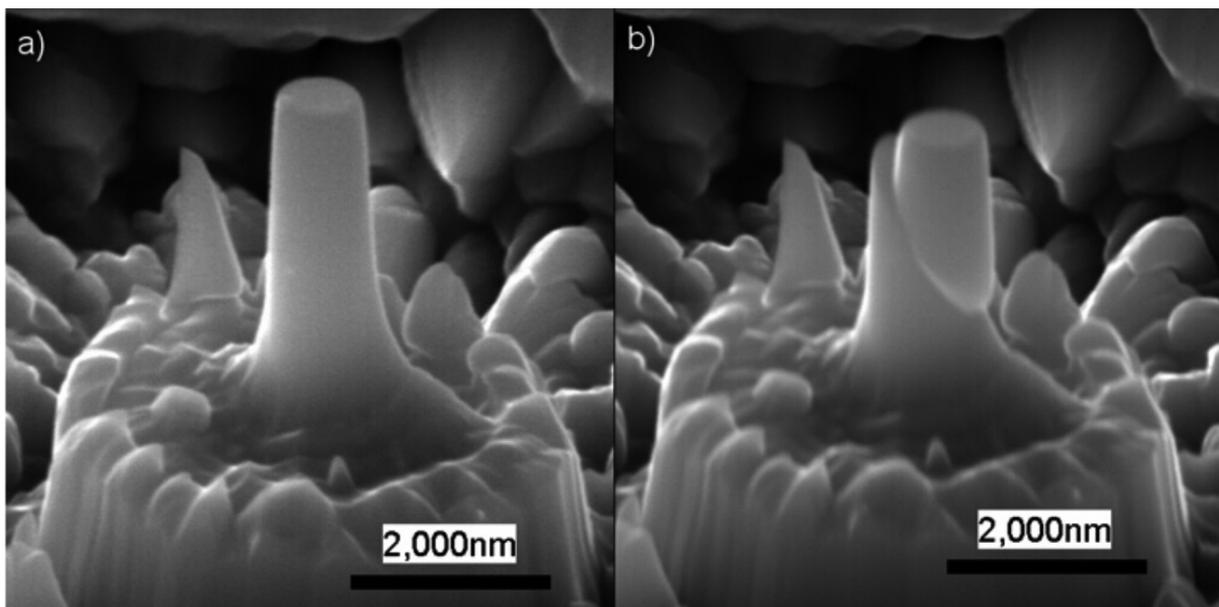


## Rapport de synthèse 2008 du chef de programme OFEN Synthesebericht 2008 des BFE-Programmleiters

### Forschungsprogramm Kerntechnik und Nukleare Sicherheit

Jörg Dreier

[joerg.dreier@psi.ch](mailto:joerg.dreier@psi.ch)



#### Kleinstproben für Festigkeitsuntersuchungen

Die beiden Fotos zeigen eine Kleinstprobe links vor und rechts nach der Druckbelastung. Solche Proben können, falls ihr Festigkeitsverhalten für das ganze Bauteil repräsentativ ist, für die «zerstörungsfreie» Zustandsüberwachung eingesetzt werden.

## Programmschwerpunkte

Die nukleare Energieforschung findet in der Schweiz hauptsächlich im Forschungsbereich Nukleare Energie und Sicherheit (NES) des Paul Scherrer Institutes (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 HSK, welche die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen durch die KKW kontrolliert. Alle diese Partner sind zudem daran interessiert, dass mittel- und langfristige 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-Bereiches anerkannt, und ihr Umfang soll daher mindestens stabil gehalten werden. Für die strategische Planung wird weiter angenommen, dass heutige Reaktoren durch neue, mit den Nachhaltigkeitsgebieten noch kompatibelere 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;
- 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 Reaktoroperatoren (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;
- LWR-Upgrade: Umbau und Ertüchtigung der Anlage Proteus für Messungen an hoch abgebranntem Brennstoff;
- Stars: Entwicklung, Betrieb und Unterhalt eines komplexen Codesystems inklusive Datenbasis für Sicherheitsanalysen (Transiente Systemanalysen mit Unsicherheitsanalyse, Brennstoff-Modellierung, Neutronikanalysen inklusive Kritikalitätssicherheit) für die Schweizer KKW;
- Fast: Entwicklung und Implementierung eines Codesystems nach dem Stand der Technik für Sicherheitsanalysen von nuklearen Systemen mit schnellen Neutronenspektren.

Die Aktivitäten im LRS haben einen direkten Bezug zur Kerntechnik-Ausbildung an der EPFL (Fission); die Forschungsprojekte im Labor bestimmen 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.

#### **Labor für Nukleare Materialien (LNM)**

Das LNM untersucht (insbesondere stark radioaktive) Materialien und Komponenten und ihre umgebungsbedingten Veränderungen, u.a. durch (a) Studium der Alterungsvorgänge und damit gekoppelter Komponentenschäden, (b) Analyse des Verhaltens heutiger und zukünftiger nuklearer Brennstoffe im Reaktor und (c) Modellierung von mikrostrukturellen Veränderungen in nuklearen Werkstoffen und experimentelle Validierung dieser Modelle. Die drei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LNM-Aktivitäten sind:

- Hochtemperaturmaterialien: Charakterisierung von 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 Werkstoffverhaltens. Experimentelle Validierung der Modelle durch fortgeschrittene spektroskopische Methoden, insb. 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: Feststellung von Ermüdungs- und Korrosionsrissen in einem frühen Stadium ihrer Bildung mittels zerstörungsfreier Methoden (z.B. elektrochemisches Rauschen, Seebeck-Koeffizient, mikromagnetische Kenngrössen) basierend auf mikrostrukturellen Veränderungen; experimentelle Bestimmung qualitätsgesicherter Daten für Spannungsrissskorrosion und thermomechanische Ermüdung für Stähle unter KKW-Betriebsbedingungen.

#### **Labor für Endlagersicherheit (LES)**

Das LES hat zwei Aufgaben: (a) ein F&E-Programm zur Stärkung der wissenschaftlichen Basis für die Entsorgung nuklearer Abfälle durchzuführen, und (b) zusammen mit dem SLS (Swiss Light Source)-Team eine Mikro-Xas-Strahllinie zu betreiben. Die zwei Hauptprojekte im Rahmen der aktuellen LES-Aktivitäten sind:

- Unterstützung des Bundes und der Nagra bei ihrer Aufgabe, radioaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung sowie aus den KKW sicher zu entsorgen. Die Aktivitäten umfassen grundlegende Endlagerchemie, Radionuklid-Chemie und -Physik auf geologischen Grenzflächen und Radionuklidtransport. Die Resultate werden bei umfassenden Sicherheitsnachweisen Anwendung finden,
- Betrieb einer Strahllinie an der SLS für Spektroskopie mit harten Röntgenstrahlen, die hohe räumliche Auflösung erfordern. Die Strahllinie umfasst auch das Femto-Projekt zur Untersuchung zeitabhängiger Phänomene.

#### **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 viele andere) 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 schweizeri-

scher, 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 im Rahmen der probabilistischen Sicherheitsanalysen (PSA).

## Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse 2008

Um die 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 darüber würde den Rahmen dieses Bereiches 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]

Mit dem Projekt Stars wurde im Labor für Reaktorphysik und Systemverhalten (LRS) während der letzten Jahre eine unabhängige Kompetenz zur Beurteilung des transienten Verhaltens von Leichtwasser-Reaktoren (LWR) aufgebaut, die mittlerweile auch international genutzt wird. Diese Arbeit erfordert ein multidisziplinäres Vorgehen, das heute auch mit «Multi-Physics» bezeichnet wird und bezüglich Stars darin besteht, Analysetechniken aus den Bereichen Neutronik, Thermohydraulik und Thermomechanik zu einer integralen Analyse zusammenzuführen.

Gegenwärtig gibt es einen starken Trend, Ergebnisse von Computational Fluid Dynamics (CFD) in die Beurteilung des Transientenverhaltens von LWR's einfließen zu lassen, in einem ersten Schritt vor allem auf dem Gebiet von einphasigen mehrdimensionalen Mischvorgängen. Da CFD jedoch sehr grosse Rechnerressourcen benötigt, ist es vorderhand nicht denkbar, einen Druckwasser-Reaktor vollständig mittels CFD zu simulieren. Als gangbarer Ausweg bietet sich deshalb die Kopplung eines CFD-Codes mit einem Systemcode an: der CFD-Code liefert für ein beschränktes Gebiet des Reaktorsystems die mehrdimensionale Darstellung der Strömungsvorgänge, während der Systemcode das gesamte restliche Reaktorsystem in vereinfachter (typischerweise eindimensionaler) Weise simuliert. Eine Anwendung bildet

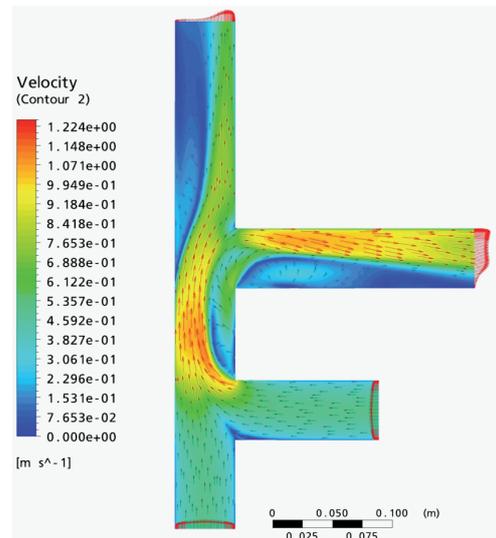
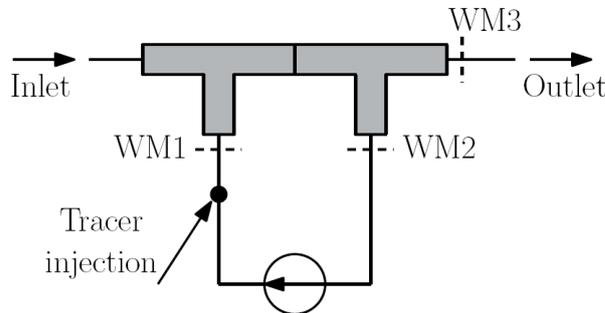
die Analyse eines Dampfleitungsbruches, der zu einer Abkühlung in einem Teilbereich des Reaktorkerns führt, was seinerseits zu einem positiven Reaktivitätseintrag und damit zu einem lokalen Leistungsanstieg führt. Dabei wird die Verteilung der Kühlmitteltemperatur durch die Mischvorgänge im unteren Reaktorplenum stark beeinflusst.

Im Rahmen einer Doktorarbeit wurde eine Kopplung zwischen dem CFD-Code CFX und dem Systemcode Trace entwickelt, und im Laufe des Jahres 2008 konnten erste viel versprechende Ergebnisse erzielt werden. Um die Rechenergebnisse zu beurteilen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Labor für Thermohydraulik ein kleines Mischexperiment aufgebaut (siehe Figur 1): Die Wasserströme am Einlass und durch die Pumpe betragen je 80 L/min. In den durch die Pumpe getriebenen Kreislauf wird kurzzeitig Markierungsstoff eingespeist, und dessen Konzentration wird an den 3 Messstellen WM1, 2 und 3 mittels eines Drahtgitter («Wire-mesh»)-Sensors gemessen.

Dieses Experiment zeigte den Erfolg des gekoppelten Code-Systems in eindrücklicher Weise: während die Rechnung nur mit dem Systemcode eine Strömungsaufteilung von 1:1 an der zweiten T-Verzweigung ergibt, zeigt das gekoppelte Code-System CFX-Trace als Folge der Rezirkulation einen höheren Eintrag von Tracer in den Seitenast, was genau der Beobachtung im Experiment entspricht. Dieses Ergebnis zeigt die Wichtigkeit der mehrdimensionalen Strömungsverhältnisse in der Nähe der T-Verzweigung, die mit einer eindimensionalen Strömungsdarstellung nicht ausreichend genau wiedergegeben werden können. Allerdings muss die Schnittstelle zwischen der eindimensionalen (Trace) und der dreidimensionalen (CFX) Simulation derart gelegt werden, dass einfache Annahmen zum Geschwindigkeitsprofil getroffen werden können. Entsprechende Arbeiten sind gegenwärtig im Gange.

### Risiko und menschliche Zuverlässigkeit (HRA) [2]

In der Untersuchung der menschlichen Zuverlässigkeit (Human Reliability Analysis, HRA), wird die menschliche Leistungsfähigkeit qualitativ analysiert, sodass die Ausfallarten identifiziert werden

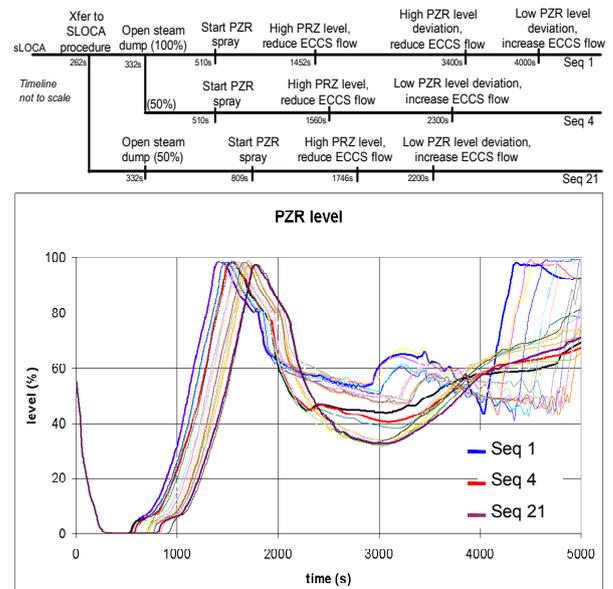


Figur 1: Schema des Mischungsexperiments (links) und mit dem gekoppelten Code-System CFX-Trace berechnetes stationäres Strömungsfeld.

