschaftswachstum generell. Auch die Nachfrage nach vielen jener Produkte, deren Herstellung nicht energieeffizienter geworden ist (z. B. Fleisch), nimmt in Zeiten des Wirtschaftswachstums zu.

Die Studie *Energieeffizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass und Eindämmung* [10] behandelt ausschliesslich Fälle mit höherer Energieeffizienz. Drei kausale Erklärungsketten wurden unterschieden (monetärer Rebound, soziopsychologischer Rebound und regulatorischer Rebound), wobei in der bestehenden Literatur meist nur gerade der erstere untersucht wird. Ausserdem wurden drei deskriptiv unterscheidbare Arten von Rebound definiert: direkter Rebound, indirekter Rebound, und Rebound auf Makroebene. Es wurden drei Beispiele untersucht, die folgende Resultate ergaben:

- Bio-Konsumenten weisen auch insgesamt weniger Treibhausgasemissionen auf. Ein mentaler Rebound kann also nicht nachgewiesen werden. Offenbar ist der postulierte Effekt einer mentalen Umweltbelastungsbuchhaltung weniger stark, als die sich manifestierende Kohärenz im Konsumverhalten – Bio-Konsumenten verhalten sich gleichzeitig auch in anderen Konsumkategorien in Richtung höherer Ressourceneffizienz.
- In keinem der drei analysierten Automodelle traten mentale Reboundeffekte auf. Im Gegenteil scheinen Hybridkäufer gar einen kleinen «Rückschritt» bei der Autogrösse auf sich zu nehmen. Einschränkend gilt festzuhalten, dass die erzielten Resultate nur für das betreffende Kundensegment gelten, welches als «early market» («innovators» und «early adopters») bezeichnet werden kann. Wie bei Bio-Konsumenten scheinen auch Hybridkonsumenten ein konsistentes Konsumverhalten an den Tag zu legen. Es ist fraglich, ob dies auch für die nachfolgenden Kundensegmente gelten wird. Zu erwarten wäre, dass Reboundeffekte in Zukunft vermehrt auftreten werden.
- Es zeigt sich, dass – in gegebener Einkommensfklasse – tatsächlich mehr fliegt, wer kein Auto fährt.

Welchen Effekt haben erhöhte Erdölpreise und energiepolitische Massnahmen auf die Schweizer Wirtschaft? Welche Sektoren werden wie stark beeinflusst sein und wie wird sich die Schweiz im Vergleich zu anderen Nationen positionieren? Diese energiepolitisch und wirtschaftlich sehr wichtigen Fragen werden durch verschiedene Studien mit unterschiedlichem Vorgehen adressiert.

Projekt: The Effect of Energy Eficiency Enhancement on Innovation and Competitiveness

Führen steigende Energiepreise zu zunehmender oder abnehmender Wettbewerbsfähigkeit von wirtschaftlichen Unternehmungen und Branchen und damit einer ganzen Volkswirtschaft? Dieses Projekt [11] hat auf der Basis international vergleichbarer Zahlen im OECD-Raum über den Zeitraum 1985 – 2006 eine bestmögliche empirische Einschätzung vorgenommen. Ausgangspunkt der Untersuchung ist die Vermutung, dass Energiepreisschocks oder härtere Umweltregulierungen die Unternehmungen zu energieeffizienteren Programmen und Produkten führen. Durch die Veränderung der Kosten für Produktionsfaktoren können Innovationsprozesse ausgelöst werden, die sich zugunsten von Wettbewerbsfähigkeit auswirken können. Anzunehmen ist, dass Unternehmungen und Branchen mit überdurchschnittlich hoher Forschungs- und Entwicklungsintensität rascher reagieren als andere. Resultate zeigen, dass steigende Energiepreise, verursacht durch Marktmecha-

nismen und/oder politische Massnahmen in der Regel direkt zu einer Zunahme der Produktionskosten führen aber indirekt zu Effizienz- und Innovationseffekten in Produktion und Prozessen führen können. Insgesamt kann sich also die politische Massnahme positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmungen und ganzer Branchen niederschlagen. Dies ist für die meisten untersuchten Brachen und Ländern der Fall.

Projekt: Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen auf die Innovationskraft, die Beschäftigung und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweiz

Basierend auf verschiedenen Energiesparszenarien werden im Zuge dieses Projekts [12] die Entwicklung von Konsum, Wohlfahrt, Energieverbrauch und anderen Variablen dargestellt. Hierbei wird ein neu entwickeltes Modell, das CITE-Modell (CITE: Computable Induced Technology and Energy) verwendet, das sich im Vergleich zu anderen Modellen durch seine makroökonomischen Annahmen zu Wachstumsdynamiken unterscheidet. Die wesentliche Neuerung hierbei ist der explizite Einbezug der neuen Wachstumstheorie, d. h. Wachstum entsteht durch die Akkumulation von physischem und Wissenskapital, wobei der Anreiz zur Akkumulation endogen im Modell begründet wird. Eine genestete (d.h. verschachtelte) Struktur ermöglicht die Substitution zwischen einzelnen Produktionsfaktoren. Die verwendeten Szenarien orientieren sich an der aktuellen Diskussion zur zukünftigen Klimapolitik. Näher betrachtet werden unter anderem eine Reduktion des Energieverbrauchs um 35 % bis 2035 (angelehnt an das Szenario IV der Energieperspektiven), sowie ein Szenario, das in Kopenhagen diskutierte mögliche Reduktionsziele aufnimmt. Dabei werden die CO_2-Emissionien bis 2020 um 30 % und bis 2050 um 80 % reduziert. Als politisches Instrument steht dabei in beiden Fällen eine CO_2-Steuer zur Verfügung, die den Einsatz fossiler Energie verteuert. Die Modellrechnungen zeigen, dass die makroökonomischen Auswirkungen zukünftiger Energiepolitik relativ moderat und damit verkraftbar sind. Sowohl kürzer- als auch längerfristige Reduktionsziele führen zu relativ geringen Einbussen in Konsum und Wohlfahrt. Auf sektoraler Ebene führt die Einsetzung einer CO_2-Steuer je nach Reduktionsziel zu unterschiedlich stark ausgeprägten strukturellen Veränderungen. Verantwortlich für die Verschiebungen ist dabei in erster Linie die Energieintensität der Sektoren. Branchen mit vergleichsweise tiefem Energieanteil in der Produktion profitieren von der Einführung einer CO_2-Steuer, während Sektoren mit relativ hoher Energieintensität Verluste erleiden. Aus energiepolitischer Sicht findet also ein Strukturwandel in die gewünschte Richtung (d. h. hin zu einer Ökonomie mit tieferer Energieintensität) statt.