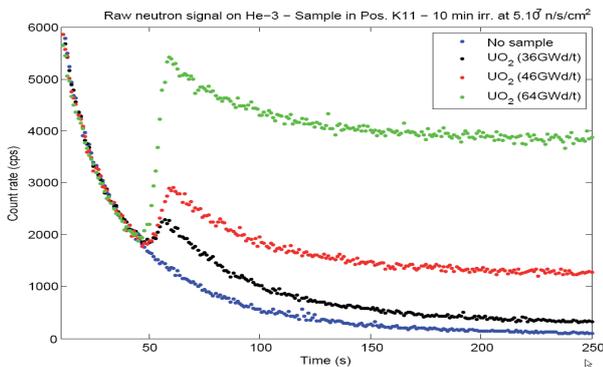
und daraus Bewertungen dieser Fehlfunktionen entwickelt werden können. Ein Simulationswerkzeug für die dynamische Szenarioanalyse, das die Simulation des Anlagenverhaltens mit der Reaktion der Betriebsmannschaft direkt koppelt, ermöglicht ein besseres Verständnis der Szenarien und deren Weiterentwicklung, sowie der Handlungsbedingungen, mit denen die Operateure konfrontiert sind. Dieses verbesserte Verständnis unterstützt die qualitative Untersuchung der menschlichen Zuverlässigkeit, inklusive der Analyse von potenziellen Fehlhandlungen («Errors of Commission», EOC). Das am PSI entwickelte Szenarioanalyse-Werkzeug basiert auf der ADS (Accident Dynamic Simulator)-Software, d.h. auf einer Implementierung der Methode des dynamischen Ereignisbaums. Ein Anlagenmodell steht in Wechselwirkung mit einem Verhaltensmodell der Betriebsmannschaft, das sich auf die Störfall-Vorschriften abstützt. Per Input werden die letzteren, sowie zusätzliche Reaktionsregeln basierend auf Training und abgeschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilungen für das zeitliche Verhalten, für die Ausführung der Simulation zur Verfügung gestellt.

Von einer Fallstudie eines Kühlmittelverluststörfalls mit kleinem Leck, die auf abgeschätzten Daten basiert, sind einige Resultate in Figur 2 dargestellt. Für diesen Fall sind die Ereignisbaumäste limitiert auf die zeitliche Variabilität in der Umsetzung der Prozeduren, die Übernahme der korrekten Prozedur bei einer späteren Diagnosegelegenheit und das Ausführen der Dampflastung bei verschiedenen Füllständen. Die Sequenzen 1 und 4 zeigen das Resultat von «schnellen» Mannschaften, während Sequenz 21 zu einer «langsameren» Mannschaft gehört.

Während die schnelleren Mannschaften die Hochdrucknoteinspeisung (ECCS) früher reduzieren, stellt die Mannschaft der Sequenz 1 den Füllstand im Druckhalter erst später wieder her (bei ca. 4'000 s) und füllt den Druckhalter annähernd. Das Szenarioanalyse-Werkzeug zeigt, dass die Gegebenheiten des Szenariums, mit dem die Operateure konfrontiert werden, nicht nur durch das «Wenn», sondern auch durch das «Wie» ihrer Reaktion beeinflusst wird. Die Handhabung



Figur 2: Der Füllstand im Druckhalter während dem untersuchten Kühlmittelverlustszenarium (unten) hängt nicht nur vom unterschiedlichen zeitlichen Verhalten und der Aktionen der Betriebsmannschaft ab (oben), sondern auch von der Art der Bewerkestellung der mehrfachen Zielsetzungen in Verbindung mit der Begrenzung der Unterkühlung, dem Speisewasserdurchsatz sowie dem Füllstand im Druckhalter.



Figur 3: Signale verzögerter Neutronen bestrahlter Brennstoffproben mit verschiedenen Abbränden im Proteus.

der Zielsetzungen, die Begrenzung der Unterkühlung, den Speisewasserdurchsatz und den Füllstand im Druckhalter gleichzeitig zu kontrollieren, sowie die Wechselwirkung ihrer Reaktionen mit dem Verhalten der Anlage spielt in diesem Fall eine wichtige Rolle. Solche Ergebnisse erlauben die Festlegung eines realistischeren Umfangs der Handlungsbedingungen, welche in den Untersuchungen der menschlichen Zuverlässigkeit zu berücksichtigen sind.

### Proteus Upgrade [3]

Eines der Ziele des Projektes «Proteus Upgrade» ist die Nachrüstung und Erweiterung des Nullleistungsreaktors Proteus, so dass zukünftige Experimente mit hochabgebrannten LWR-Brennstoffstäben (Projekt «Largescale-Irradiated-Fuel-Experiments», Life@Proteus) durchgeführt werden können. Dabei soll der Status einer Kernanlage mit geringem Gefährdungspotenzial beibehalten werden.

Im Jahr 2008 lag der Schwerpunkt des Projekts auf der Beantwortung von Fragen, die bei der Grobprüfung der Gesuchsunterlagen der Bau- und Betriebsbewilligung durch die HSK gestellt wurden. Wesentliche Fragestellungen wie beispielsweise zu Störfallanalysen und Baugrundeigenschaften des Proteus konnten positiv beantwortet werden. Zudem hat das PSI einen Strategiewechsel im Bewilligungsverfahren vorgenommen. Ein getrenntes Einreichen von Bau- und Betriebsbewilligungsunterlagen führt zu einer deutlichen Entflechtung in der Projektplanung und -ausführung und erlaubt auch eine signifikante Vereinfachung der Prozesse. Das Projekt wird auch im nächsten Jahr mit hoher Priorität vorangetrieben, und Mitte nächsten Jahres werden die Gesuchsunterlagen der Baubewilligung zur Prüfung eingereicht. Um eine Betriebsbewilligung wird im Jahre 2010 nachgesucht.

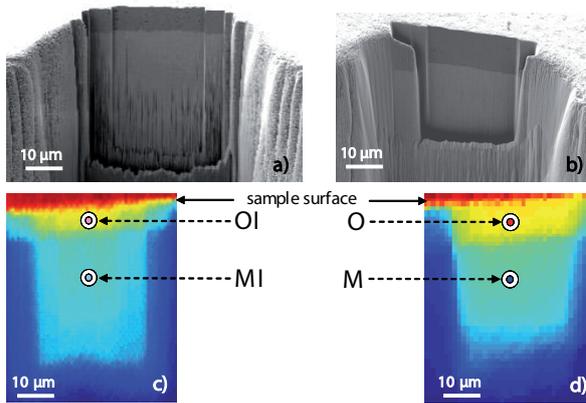
Im Laufe dieses Jahres wurden die Messmethoden für das experimentelle Programm Life@

Proteus weiter entwickelt. Der Einsatz von Segmenten hoch abgebrannter Brennstoffstäbe führt zu einem deutlichen Anstieg des Strahlungsuntergrundes ( $\gamma$  und Neutronen) und erschwert die Analyse (siehe Figur 3). Daher wurden am Proteus vielfältige Bestrahlungen mit Segmenten von abgebrannten Brennstoffstäben durchgeführt, um Messtechniken zu ertüchtigen. Hierzu wurden beispielsweise die Anordnungen hoch reiner  $\gamma$ -Detektoren und Neutronendetektoren optimiert, um Reaktionsraten und verzögerte Neutronen zu bestimmen.

### Nukleare Brennstoffe [4]

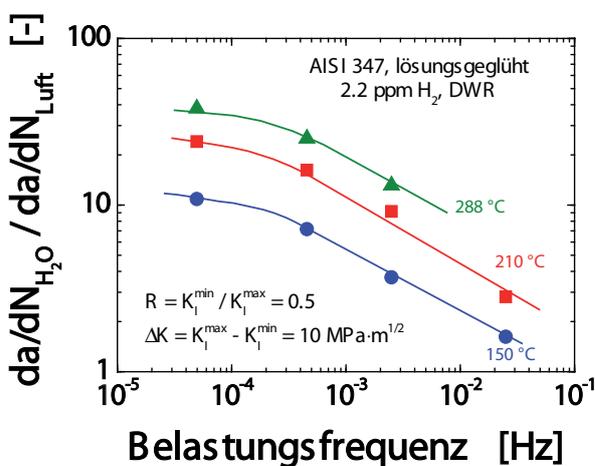
Die aus Zirkonium-Legierungen bestehenden Brennstab-Hüllrohre sind im Reaktor extremen Bedingungen ausgesetzt wie hohen Temperaturen und Drücken, Neutronenstrahlung sowie dem korrosiven Einfluss des Kühlmittels. Durch Zugabe spezieller Legierungspartner, z.B. Niob, kann die Korrosionsbeständigkeit beeinflusst werden. Zum besseren Verständnis des Einflusses von Niob wurde eine 2,5%-Nb-haltige Zirkonium-Legierung nach Behandlung im Autoklaven sowie nach dem Einsatz im Druckwasserreaktor mittels Synchrotronstrahlung an der Swiss Light Source (SLS) untersucht. Der Grund für die Wahl der unterschiedlichen Proben (Autoklav bzw. Reaktor) liegt darin, dass das Oxidationsverhalten im Reaktor auf Grund der Neutronenbestrahlung vom Verhalten im Autoklaven abweichen kann. Dies äussert sich beispielsweise in strahlungsinduzierten, mikrostrukturellen Änderungen an der Metall-Oxid-Grenzfläche oder an den für das Korrosionsverhalten wichtigen Sekundärausscheidungen. Mit der gewählten Methode (Synchrotronstrahlung), lassen sich mikroskopische Bereiche hinsichtlich Elementverteilung, Speziierung (Ausprägung) und Struktur analysieren. In diesem Fall wurde die Raster-Röntgen-Mikroskopie sowohl im Transmissions (STXM)- als auch im Fluoreszenzmodus mit der Mikro-Röntgen-Absorption (micro-XAS) kombiniert. Die zweidimensionale Zirkonium-Verteilung, die für die unbestrahlte, autoklavierte wie auch die neutronenbestrahlte Zr-2,5%-Nb-Legierung ermittelt wurde, ermöglichte eine mikrometergenaue Lokalisierung der Schnittstelle zwischen Oxid und Metall. Micro-XAS-Untersuchungen erlaubten die Bestimmung der Zirkonium- und Niob-Speziierungen (Figur 4). Die Koordinationszahlen und/oder die Valenzen von Zirkonium und Niob wurden für beide Materialien (Autoklav bzw. Reaktor) im Metall und Oxid nahe der Grenzfläche ermittelt.

Im Metall nahe der Grenzfläche ist die Koordinationsumgebung für die ersten 3,5 Å um das absorbierende Zirkoniumatom für den bestrahlten wie den unbestrahlten Fall gleich, ähnlich



Figur 4: Mikroskopische Resultate für die bestrahlte (links) und die autoklavierte Zr-2,5 %-Nb-Probe (rechts): a) und b) REM (Raster Elektronenmikroskop) Bilder nach FIB (Focused Ion Beam)-Probenpräparation; c) und d) die dazu gehörigen, hoch aufgelösten 2D-STXM-Bilder aufgenommen an der Zr-K-Kante. An den Positionen M und MI im Metall bzw. O und OI im Oxid (I steht für irradiated) wurden micro-XAS-Analysen durchgeführt. Die Strahlabmessung betrug etwa  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ , bei Transmissionsmode und Raumtemperatur.

einer dichtest gepackten Hexagonalstruktur. Im Oxid ist kein metallisches Zirkonium zu finden; die Bestrahlung macht keinen Unterschied aus. Das Oxid weist eine monokline Struktur auf. Das Niob zeigt im metallischen Bereich einen zu erwartenden metallischen Charakter, jedoch eine zum reinen Niob geänderte Struktur. Während für die bestrahlte Legierung die gleiche Valenz für Niob auch im Oxid gefunden wurde, zeigt das Niob in der autoklavierten Probe einen oxidischen Charakter. Es muss betont werden, dass die Distanz zur Grenzfläche hier deutlich grösser war im Vergleich zur bestrahlten Probe. Um endgültige



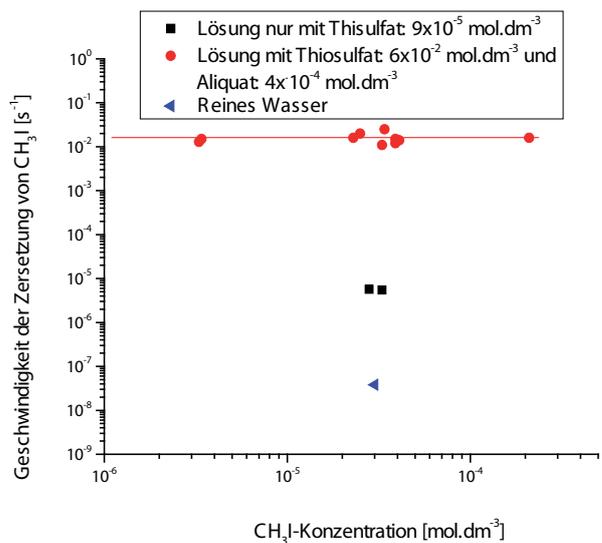
Figur 5: Einfluss von Temperatur und Belastungsfrequenz auf die umgebungsbedingte Beschleunigung des Ermüdungsrischwachstum in einem lösungsgeglühten, Nb-stabilisierten rostfreien Stahl unter simulierten DWR-Kühlmittelbedingungen.

Aussagen zum möglicherweise unterschiedlichen Oxidationsverhalten von Niob in dieser Legierung zu erhalten, sind weitere Tests geplant mit engmaschigen Messungen, die schrittweise über die Metall-Oxid-Grenzfläche verteilt sind.

### Integer (Bauteilsicherheit) [5]

Das Projekt Integer befasst sich mit Alterungsmechanismen in druckführenden Primärkreislaufkomponenten sowie mit deren möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer und Sicherheit von Kernkraftwerken und wird stark durch die HSK (ENSI) und Schweizer KKW finanziell unterstützt. Die Ermüdung ist ein wichtiger Schädigungsmechanismus, der mit zunehmendem Anlagenalter an Bedeutung gewinnt und vereinzelt auch zu Ermüdungsrisssbildungen und Leckagen in Druckführenden Komponenten geführt hat. Im Rahmen des Teilprojektes Kora untersuchen wir mögliche Effekte des Reaktorkühlmittels auf die Ermüdungsrisssbildung und das Ermüdungsrissswachstum in rostfreien Stählen unter Druckwasser (DWR)- und Siedewasserreaktor (SWR)-Bedingungen bei Wasserstoffchemiefahrweise (HWC).