Projekt: Wettbewerbsfaktor Energie – Neue Chancen für die Schweizer Wirtschaft

Welchen Einfluss hat die Umsetzung der zur Zielerreichung notwendigen Treibhausgasreduktionen auf die Schweizer Binnenwirtschaft und welche globalen Wachstumschancen eröffnen sich gleichzeitig schweizerischen Unternehmen rund um das Thema «Energieeffizienz»? Die Studie *Wettbewerbsfaktor Energie – Neue Chancen für die Schweizer Wirtschaft* [13] versteht sich als Analyse eines möglichen Szenarios im Jahr 2020 und betrachtet technische Massnahmen zur Treibhausgasreduktionen (z. B. energetische Gebäuderenovierungen), sowie die Umsetzung der Förderung von erneuerbaren Energien in der Schweiz. In einem zweiten Teil analysiert der Bericht die Marktanteile und Chancen für Schweizer Unternehmen in den stark wachsenden globalen Märkten zu erneuerbaren Energien und «Energieeffizienz»-Technologien.

Im gewählten Szenario werden technisch und ökonomisch realisierbare Massnahmen im Gebäude- und Transportbereich zur Treibhausgas-Reduktion in der Schweiz, sowie die heute bekannte Förderung von erneuerbaren Energien bis 2020 berücksichtigt. Dabei betragen die Treibhausgasreduktionen in der Schweiz bis im Jahre 2020 ca. 7.4 Mt (-14%) vs dem Referenzszenario. Diese Massnahmen werden Zusatzinvestitionen von insgesamt CHF 2.6 Milliarden im Jahr 2020 benötigen, davon CHF 1.5 Milliarden im Gebäudesektor, CHF 0.5 Milliarden zur Förderung von erneuerbaren Energien und CHF 0.6 Milliarden für emissionsarme Transportmittel. Diese Investitionen lösen direkt in der Schweiz eine Wertschöpfung von ca. CHF 2.7 Milliarden aus und schaffen gleichzeitig im Inland ca. 25'500 zusätzliche direkte Arbeitsplätze, wovon alleine ca. 17'000 durch Investitionen in der Bauwirtschaft.

Die Einsparungen an fossilen Brenn- und Treibstoffen werden aber auch Umsatz- und Arbeitsplatzverluste verursachen (z.B. in der Mineralölverarbeitung), sowie Steuerausfälle in Milliardenhöhe (z.B. durch Wegfall von Mineralölsteuern im

Umfang von rund CHF 600 Millionen) zur Folge haben. Die Mittel zur Finanzierung der Investitionen in die energetische Sanierung von Gebäuden und die Förderung von erneuerbaren Energien stehen zudem für mögliche andere (wirtschaftlich sinnvollere) Massnahmen nicht mehr zur Verfügung. Insgesamt entstehen durch die berechneten Massnahmen – hauptsächlich in der arbeitsintensiven Bauwirtschaft – aber mehr Arbeitsplätze als in anderen Bereichen durch Umsatzverluste verloren gehen würden, netto wird gesamtschweizerisch ein Überschuss von ca. 10'600 Arbeitsplätzen kreiert.

Für Schweizer Unternehmen bieten die weltweiten Bestrebungen nach effizienterem Einsatz bzw. Ersatz von fossilen Brennstoffen auch grosse Wachstumschancen. In der Energieerzeugung (Wind, Solar, Wasser, Biomasse, Kernkraft) dürften im Jahr 2020 jährlich Anlagen im Umfang von ca. CHF 540 Milliarden gebaut werden. Schweizer Unternehmen sind hier in der Zulieferung von innovativen Technologien gut vertreten, meist jedoch in frühen Wertschöpfungsstufen als Zulieferer von Komponenten und mangels Eigenbedarf und Förderung nicht in der Endfertigung.

In den Wirtschaftsbereichen, wo eine radikal verbesserte Energieproduktivität benötigt wird (Transport & Verkehr, Gebäudetechnik, Maschinen- und Anlagenbau) werden im Jahr 2020 globale Umsätze von ca. CHF 980 Milliarden entstehen. Hier sind Schweizer Unternehmen in vielen neu entstehenden Wirtschaftszweigen (Batterie- und Antriebstechnik, Heiztechnik, Wärmenutzung) heute wenig vertreten. Solche wirtschaftliche Veränderungen rufen nach innovativen Produkten und neuen Geschäftsmodellen. Die Schweizer Wirtschaft hat eine Chance, diese Wachstumsmöglichkeiten zu ergreifen und sich noch konsequenter auf Zukunftsmärkte auszurichten.

Technologietransfer und Innovationsprozesse

Ein besseres Verständnis der Diffusions- und Innovationsprozesse im Kontext neuer Energietechnologien ist sowohl für eine Erfolg versprechende Energie- und Klimapolitik als auch für das Wachstum und die internationale Wettbewerbsfähigkeit einer kleinen offenen Volkswirtschaft unerlässlich.

Projekt: InnoPower: Stärkung der frühen Innovationsphase von KMUs unter besonderer Berücksichtigung des Sektors Energie

Dieses Projekt [14] hat zum Ziel, den frühen Innovationsprozess bei KMU im Energiesektor besser zu verstehen und Ansätze zu dessen Stärkung zu erarbeiten. Motivation für das Projekt ist die Erkenntnis, dass die Schweizer Volkswirtschaft stark von der Innovationskraft der KMU profitiert und diese immer wieder innovative Produkte und Dienstleistungen auf den Markt bringen. Im Zuge des Umbruches im Energiesektor und der angestossenen Konjunkturprogramme ergeben sich für KMU interessante Möglichkeiten, ihre angestammten Kompetenzen und Stärken in diesen Bereich zu übertragen und somit Wertschöpfung und Beschäftigung in der Schweiz zu sichern. Sofern sich die Innovationsforschung bis anhin mit dem Energiesektor auseinandergesetzt hat, wurde der Fokus weitgehend auf Grossunternehmen oder technologieintensive Kleinunternehmen im Umfeld von Hochschulen gelegt. Dieser Fokus wird der Situation in der Schweiz jedoch nicht gerecht, umfasst der hiesige Energiesektor doch eine grosse Vielfalt von Unternehmen von gewerblichen KMU bis zu landwirtschaftlichen Betrieben. Wenig systematisches Wissen ist bisher darüber vorhanden, wie KMU im Energiebereich innovative Produkte in einer frühen Phase entwickeln, und wie sich deren Qualität und Anzahl steigern liesse. Die Studie zielt daher darauf ab, zentrale Aspekte der frühen Innovationsphase (Ideengenerierung und -quellen; frühe Evaluations- und Selektionsprozesse; Entscheidungsgremien und -kriterien; Ausmass zwischen- und überbetrieblicher Kooperation) zu analysieren und Ansätze zu deren Stärkung im Kontext des Energiesektors abzuleiten. Auf Basis theoretischer Hypothesen wurden Innovationsprozesse von Unternehmen verschiedener Bereiche des Energiesektors mittels interviewbasierten Fallstudien genauer untersucht.