Sowohl unter DWR- wie auch SWR/HWC-Bedingungen wurde in allen rostfreien Stählen eine relevante Beschleunigung des Ermüdungsrissswachstums für die Kombination von Belastungsfrequenzen  $\leq 0,1 \text{ Hz}$ , Temperaturen  $\geq 150 \text{ °C}$  und Schwingbreiten des Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta K \geq 3 \text{ MPa m}^{1/2}$  beobachtet (Figur 5). Falls diese kritischen Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind, nehmen die Umgebungseffekte mit abnehmender Belastungsfrequenz und zunehmender Temperatur zu. Das Reaktorkühlmittel führt unter diesen Bedingungen gegenüber Luft



Figur 6: Zersetzung von Methyljodid als Funktion der Methyljodid-Konzentration für reines Wasser, für Wasser mit Thiosulfat und für Wasser mit einer Kombination von Thiosulfat und Aliquat.

unter ansonsten identischen Bedingungen typischerweise zu einer Beschleunigung des Ermüdungsrisswachstums um einen Faktor 5 bis 20. Die Ermüdungsrisswachstumskurven für rostfreie Stähle in Section XI im *Asme Boiler & Pressure Vessel Code*, welche für Strukturintegritätsbewertungen ermüdungsbeanspruchter Komponenten verwendet werden, berücksichtigen solche Umgebungseinflüsse bisher nicht und sollten deshalb für diese kritischen Systembedingungen modifiziert werden.

Für viele Ermüdungsbeanspruchungen sind einer oder mehrere dieser kritischen Bedingungen nicht erfüllt und die Umgebungseffekte deshalb moderat. Aufgrund der hohen Belastungsfrequenzen spielen Umgebungseffekte z. B. bei der hoch zyklischen Ermüdung durch strömungsinduzierte Vibrationen infolge von Leistungserhöhungen keine Rolle. Andererseits liegen die Beanspruchungsgeschwindigkeiten und Temperaturen bei vielen thermischen Ermüdungsphänomenen (z. B. Temperaturschichtung) in einem kritischen Bereich, der relevante Umgebungseffekte erwarten lässt. Langsame Beanspruchungen führen zwar zu sehr starken Umgebungseffekten, bei entsprechenden thermischen Transienten sind aber infolge der stark reduzierten resultierenden mechanischen Risspitzenbeanspruchungen  $\Delta K$  die Rissfortschritte pro Belastungszyklus dennoch relativ klein und die Schädigung deshalb nicht so extrem, wie man es vielleicht auf den ersten Blick erwarten würde.

### Forschung zu schweren Unfällen [6]

Reduktion der Strahlenbelastung durch Jod: Zu den Schwerpunkten der Sicherheitsbetrachtungen beim Betrieb von Kernkraftwerken (KKW) gehören die Vorkehrungen zur Verhinderung der Freisetzung des Radiojods, einem potenziellen Verursacher von Schilddrüsenkrebs. Die Forschung am PSI dient der Erarbeitung neuer technischer Verfahren und der Entwicklung von Rechenprogrammen zur Modellierung von u.a. solchen Störfällen.

Die Experimente zum Jodverhalten wurden unter Bestrahlungsbelastungen, die mit denen im KKW auftretenden vergleichbar sind, durchgeführt. Die Reaktionen des Jods wurden analysiert und die Konzentrationen radiochemisch verfolgt. Dieses, das Gesamtjod erfassende Verfahren ist neu und bisher nur am PSI einsetzbar.

Beim Studium der Umwandlung von sehr flüchtigen organischen Jodspezies wie z.B. Methyljodid ( $\text{CH}_3\text{I}$ ) zu Jodidionen konnte mit langkettigen quaternären Aminen wie Aliquat 336 ein Additiv gefunden werden, das die Effektivität der bisher eingesetzten Thiosulfatlösungen wesentlich übertrifft.

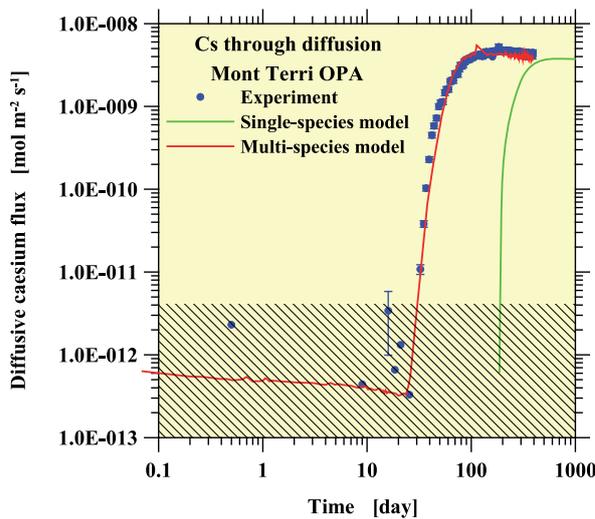
Dabei kommt die doppelte Funktionalität dieser Verbindungen als Katalysator und Anionenaustauscher zum Tragen. Die Wirksamkeit wurde am Beispiel von Gaswäschern demonstriert (siehe Figur 6). Das Endprodukt Jodid wird gebunden und einer Reoxidation entzogen. Das gelöste Aliquat-Jodid kann an technologisch bewährten Sorptionsmitteln konzentriert und entsorgt werden.

Der Einsatz von Aliquat 336 zur schnellen Umwandlung von flüchtigen Jodverbindungen zu Jodid und dessen Fixierung eröffnet neue Möglichkeiten der Reduzierung der Strahlenbelastung beim Umgang mit Radiojod-haltigen wässrigen Lösungen bei Wartungs- und Revisionsarbeiten im KKW. Die Effektivität und der Wirkungsbereich der Massnahmen zur Jodrückhaltung bei einem Störfall kann wesentlich erhöht und erweitert werden.

### Entsorgung radioaktiver Abfälle [7]

Das Labor für Endlagersicherheit entwickelt und testet Modelle und stellt spezifische Daten bereit, die für die Sicherheitsanalysen von geplanten Schweizer Endlagern für radioaktive Abfälle wichtig sind. Die Ausbreitungsparameter von Radionukliden im Opalinuston, einem prädestinierten Wirtsgestein für ein Tiefenlager, sind wichtig für die Sicherheitsanalysen für ein solches Endlager. Sie werden meist in Laborexperimenten bestimmt, entweder in Batch-, Sorptions- oder Diffusionsexperimenten. In ersteren wird der Verteilungskoeffizient für ein Radionuklid zwischen sorbierter Masse auf der Festphase und der im Wasser gelösten Masse in einem «verdünnten System» bestimmt; im zweiten Fall wird die Zeitdauer gemessen, in der Radionuklide durch eine Gesteinsprobe diffundieren. Beide Methoden liefern Parameter für das Rückhaltevermögen vom Gestein. Für Cäsium (Cs) ergaben sich jedoch in Batch-Sorptionsexperimenten immer höhere Sorptionskapazitäten als in Diffusionsexperimenten. Diese scheinbare Inkonsistenz bei der Cs-Diffusion durch Opalinuston konnte jetzt erklärt werden.