Projekt: Innovationsprozesse bei Energietechnologien

Diese Studie [15] versucht Generierung und Anwendung spezifischer Energietechnologien bei Unternehmungen in der Schweiz mittels empirischer Methoden zu charakterisieren. Speziell zu diesem Zweck wurde 2009 bei sämtlichen Firmen des KOF-Unternehmenspanels (welches eine repräsentative Stichprobe von Schweizer Unternehmungen der Privatwirtschaft im Industrie- und Dienstleistungssektor darstellt) eine schriftliche Befragung durchgeführt. Aus den über 2300 auswertbaren Antworten geht beispielsweise hervor, dass sich über 40 % der Unternehmungen mit mehr als 5 Beschäftigten in der Schweiz als Anwender von Energietechnologien (welche einen effizienteren

Einsatz von Energie oder die Verwendung alternativer Energieträger erlauben) charakterisieren lassen. In den Branchen Maschinenbau, Elektrotechnik, Elektronik sowie Fahrzeugbau treten zudem jeweils um die 20 % der Firmen als Anbieter solcher Technologien auf.

Diese einmalige Datenbasis ermöglicht die Bearbeitung folgender Fragen: Durch welche Faktoren lässt sich die Übernahme von Energietechnologien (welche eine effizienteren Einsatz von Energie oder die Verwendung alternativer Energieträger erlauben) in Unternehmungen erklären? Neben strukturellen Faktoren wie Unternehmensgrösse oder Branchenzugehörigkeit ist insbesondere interessant, spezifische Diffusionsmuster (Übernahme einer Technologie als Folge des Verhaltens anderer Unternehmungen) zu untersuchen.

Im Gegenzug verdient auch die Angebotsseite von Energietechnologien Beachtung. Konkret: wie werden Unternehmungen dazu motiviert, als Anbieter neuartiger Energietechnologien aufzutreten, also erfolgreich Innovationen in diesem Gebiet zu lancieren? Es wird auch untersucht, inwiefern Fördermassnahmen (durch Bund, Kantone und Gemeinden oder auch Private) im Bezug auf Einsatz oder Generierung von Energietechnologien erfolgreich waren.

Projekt: Determinanten des Vollzugs energiepolitischer Massnahmen auf kantonaler Ebene

Im schweizerischen politischen System mit seinem ausgeprägten Föderalismus entwickeln sich in den Kantonen unterschiedliche Ansätze zu innovativen Lösungen energiepolitischer Probleme. Während das Thema Föderalismus seit langem Aufmerksamkeit in der politikwissenschaftlichen Forschung erhält, ist die Frage der Verbreitung von Politik-Innovationen im föderalistischen System ein Aspekt, der für die Schweiz noch wenig geklärt ist. Das Projekt *Determinanten des Vollzugs energiepolitischer Massnahmen auf kantonaler Ebene* [16] befasst sich mit den Determinanten und Prozessen, die zu einer Ausbreitung oder Nichtausbreitung energiepolitischer Massnahmen im Gebäudebereich führen, da die Massnahmen hier weitgehend in den Kompetenzbereich der Kantone fallen. Untersucht wurden fünf Massnahmen aus den Mustervorschriften 2000 im Zeitraum zwischen 1990 und 2007. Folgende Kernbefunde ergeben sich aus einem ersten, quantitativ ausgerichteten Teil der Untersuchung:

- Grundsätzlich wurde festgestellt, dass kantonale Massnahmen im Energiebereich nicht unabhängig voneinander eingeführt werden.
- Die regionalen Fachstellenkonferenzen erweisen sich als Schlüsselinstitutionen für die Ausbreitung kantonaler Massnahmen.
- Nur wenig Evidenz wurde für die Kommunikation in Parteinetzwerken gefunden.
- Demgegenüber erwiesen sich die von der Energiedirektorenkonferenz verabschiedeten Mustervorschriften aus dem Jahr 2000 für die Einführung der untersuchten Massnahmen als unterstützend.
- Für den Einfluss eines Netzwerks der Kantone mit identischen Vollzugsmustern wurde keine Evidenz gefunden.
- Zusätzlich zu den Einflüssen verschiedener externer Kanäle stellten sich unterschiedliche interne Determinanten für die Einführung einer Massnahme als förderlich oder hemmend heraus.

Zusätzlich wird ein Fallstudienvergleiche gemacht, bei welchem die Übernahmemechanismen und die Rolle der Institutionen bei einem Politiktransfer im Zentrum stehen.

Umwandlungssektor

Eine effiziente, ausgeglichene und sichere Energiebereitstellung ist unerlässlich, um die heutigen Ansprüche an die Energieversorgung zu erfüllen. Deshalb analysieren mehrere Studien die Vor- und Nachteile verschiedener Energietechnologien und erforschen relevante Fragen der Energieverteilung.

Projekt: Die Wirkung von Energie-, Klima- und Wettbewerbspolitik auf technischen Fortschritt und Diversität in der Schweizer Energieversorgung

Grundlage dieses Projekts [17] bildet die Modellierung der Investitionsentscheidung eines Energie produzierenden Unternehmens unter Unsicherheit. Gegenstand der Untersuchung ist die Wahl zwischen Technologien zur Stromerzeugung wie zum Beispiel Kern-, Gas-, Wasser- und Windkraftwerke oder Geothermie und Photovoltaik. Technologie- und Energieträgerwahl in der Energiewirtschaft

werden unter dem Einfluss von energie-, klima- und wettbewerbspolitischen Massnahmen aus der Perspektive des Unternehmens dargestellt. Dazu werden die Investitionsoptionen abgebildet, um anschliessend die Entscheidung des Unternehmens in Abhängigkeit von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu analysieren. Ziel dieser Analyse ist die Abbildung von Wechselwirkungen sowie die Identifikation politischer Massnahmen, welche einen wesentlichen Einfluss auf privatwirtschaftliche Entscheide zur Technologie- und Energieträgerwahl besitzen. Die Technologien werden über ihre Stromgestehungskosten und deren Aufteilung in Brennstoff-, Kapital- und Betriebskosten dargestellt. Durch technologiespezifische Kostenfluktuationen werden Kostenrisiken in die Betrachtung mit einbezogen. Es wird zwischen inländischer Energieproduktion und der Beteiligung von Schweizer Stromproduzenten an Werken im Ausland unterschieden. Auf der Nachfrageseite (Wärme- und Elektrizitätsnachfrage) werden energiepolitische Massnahmen sowie Absatzunsicherheiten (Schwankungen der Nachfrage durch z. B. Witterungseinflüsse) berücksichtigt; Tagesschwankungen werden hingegen nicht abgebildet. Die Elektrizitätsnachfrage entspricht den Szenarien aus den Energieperspektiven. Diese oben beschriebenen Zusammenhänge werden im Rahmen eines ökonomischen Modells dargestellt. Dadurch ergibt sich eine zweistufige mathematische Struktur, welche die Abläufe im Entscheidungsprozess - mit den beiden zeitlich getrennten Ebenen Produktion und Investition der Unternehmung aufzeigt. Die Berücksichtigung von verschiedenen Unsicherheiten im Modell ist wichtig, weil Kosten- und Absatzrisiken eine erhebliche Wirkung auf die Technologiewahl im Energiebereich haben. Aus Unternehmenssicht sind technologische Diversifikation und die Verzögerung von Investitionen in neue (effizientere) Technologien Strategien zur Absicherung gegen Kostenrisiken. Diese Risiken sind allerdings abhängig von der Gestaltung politischer Massnahmen. Im Projekt soll deshalb die Frage beantwortet werden, wie die Wirkungszusammenhänge verschiedener politischer Massnahmen, z. B. der CO_2-Abgabe und der Strommarktliberalisierung im Hinblick auf Diversität und technischem Fortschritt auf die Energieproduktion in der Schweiz wirken. Dazu wird das theoretische Modell unter Berücksichtigung von Daten aus nationalen sowie internationalen Studien kalibriert. Die politische Massnahmen und deren Unsicherheit werden mit Hilfe von Szenarien, welche sich an den Energieperspektiven des Bundes orientieren, dargestellt.

Projekt: Wirtschaftlichkeit dezentraler Einspeisung in der Schweiz

Das Bundesamt für Energie hat im Rahmen des Projekts *Energieperspektiven 2035* energiepolitische und wirtschaftliche Szenarien und Prognosen für die Schweiz erarbeitet. Ein hieraus hervorgegangener Gegenstand weiterer Untersuchungen ist die Frage, welche technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen ein starker Ausbau der dezentralen Erzeugung auf die Übertragungs- und Verteilnetze und den Systembetrieb hätte. Wesentliche Aufgabe des Projekts *Wirtschaftlichkeit dezentraler Einspeisungen in der Schweiz* [18] war es, allfällige mit Netzveränderungen einhergehende Mehr- oder Minderkosten grob zu quantifizieren und Relationen einzelner Einflussfaktoren aufzuzeigen.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass ein starker Zubau dezentraler Erzeugung aus technisch-wirtschaftlicher Sicht grundsätzlich möglich ist. Je nach räumlicher Konzentration der dezentralen Einspeisungen können hierdurch sowohl Netzkostenreduktionen als auch Netzkostensteigerungen auftreten. Bei realistischer Annahme der räumlichen Verteilung der Einspeisungen werden aber wahrscheinlich Netzkostensteigerungen in Folge von Netzverstärkungen überwiegen. Bezogen auf die gesamte Schweiz dürften die Netzkostensteigerungen je nach Zubaugeschwindigkeit der dezentralen Erzeugungen im einstelligen Prozentbereich liegen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass bei einzelnen Netzbetreibern durch lokale Konzentration von dezentralen Einspeisungen durchaus Steigerungen der mit der Errichtung von Betriebsmitteln verbundenen Netzkosten im kleinen zweistelligen Prozentbereich auftreten können.

Darüber hinaus kann durch den Zubau von dezentralen Einspeisungen der Bedarf an Regelleistung und -energie, die zur stabilen Einhaltung der Netzfrequenz von 50 Hz benötigt werden, steigen. Die Höhe der Steigerung hängt einerseits von der installierten Leistung und andererseits von der Prognostizierbarkeit angebotsabhängiger Einspeisungen ab. In dem hier betrachteten Szenario ergibt sich eine Zunahme der Regelleistung um ca. 600

MW (+60 %) und eine Steigerung der benötigten Regelenergie um ca. 340 GWh (+68 %). Aus technischer Sicht erscheint ein derartiger Zusatzbedarf an Regelleistung und -energie unproblematisch. Mit derzeitigen Marktpreisen gewichtet ergäben sich allerdings jährliche Zusatzkosten in Höhe von etwa CHF 210 Mio., was bei Umlage auf den Gesamtnettojahresstromverbrauch der Schweiz (ca. 60 TWh/a) eine Kostensteigerung um rund 0,35 Rp./kWh zur Folge hätte.

Eine Verminderung der aufgezeigten Kostensteigerungen könnte erreicht werden, wenn die dezentralen Erzeugungsanlagen an der Bereitstellung von Systemdienstleistungen, z. B. durch Beteiligung an Spannungsregelung oder Blindleistungs- und Regelreservebereitstellung mitwirken. Ziel sollte es daher sein, entsprechende Anreize für eine solche Beteiligung zu schaffen.

Projekt: Wirkung und Potenzial der Netzpreisregulierung für die Förderung der Stromeffizienz

In dieser Studie [19] wird theoretisch und anhand einer Modellanalyse geprüft, ob die Preisregulierung von Stromnetzen ein Mittel sein kann, um das Ziel der Stromeffizienz zu verfolgen. Es werden zwei Stufen der Netzpreisregulierung untersucht. Auf der ersten Ebene wird der Regulierungsrahmen und auf der zweiten Ebene der direkte Eingriff in die Preisstrukturen durch die Regulierungsbehörde betrachtet. In den Modellanalysen wird neben den Auswirkungen der Regulierung auf die abgegebene Energie auch die Auswirkung auf die Netzeffizienz und die Investitionsanreize des Netzbetreibers betrachtet.