Bei der Modellierung der Diffusionsexperimente wurde bisher ein Transportmodell benutzt, in dem nur die «Single-Spezies» Cs-Diffusion und eine nicht lineare Sorption von Cs an Opalinuston berücksichtigt wurde. Die neue Modellierung beinhaltet ein komplexeres In-House-Multi-Spezies-Transportmodell MCOTAC, in dem auch ein detailliertes In-House mechanistisches Sorptionsmodell integriert wurde. Hierbei wird der kompetitive bzw. der sich konkurrierende Ionenaustausch von K, Na, Ca und Mg mit Cs an Opalinuston-Oberflächen sowie die gleichzeitige Diffusion aller Haupt-Ionen im Porenwasser des Opalinustons berücksichtigt, welche wiederum die Cs-Diffusion und -sorption beeinflussen.



Figur 7: Gemessener diffusiver Cäsium-Fluss durch eine 1,1 cm dicke Opalinuston-Probe aus dem Mont Terri Felslabor im Vergleich zu Rechnungen mit einem Single-Spezies-Transportmodell mit nicht linearer Cs-Sorptionsisotherme und einem Multi-Spezies-Transportmodell mit mechanistischen Sorptionsmodellen für Cs, K, Na, Ca und Mg. Für beide Modellrechnungen wurde die in Batch-Sorptionsexperimenten gemessene Sorptionskapazität von Opalinuston benutzt.

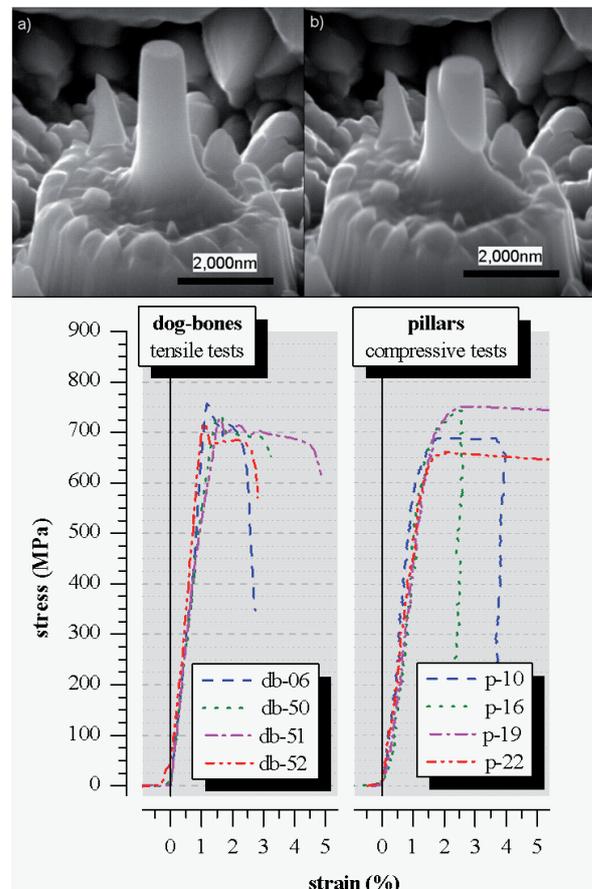
Die in Batch-Sorptionsexperimenten bestimmte Sorptionskapazität konnte direkt im Multi-Spezies Modell benutzt werden, um in Diffusionsexperimenten den Cs-Diffusionskoeffizienten zu bestimmen, indem die gemessene und berechnete diffundierte Cs-Masse in gute Übereinstimmung gebracht wurde. Gleichzeitig war auch die totale Massenbilanz erfüllt. Dieses gelang mit dem «Single-Spezies»-Modell und bei Verwendung der Batch-Sorptionsdaten für Cs nicht (Figur 7). Mit der komplexeren Modellierung ergab sich so ein konsistentes Bild zum besseren Verständnis der Cs-Diffusion durch Opalinuston. Diese Modellierung zeigte aber auch, dass es bei der Analyse von Diffusionsexperimenten häufig nötig ist, eine gekoppelte Modellierung von Transport (Diffusion), Sorption und Wasserchemie zu berücksichtigen, um Transportparameter für Radionuklide, wie hier den Cs-Diffusionskoeffizienten im Opalinuston, korrekt aus Laborexperimenten zu bestimmen, welche dann in Rechnungen zu Sicherheitsanalysen verwendet werden. Dieses verbesserte Systemverständnis spiegelt sich dann auch in einer robusteren Aussagekraft von Sicherheitsanalysen wieder.

### Sicherheitsbezogene Merkmale zukünftiger Reaktorkonzepte

#### Hochtemperaturmaterialien [8]

Eine möglichst genaue Bestimmung von Lebensdauer und Restlebensdauer von hoch belasteten Komponenten in Kernanlagen ist für deren siche-

ren Betrieb von grösster Bedeutung. Das gilt nicht nur für gegenwärtige Kraftwerke, sondern es gilt in gleichem Masse auch für zukünftige Anlagen. Im Fall des Ultra-Hochtemperaturreaktors (VHTR), der als eine Option für nachhaltige Kombianlagen zur Erzeugung von elektrischer Energie und Prozesswärme gilt, kommen zu den von den Leichtwasserreaktoren bekannten Alterungsmechanismen (Versprödung, Korrosion in wässriger Lösung, Ermüdung) noch andere Beanspruchungen dazu. Die betriebsbedingten Temperaturen (900 – 950 °C) können zu Kriechbelastungen und damit zu Kriechschädigung führen. Zusammen mit Transienten beim An- bzw. Abfahren der Anlage kann es zu Dehnwechsellermüdung und zu Kriech-Ermüdungswechselwirkung kommen (Figur 8). Das Kühlmittel Helium, das betriebsbedingte Verunreinigungen beinhaltet, ist bei diesen Temperaturen nicht inert und man muss mit Hochtemperaturkorrosion rechnen. Konventionelle Methoden der zerstörungsfreien Prüfung sind für die Erfassung dieser Vorgänge in den Werkstoffen wenig erprobt. Als Ergänzung bietet



Figur 8: Die beiden Fotos zeigen als Beispiel einen Druckversuch mit einer Kleinstprobe (micro-pillar): links vor, rechts nach der Druckbelastung. Die unten dargestellten Spannungs-Dehnungskurven zeigen, dass in diesem Fall (dispersionsgehärteter Stahl) eine sehr gute Übereinstimmung mit Zugversuchen an konventionellen Proben (dog-bones) gefunden wurde.

sich eine Probennahme belasteter Stellen zur weiteren Untersuchung an. Dazu würden sich besonders Proben im Mikrometerbereich eignen, weil dann der Materialabtrag äusserst gering bliebe. Im Rahmen unseres Projektes forschen wir an der Übertragbarkeit von Ergebnissen von Kleinstproben auf Grossproben.

### Alpha [9]

Im Rahmen des OECD-Projekts Seth-2 führt das Labor für Thermohydraulik an der Panda-Anlage Experimente zum Containmentverhalten von Leichtwasserreaktoren durch. In Arbeitsteilung mit der Versuchsanlage Mistra (CEA, Frankreich) wird das Ziel verfolgt, eine umfangreiche Datenbasis zu erstellen, die es gestattet, heute übliche Rechenprogramme hinsichtlich der Vorhersage der Wasserstoffausbreitung bei Störfällen mit Kernüberhitzung zu validieren und zu verbessern. Zusätzlich sollen die gewonnenen Daten zur Entwicklung der nächsten Generation von Computermodellen dienen, die auf einer vollständig dreidimensionalen strömungsmechanischen Behandlung der Phänomene beruhen, den so genannten CFD (Computational Fluid Dynamics) -Codes. Die möglichst zuverlässige Vorhersage der Wasserstoffausbreitung ist entscheidend für die richtige Auslegung von Massnahmen und Einrichtungen zum Schutz des Containments gegen eine Zerstörung durch eine Wasserstoffdetonation.