Auf der Ebene «Regulierungsrahmen» wurde der Wechsel der aktuellen Kostenregulierung in eine Anreizregulierung untersucht. Oberstes Ziel in einer Anreizregulierung ist es, die Netzeffizienz zu erhöhen und gleichzeitig die Investitionsanreize zu gewährleisten. Die Modellanalysen zeigen, dass die Anreizregulierung je nach Ausgestaltung mit dem Ziel der Stromeffizienz vereinbar ist, da sich tendenziell positive Auswirkungen auf die Rendite der Unternehmen und damit auf die Investitionsanreize ergeben können, wenn der Anteil variabler Preiselemente steigt.

Auf der Ebene «regulatorischer Eingriff in die Preisstrukturen» wurde untersucht, wie eine regulatorisch vorgegebene Erhöhung des Arbeitspreisanteils innerhalb des Regulierungsrahmens einer Anreizregulierung wirkt. Erwartungsgemäss kann die nachgefragte Energie reduziert werden. Jedoch können die Netzbetreiber als Folge des Eingriffs die Preisstrukturen nicht mehr zur Optimierung der Netzauslastung und damit für Effizienzsteigerungen nutzen. Wird dadurch die Rendite gefährdet, steht ein solcher Eingriff nicht nur dem Ziel der Anreizregulierung, sondern auch dem Ziel der Investitionsanreize zur Sicherung der Versorgungssicherheit entgegen.

Um die Stromeffizienz zu erhöhen wird aufgrund der unklaren Kostenwirksamkeit, die sich insbesondere bei Eingriffen in die Preisstrukturen ergibt, auf alternative Instrumente verwiesen. Dazu gehören als First-best-Lösung Lenkungsabgaben, die durch Instrumente zur Erhöhung der Transparenz ergänzt werden können. Diese Instrumente können eindeutiger auf das Ziel der Stromeffizienz ausgerichtet werden als die Netzpreisregulierung. Bevor die Netzpreisregulierung in einem Second-best-Instrumentenmix für Stromeffizienzziele herangezogen wird, sind vertiefte Abklärungen zu den Kostenwirkungen durch negative Effekte auf die Netzeffizienz erforderlich.

Projekt: Die Zukunft leitungsgebundener Energieversorgungssysteme

Im Rahmen der Umsetzung energie- und klimapolitischer Visionen wie der 2000-Watt- oder der 1-Tonne-CO_2-pro-Kopf-Gesellschaft ist damit zu rechnen, dass der Wärmebedarf von Gebäuden massiv zurückgehen wird. Für die Wirtschaftlichkeit von Erdgas- und Nah- bzw. Fernwärmenetzen wirft dies Fragen auf, die anhand von Fallstudien für unterschiedliche Erdgas- und Fernwärmeversorgungsgebiete untersucht werden. Im Projekt *Die Zukunft leitungsgebundener Energieversorgungsysteme* [20] werden für drei Szenarien der möglichen Entwicklung der künftigen Wärmenachfrage bis 2050 (Business as usual, 1 Tonne CO_2 und 2000-Watt pro Kopf und Jahr) die folgenden sieben Fernwärme und vier Erdgasversorgungen untersucht: Die Fernwärmeversorgungen Zürich Nord (KVA), Basel (KVA+), Horgen (KVA), Russikon (Holz), Greifensee (Holz), und Illnau-Effretikon («kalte FW» von ARA) sowie die Erdgasversorgungen Bülach, Illnau-Effretikon, Erlenbach und Wetzikon. Für diese Szenarien wird eine Beurteilung der zukünftigen Kostenentwicklung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme erarbei-

tet, wobei zwei Szenarien für die Entwicklung der künftigen Energiepreise von Heizöl, Erdgas, Holz und Strom zugrunde gelegt werden.

Die Entwicklung der Wärmenachfrage wird dabei auf der Ebene der kommunalen Bauzonen, die in den jeweiligen Versorgungsgebieten gelten, anhand von Gebäudetypen, Alterstrukturen, Anschlussgrad und den gemäss Zonenordnung noch bestehenden Verdichtungspotenzialen modelliert. Die mit der abnehmenden Wärmenachfrage einhergehende Kostenentwicklung bei den leitungsgebundenen Systemen wird mit der Kostenentwicklung bei den drei Konkurrenzsystemen Wärmepumpen, Ölheizung und Holzheizung verglichen um aufzuzeigen, welche Systeme sich in Zukunft aus wirtschaftlicher Sicht am ehesten durchsetzen. Zusammen mit Überlegungen über zukünftige 2000-Watt-kompatible Energieversorgungsstrukturen, welche auch die Nachhaltigkeit der jeweiligen Wärmequellen der Fernwärmeversorgung einbeziehen, sollen Aussagen zur Zweckmässigkeit des Ausbaus, der Erneuerung sowie der Förderung von leitungsgebundenen Energieversorgungen gemacht werden.

Nach den Systemanalysen für Fernwärme- bzw. Erdgasversorgungsnetze, Wärmenachfrage- und Energiepreisszenarien bis 2050 werden zurzeit in den Fallstudiengebieten die Versorgungsnetze (Charakteristika, Kosten, Kostentreiber), die Siedlungsstruktur und deren raumplanerische Entwicklungsmöglichkeiten erhoben.

Projekt: Literaturstudie Kernenergie

Die Nutzung der Kernenergie ist seit Jahrzehnten politisch umstritten. Sowohl Argumente der Befürworter als auch der Gegner der Kernenergie lassen sich mit Hilfe aktueller Literatur untermauern. Vor diesem Hintergrund liefert die Studie *Literaturstudie Kernenergie* [21] Grundlagen zur Bewertung offener Fragen und Meinungsdifferenzen rund um das Thema Kernenergie.

Es werden aktuelle Literaturergebnisse zusammengestellt, unterschiedliche Ergebnisse begründet und die zentralen Argumente in Bezug auf zehn politisch relevante Diskussionspunkte aufgezeigt. Die Studie gibt dabei eine möglichst objektive Übersicht zu den folgenden Themenbereichen der Kernenergie:

- **Risiken der Kernenergie**: Die Nutzung der Kernenergie impliziert die Handhabung von grossen Mengen radioaktiven Materials. Im Zusammenhang mit den Risiken der Kernenergie werden zunächst das Sicherheitskonzept und die Sicherheitssysteme von Kernanlagen dargelegt. Es werden die Störfallrisiken bei der Nutzung der Kernenergie auf Basis der existierenden Literatur beschrieben und zu den Risiken anderer technischer Systeme in Beziehung gesetzt. Weiter werden Ergebnisse von Studien zu den Risiken diskutiert, die durch Erdbeben, Terroranschläge und Proliferation entstehen.
- **Umweltrelevanz der Kernenergie**: Die Studie zeigt die Bandbreite der Literaturergebnisse bezüglich der mit der Nutzung von Kernenergie verbundenen CO_2-Emissionen auf und vergleicht diese mit anderen Formen der Stromerzeugung. Zudem widmet sich die Studie der Frage der Entsorgung radioaktiver Abfälle, der geologischen Tiefenlagerung sowie weiteren Umweltauswirkungen bei der Nutzung der Kernenergie.
- **Gesellschaftliche Akzeptanz, ethische Aspekte und gesundheitliche Auswirkungen**: Die Studie beleuchtet die Akzeptanz und die Risikowahrnehmung in Bezug auf die Kernenergie. Weiter werden ethische Aspekte und mögliche gesundheitliche Auswirkungen der Nutzung von Kernenergie beschrieben.
- **Kosten der Kernenergie**: Die Kosten spielen eine zentrale Rolle bei der Diskussion um die Zukunft der Kernenergie. Die Studie stellt die Literaturergebnisse zu den Kosten der Kernenergie und der theoretisch möglichen Schadenssumme zusammen und begründet die vorhandenen Unterschiede. Weiter wird die voraussichtliche Kostenentwicklung von Brennstoffen thematisiert.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Forschungsprogramms Energie–Wirtschaft–Gesellschaft (EWG) wird eine intensive Zusammenarbeit mit privaten Forschungsstellen, Universitäten, Fachhochschulen, Instituten und anderen Bundesämtern gepflegt. Auf eine intensive **Vernetzung** unter den Forschungsstellen wird grossen Wert gelegt, und es werden regelmässig themenspezifische Workshops durchgeführt.

Für die politiknahe Forschung sind der Einbezug und die Zusammenarbeit mit den Kantonen – insbesondere den kantonalen Energiefachstellen – und den interessierten Fachverbänden in den Bereichen Stromversorgung und Bauen wichtig. 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 EWG-Schlussberichte werden Resultate jeweils mit einer Medienmitteilung gestreut, an Fachtagungen und Konferenzen präsentiert und je nach Projekt in Fachzeitschriften publiziert.

Internationale Zusammenarbeit

In diversen Projekten sind internationale Hochschulinstitute oder Forschungsstellen direkt beauftragt oder indirekt beteiligt. Die Berücksichtigung der internationalen Forschungsliteratur und der rege Austausch an Fachkongressen, in Zeitschriften usw. stellt dabei eine Selbstverständlichkeit dar.

Bewertung 2009 und Ausblick 2010

2009 können zwei Themenschwerpunkte hervorgehoben werden. Zum einen wurde der erste Work-shop «Experiments for Energy Insights» an der ETH Zürich durchgeführt. Doktoranden aus fünf Forscherteams und verschiedenen Disziplinen stellten ihre Forschungsvorhaben vor. Alle Forscherteams untersuchen aus einem bestimmten Blickwinkel das Konsumentenverhalten bei energierelevanten Entscheiden. Zum anderen berechneten drei weitere Projekte im Bereich Mobilität mit ökonometrischen Methoden den Effekt von veränderten Treibstoffpreisen und Einkommen auf den Treibstoffverbrauch.

Ausblickend wird im Jahr 2010 der Workshop «Swiss Energy Modeling» durchgeführt werden. Dieses Treffen der Spezialisten der Energiemodellierung soll einerseits den Stand der Forschung in der Schweiz aufzeigen und andererseits politikrelevante Verbesserungsmöglichkeiten identifizieren und angehen. Begleitend wird die schweizerische Input-Output Tabelle, die die Daten für Modellierungen liefert, auf energiespezifische Bedürfnisse angepasst. Ein weiterer Themenschwerpunkt für die nächsten Jahre werden auch ökonomische Fragen zu „Smart Grids“ darstellen.

Liste der F+E-Projekte

(JB) Jahresbericht 2009 vorhanden
(SB) Schlussbericht vorhanden (siehe www.energieforschung.ch unter der angegebenen Projektnummer).

[1] S. Banfi, M. Filippini, C. Ramseier, (ETH, CEPE, sbanfi@ethz.ch), Ökonomische **Analyse des Renovationsverhaltens von EFH-Besitzern,** (JB).

[2] S. Banfi, M. Filippini, C. Ramseier (ETH, CEPE, sbanfi@ethz.ch), M. Jakob (TEP Energy), **Investitionsverhalten von MFH-Besitzern und Marktpotenziale hinsichtlich neuer Renovationstechniken und -konzepte,** (JB).

[3] W. Ott, D. Philippen (econcept), A. Baumgartner (Amstein und Walthert), M. Jakob (TEP Energy), (walter.ott@econcept.ch), **Gebäudepark Schweiz: CO_2-Vermeidungskosten & Einsparpotenziale,** (JB)

[4] A. Baranzini (HEG Genève), D. Nieto, S. Weber (Université de Genève), (andrea.baranzini@hesge.ch), **Élasticité-prix de la demande d'essence en Suisse**, (SB 103018).

[5] K. Axhausen, A. Erath (ETH) (axhausen@ivt.baug.ethz.ch), Langfristige Treibstoffpreiselastizitäten: Einfluss auf die Mobilitätswerkzeugwahl und Wahl des Wohnstandorts, (SB 102940).

[6] M. Keller, P. Wüthrich, J. Trageser, H. Lückge (Infras) , S. Banfi, F. Heimsch (ETH, CEPE), (mario.keller@infras.ch), **Tanktourismus,** (JB).

[7] A. Diekmann, H. Bruderer (ETH Zürich, andreas.diekmann@soz.gess.ethz.ch), **Energieinvestitionen und heterogene Präferenzen**, (JB).

[8] B. Sütterlin, M. Siegrist, (ETH Zürich, msiegrist@ethz.ch), **Der Einfluss von Heuristiken und Gewohnheiten auf den Energieverbrauch**, (JB).

[9] R. Schubert, H. Fehr, Th. Epper (ETH, schubert@econ-.gess.ethz.ch), **Die Rolle der Diskontrate für die Nachfrage nach energieeffizienten langlebigen Konsumgütern**, (JB).