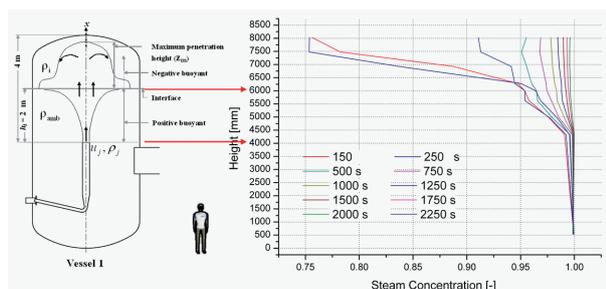
Die Experimente bilden speziell den Einfluss der Intensität und des Orts der Freisetzung von Dampf und Wasserstoff in das Containment, von Wärmequellen wie Rekombinatoren zur katalytischen Verbrennung des Wasserstoffs, von Wärmesenken wie Containmentkühler oder das Containment-Sprühsystem, sowie die Wärmeabgabe über die Containmentwand auf den Aufbau der Wasserstoffverteilung nach. Spezielles Interesse gilt der Funktionsfähigkeit von passiven Containmentkühlsystemen in Anwesenheit von bei Containmentbedingungen nicht kondensierbaren Gasen (Luft, Wasserstoff), wie sie in Reaktoren der Generation III+ eingesetzt werden oder vorkommen können. Für diese Versuche ist die Instrumentierung der Panda-Anlage beträchtlich erweitert worden, um den Anforderungen an die räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen gerecht zu werden, die insbesondere für die Entwicklung von CFD-Verfahren notwendig sind. Die bewährte Messung der Gaszusammensetzung mit Massenspektrometern wurde von 40 auf maximal 80 Messstellen erweitert. Dazu kommt ein Netzwerk von Ultraschallsensoren, die diese Konzentrationsmessungen durch ihre wesentlich höhere Messfrequenz ergänzen. Weiterhin kommen neuartige, mit gepulsten Miniaturheizern ausgestattete Laufzeitmessgeber zum Einsatz,

die die Geschwindigkeit an Stellen ermitteln, die für die bewährte PIV-Anlage (Particle Imaging Velocimetry) zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern unzugänglich sind. Die neuen Messverfahren wurden in Zusammenarbeit mit dem Labor für Kernenergiesysteme der ETH Zürich im Rahmen eines Doktors entwickelt.

Die erste Testreihe zum Studium des Abbaus einer Heliumschicht durch Vermischung mit einem vertikalen Dampfstrahl im oberen Containmentbereich wurde erfolgreich abgeschlossen. Dieser Teilprozess stellt auch heutzutage noch eine erhebliche Herausforderung an die numerische Simulation dar. Helium ersetzt hierbei den Wasserstoff als ungefährliches Modellfluid. Die Panda-Anlage erlaubt die vielfältige Variation von Randbedingungen, wie zum Beispiel die Dichteverhältnisse oder die Lage der Dampf-injektion. Als Ausgangssituation für das in Figur 9 dargestellte Experiment wird eine 2 m dicke Schicht aus 25 % Helium und 75 % Dampf vorgelegt. Da der injizierte Dampf zunächst eine höhere Temperatur hat, erfährt der Dampfstrahl einen Auftrieb. Auf dem Weg weiter nach oben baut sich der Anfangsimpuls des Strahls durch Interaktion mit der Umgebung ab. Bei Kontakt mit der Heliumschicht erfährt der Strahl eine nach unten gerichtete Abtriebskraft, weil nun die Dichte des Dampfes grösser ist als die der heliumhaltigen Umgebung. Vertikale, mit einem Massenspektrometer gemessene, Dampfkonzentrationsprofile sind auf der rechten Seite von Abbildung 1 für verschiedene Zeiten dargestellt. Es ist vorgesehen, u.a. diese Profile für einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen der Rechenprogramme heranzuziehen.

### Fast [10]

Der mit Helium gekühlte Schnelle Reaktor (GFR) ist ein Design, das die Ziele des Generation IV International Forums erfüllen könnte. Zur Simulation von sicherheitsrelevanten GFR-Transienten wird der state-of-the-art Computer Code Trace



Figur 9: Vertikale Profile der Dampfkonzentration in Abhängigkeit von der Zeit während des Abbaus einer Heliumschicht im Kopfbereich des Drywell-Behälters von Panda.

eingesetzt, der Teil des im Projekt Fast entwickelten Codesystems ist.

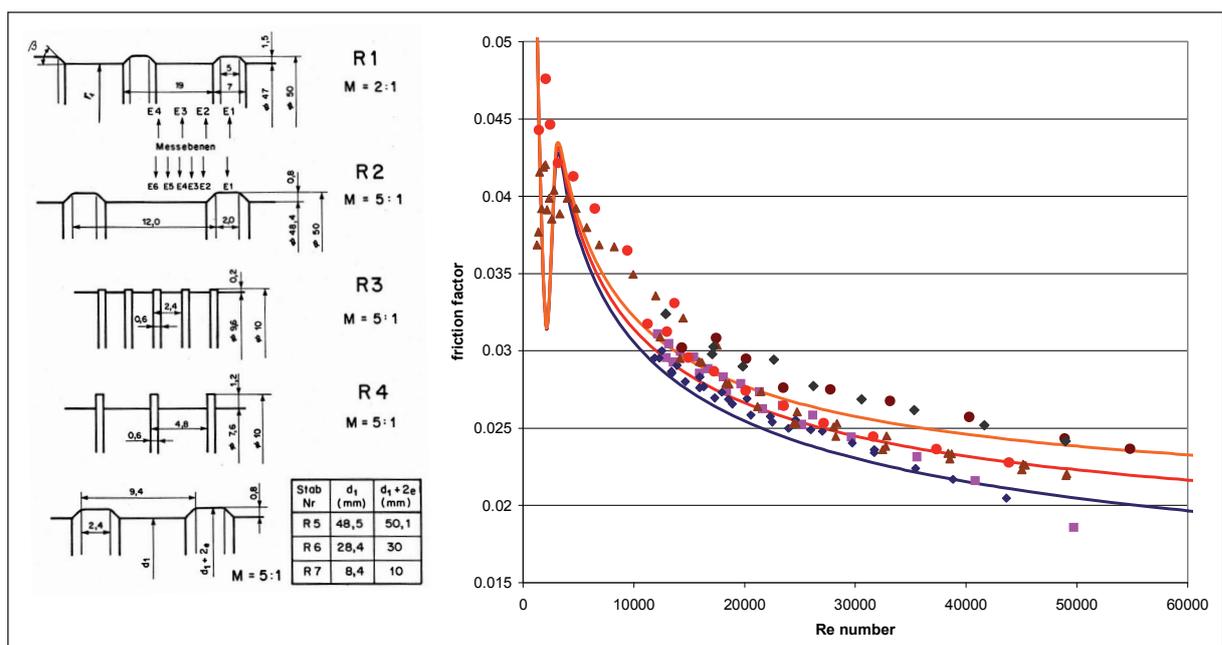
Im Rahmen des Forschungsprojekts zum gasgekühlten schnellen Reaktor (GFR) wurden in den 1970er und 80er Jahren am PSI (damals noch EIR) verschiedene Experimente mit Gaskreisläufen durchgeführt. Ziel dieser Tests war es, bei prototypischen GFR-Verhältnissen den Wärmeübergang und die reibungsbedingten Druckverluste zu untersuchen. Dabei wurden verschiedene Gase getestet, unter anderem auch Luft, CO<sub>2</sub> und Helium. Eine erste Kategorie von Tests beschäftigte sich mit Strömungen in Ringkanälen mit glatten und künstlich aufgerauten Wänden. Ziel des künstlichen Aufrauens der Wände war es, den Wärmeübergang vom Brennstab ins Kühlgas zu verbessern. Der linke Teil der Figur 10 zeigt die getesteten Aufrauungs-Geometrien. Die zweite Kategorie von Tests befasste sich mit Stabbündeln, in denen der Wärmeübergang und Druckverlust untersucht wurde. Die Messdaten wurde damals für einen Benchmark für das am PSI benutzte Computer Programm (Scrimp) verwendet.