[10] P. de Haan (ETH Zürich, dehaan@env.ethz.ch), **Energie-Effizienz und Reboundeffekte: Entstehung, Ausmass und Eindämmung,** (SB 102101).

[11] O. Cadot and C. Gonseth (HEC Lausanne, olivier.cadot-@unil.ch), **The Effect of Energy Efficiency Enhancement on Innovation and Competitiveness,** (JB).

[12] L. Bretschger, R. Ramer, F. Schwark (ETHZ, lbretschger@ethz.ch) **Auswirkungen politischer Energiesparmassnahmen auf die Innovationskraft, die Beschäftigung und die internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweiz,** (JB).

[13] M. Ziegler, R. Bättig (McKinsey, marco_ziegler@mckinsey.com), **Wettbewerbsfaktor Energie – Neue Chancen für die Schweizer Wirtschaft**, (SB 103284).

[14] M. Bader und P. Hürzeler (HSG, martin.bader@unisg.ch), **InnoPower: Stärkung der frühen Innovationsphase von KMUs unter besonderer Berücksichtigung des Sektors Energie,** (JB).

[15] S. Arvanitis, M. Ley (ETH Zürich, KOF), (arvanitis@kof.-ethz.ch), **Generierung und Übernahme von Energietechnologien & energiepolitische Förderung**, (JB).

[16] Th. Widmer und F.Strebel (Uni Zürich, thow@ipz.uzh.ch), **Determinanten des Vollzugs energiepolitischer Massnahmen auf kantonaler Ebene** (JB).

[17] F. Krysiak, M. Thoma (Universität Basel, frank.krysiak-@unibas.ch), **Die Wirkung von Energie-, Klima- und Wettbewerbspolitik auf technischen Fortschritt und Diversität in der Schweizer Energieversorgung,** (JB 102763).

[18] A. Ladermann, K. Linke, A. Esser, W. Fritz (consentec, ladermann@consentec.de), H. Worm, St. Vaterlaus (Polynomics), **Wirtschaftlichkeit dezentraler Einspeisung in der Schweiz**, (SB 102896).

[19] H. Worm, Ch. Spielmann (Polynomics), R. Iten und A. Vettori (Infras), (rolf.iten@infras.ch), **Wirkung und Potenzial der Preisregulierung für die Stromeffizienz,** (SB 102457).

[20] W. Ott, G. Klingler (econcept), (walter.ott@econcept.ch), **Die Zukunft leitungsgebundener Energieversorgungsysteme**, (JB).

[21] P. Koch und M. Schmid (BSS, patrick.koch@bss-basel.-ch), **Literaturstudie Kernenergie,** (SB Projekt 102722).

[i] CCEM = Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität (CCEM)

ANHANG / *ANNEXE*

Zusammensetzung der CORE

Mitglieder	Vertreter von
Dr. Kaiser Tony, Präsident Alstom Power, Future Technologies, Direktor	Grossindustrie
Closset Alexandre VHF-Technologies SA, CEO	Start-up, innovative KMU
Dr. Monica Duca Widmer EcoRisana SA	Ingenieurbüros, KMU
Prof. Dr. Gutscher Heinz Uni Zürich	Universitäten, Sozialwissenschaft
Hunziker-Ebneter Antoinette Forma Future Invest AG, CEO	Investoren, Venture Capital
Prof. Dr. Kunze Christian École d'Ingénieurs du Canton du Vaud, Directeur	Fachhochschulen, Schweizerischer Nationalfonds
Dr. Leutenegger Hajo VSG, Präsident	Energiewirtschaft (Wasser und Gas)
Dr. Lustgarten George Allan Technology and Business Consulting, CEO	Consulting
Prof. Dr. Lux-Steiner Martha Christina Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), Institutsleitung Heterogene Materialsysteme	Universitäten, internationale Beziehungen
Prof. Dr. Püttgen Hans-Björn Energy Center EPFL, Directeur	EPF-Lausanne
Prof. Dr. Schlapbach Louis EMPA, Gesamtleiter	EMPA, Kommission für Technologie und Innovation
Regierungsrat Stefan Sutter Vorsteher Bau- und Umweltdepartement Appenzell I.	Vertretung Kantone
Dr. Thumann Manfred MG Konzernleitung Axpo Holding AG	Energiewirtschaft (Elektrizität)
Prof. Dr. Wokaun Alexander Paul Scherrer Institut, Leiter Forschungsbereich allgemeine Energie	PSI, ETH Zürich, Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften, Novatlantis
N.N.	Universitäten, Entrepreneurship, Venture Capital
Beobachter	**Amt**
Dr. Rolf Schmitz Leiter Sektion Energieforschung	BFE
Daniel Zürcher Leiter Sektion Innovation	BAFU
Dr. Werthmüller Andreas Wissenschaftlicher Berater Multilaterale Forschungszusammenarbeit	SBF
Sekretariat	**Adresse**
Dr. Katja Maus BFE, Sektion Energieforschung	☎ G: 031 322 39 78 E-mail: katja.maus@bfe.admin.ch

BFE-FORSCHUNGS- UND MARKTBEREICHE (2010)
DOMAINES DE L'OFEN POUR LA RECHERCHE ET LE MARCHÉ (2010)

		Forschung Recherche		*Markt / EnergieSchweiz Marché / SuisseEnergie*
	Programme *Programmes*	**Programmleiter/in** *Chefs de programme*	**BFE-Bereichsleiter/in** *Responsables de domaine à l'OFEN*	**BFE-Bereichsleiter/in** *Responsables de domaine à l'OFEN*
I. Effiziente Energienutzung *Utilisation efficace de l'énergie*	**I.1** Energie in Gebäuden *Énergie dans les bâtiments*	C. Filleux	A. Eckmanns	O. Meile
	I.2 Verkehr *Transports*	M. Pulfer	M. Pulfer	H. Scherrer
	I.3 Akkumulatoren und Superkondensatoren *Accumulateurs et supercondensateurs*			---
	I.4 Verfahrenstechnische Prozesse (VTP) *Technologie des procédés*			M. Stettler
	I.5 Elektrizitätstechnologien und -anwendungen *Technologies et utilisations de l'électricité*	R. Brüniger	M. Moser	F. Frey
	I.6 Netze *Réseaux*	M. Moser		---
	I.7 Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) *Couplage chaleur-force (CCF)*	T. Kopp	A. Eckmanns	R. Phillips
	I.8 Verbrennung *Combustion*	S. Renz	S. Hermle	
	I.9 Kraftwerk 2020 und Carbon Capture & Storage (CCS) *Centrales à gaz 2020 et CCS*	P. Jansohn	G. Siddiqi	
	I.10 Brennstoffzellen *Piles à combustible*	S. Oberholzer	S. Oberholzer	---
II. Erneuerbare Energie *Sources d'énergie renouvelables*	**II.1** Wasserstoff *Hydrogène*	S. Oberholzer	S. Oberholzer	---
	II.2 Photovoltaik *Photovoltaïque*	S. Nowak		U. Wolfer
	II.3 Industrielle Solarenergienutzung (Solare Hochtemperaturprozesse) *Utilisation industrielle de l'énergie solaire (Processus solaires à haute température)*	P. Renaud		
	II.4 Solarwärme und Wärmespeicherung *Chaleur solaire et stockage de chaleur*	J.-C. Hadorn	A. Eckmanns	
	II.5 Wärmepumpen und Kälte *Pompe à chaleur et froid*	T. Kopp		R. Phillips
	II.6 Holzenergie *Énergie du bois*	S. Hermle	S. Hermle	D. Binggeli
	II.7 Biomasse (ohne Holz) *Biomasse (sans le bois)*			B. Guggisberg
	II.8 Wasserkraft *Force hydraulique*	K. Jorde	M. Moser	
	II.9 Geothermie *Géothermie*	R. Minder	G. Siddiqi	M. Geissmann
	II.10 Windenergie *Énergie éolienne*	R. Horbaty	K. Maus	
	II.11 Talsperren *Barrages*	G. Darbre	G. Darbre	---
III. Kernenergie *Énergie nucléaire*	**III.1** Kerntechnik und Nukleare Sicherheit *Technique et sécurité nucléaires*	J.-M. Cavedon *a.i.*	C. de Reyff [1]	---
	III.2 Regulatorische Sicherheitsforschung *Recherche réglementaire en sécurité nucléaire*	R. Mailänder		
	III.3 Kernfusion *Fusion nucléaire*	C. Vaucher		
	III.4 Radioaktive Abfälle *Déchets radioactifs*	S. Brander	S. Brander	---
IV. EWG & WTT *EES & TST*	**IV.1** Energie - Wirtschaft - Gesellschaft (EWG) *Énergie - Économie - Société (EES)*	N. Mathys		
	IV.2 Wissens- und Technologietransfer (WTT) *Transfert scientifique et technologique (TST)*	Y. Calisesi		

[1] Das BFE hat hier hauptsächlich die Rolle der Auskunftsstelle. Die Betreuung der Forschung des Bereichs III.1 obliegt dem PSI, die des Bereichs III.2 dem ENSI und die des Bereichs III.3 dem SBF. / *L'OFEN a ici un rôle de répondant. La gestion de la recherche du domaine III.1 est du ressort du PSI, celle du domaine III.2 de l'IFSN et celle du domaine III.3 du SER.*

ADRESSEN DER BFE-BEREICHSLEITER/INNEN / *ADRESSES DES RESPONSABLES DE DOMAINES À L'OFEN*

Daniel Binggeli, Tel. 031 322 68 23
Simone Brander, Tel. 031 325 85 57
Yasmine Calisesi, Tel. 031 322 53 21
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
Sandra Hermle, Tel. 031 325 89 22
Katja Maus, Tel. 031 322 39 78
Nicole Mathys, Tel. 031 325 54 45
Olivier Meile, Tel. 031 322 56 99
Michael Moser, Tel. 031 325 36 23
Stefan Oberholzer, Tel. 031 325 89 20
Richard Phillips, Tel. 031 322 47 56
Martin Pulfer, Tel. 031 322 49 06
Christophe de Reyff, Tel. 031 322 56 66
Hermann Scherrer, Tel. 031 322 56 70
Rolf Schmitz, Tel. 031 322 56 58
Gunter Siddiqi, Tel. 031 322 53 24
Martin Stettler, Tel. 031 322 55 53
Urs Wolfer, Tel. 031 322 56 39

Postanschrift: **BFE, 3003 Bern** / *Adresse commune :* ***OFEN, 3003 Berne***
E-mail: **Vorname.Name@bfe.admin.ch** / ***prénom.nom@bfe.admin.ch***; Fax: 031 323 25 00

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. 044 760 00 66 – Fax : 044 760 00 68
E-mail : roland.brueniger@r-brueniger-ag.ch

Jean-Marc Cavedon
PSI, 5232 Villigen – PSI
Tel. 056 310 27 24 – Fax : 056 310 44 81
E-mail : Jean-Marc.Cavedon@psi.ch

Charles Filleux
Basler & Hofmann AG
Forchstr. 395, 8032 Zürich
Tel. 044 387 11 22 – Fax : 044 387 11 00
E-mail : charles.filleux@baslerhofmann.ch

Jean-Christophe Hadorn
Base Consultants SA
8 Rue du Nant, c.p. 6268, 1211 Genève 6
Tel. 022 840 20 80 – Fax : 022 840 20 81
E-mail : jchadorn@baseconsultants.com

Robert Horbaty
ENCO Energie-Consulting AG
Munzachstrasse 4, 4410 Liestal
Tel. 061 965 99 00 – Fax : 061 965 99 01
E-mail : robert.horbaty@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

Klaus Jorde
entec ag
St. Leonhardstr. 59, 9000 St. Gallen
Tel. 071 228 10 20 – Fax : 071 228 10 30
E-mail : jorde@entec.ch

Thomas Kopp
HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Tel. 055 222 49 23 – Fax : 055 222 44 00
E-mail : thomas.kopp@hsr.ch

Reiner Mailänder
ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg
Tel. 056 460 86 19 – Fax : 056 460 84 99
E-mail : reiner.mailaender@ensi.ch

Rudolf Minder
Minder Energy Consulting
Ruchweid 22, 8917 Oberlunkhofen
Tel. 056 640 14 64 – Fax : 056 640 14 60
E-mail : rudolf.minder@bluewin.ch

Stefan Nowak
NET Nowak Energie & Technologie AG
Waldweg 8, 1717 St.Ursen
Tel. 026 494 00 30 – Fax : 026 494 00 34
E-mail : stefan.nowak@netenergy.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

Claude Vaucher
SBF/SER, Hallwylstrasse 4, 3003 Bern
Tel. 031 322 74 79 – Fax : 031 322 78 54
E-mail : claude.vaucher@sbf.admin.ch