Im Rahmen des aktuellen Generation-IV-Projekts wurden nun die damaligen Daten neu zusammengefasst und analysiert. Diese Aufarbeitung der Daten stellt zudem einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung des damaligen Wissens dar. Die damals gesammelten Daten wurden teilweise für ein neues Benchmark des Trace Codes verwendet mit dem Ziel, die Modellierung des Wärmetausches vom Brennstoff in das Kühlmittel Helium sowie den Kern-Druckverlust eines Generation IV GFR zu verbessern.

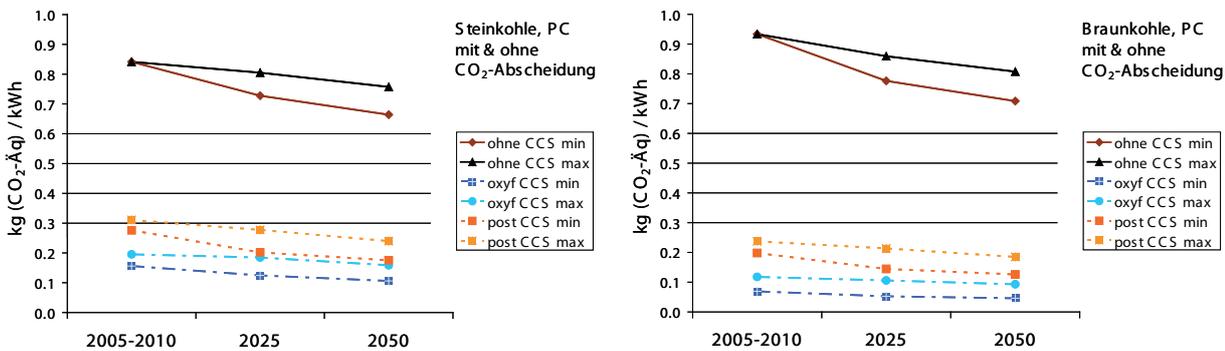
Als Beispiel zeigt der rechte Teil der Figur 10 die am damaligen Experiment gemessenen Reibungskoeffizienten (Punktwolke) als Funktion der Reynolds-Zahl in einem glattwandigen Rohr, während die durchgezogenen Linien die in Trace enthaltenen Korrelationen darstellen. Die gute Übereinstimmung zeigt, dass Trace in der Lage ist, die reibungsbedingten Druckverluste in Gasströmungen, insbesondere von Helium, gut zu simulieren.

### Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen [11]

Technologiebewertung: Im Berichtsjahr wurde als Beitrag zum europäischen Forschungsprojekt Needs (New Energy Externalities Development for Sustainability) die Analyse heutiger und zukünftiger (bis 2050) fossiler Stromerzeugungstechnologien in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart abgeschlossen. Diese beinhaltet sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte: Die Umweltbelastung der Stromproduktion wurde mit Hilfe von Ökobilanzen quantifiziert, die zukünftigen Stromerzeugungskosten mittels Lernkurven abgeschätzt. Die analysierten Technologien umfassen zentrale Stein- und Braunkohle-, sowie Erdgaskraftwerke mit und ohne Abscheidung und Einlagerung von CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage, CCS) und dezentrale Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK) inklusive der zugehörigen Brennstoffketten. Um die mögliche Bandbreite der zukünftigen Technologieentwicklung berücksichtigen zu können, wurden Umweltauswirkungen für drei verschiedene Szenarien quantifiziert: pessimistisch, realistisch-optimistisch und sehr



Figur 10: Getestete Aufrauungs-Geometrien um den Wärmetausch zu verbessern (links); rechts: Vergleich zwischen gemessenen Reibungskoeffizienten (Punktwolke) und Trace-Korrelation (Linien).



Figur 11: Treibhausgasemissionen aus Stein- und Braunkohlekraftwerken mit und ohne CCS bis zum Jahre 2050 (PC = «Pulverized Coal»). «min» entspricht den niedrigsten Emissionen der jeweils untersuchten Optionen und Szenarien, «max» den höchsten.

optimistisch. Für die Ökobilanzen wurden die drei wichtigsten Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung modelliert: «post-combustion», «pre-combustion» und «oxyfuel-combustion» sowie der CO<sub>2</sub>-Transport per Pipeline und die CO<sub>2</sub>-Endlagerung in salinen Aquiferen und erschöpften Gaslagerstätten.

Figur 11 zeigt als Beispiel der Ergebnisse der Ökobilanzen die Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung mit Stein- und Braunkohlekraftwerken mit und ohne CCS bis 2050. Es verdeutlicht, dass eine relativ klimafreundliche fossile Stromerzeugung in Zukunft nur mit CCS erreicht werden kann. Allerdings liegen die berechneten Emissionen für die kompletten Energieketten auch im Jahr 2050 im Bereich von 50 – 250 g (CO<sub>2</sub>-Äq.) pro kWh Strom – das oft in Aussicht gestellte fossile «Null-Emissions-Kraftwerk» wird damit nicht Realität. Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung erfordert einen hohen Energieverbrauch und zieht einen stark sinkenden Kraftwerkswirkungsgrad (5 – 10 %) sowie eine entsprechende Steigerung von Brennstoffverbrauch (inkl. der damit verbundenen Umweltauswirkungen) und Stromproduktionskosten nach sich. Abhängig von Brennstoff und Kraftwerkstechnologie steigen die Stromerzeugungskosten gegenüber Anlagen ohne CCS um ein Drittel bis knapp die Hälfte und werden im Jahr 2050 schätzungsweise 6,2 – 6,5 Rp./kWh für Strom aus Stein- und Braunkohle und 13,5 Rp./kWh für Strom aus Erdgas betragen.

## Forschungseinrichtungen

### Hotlabor [12]

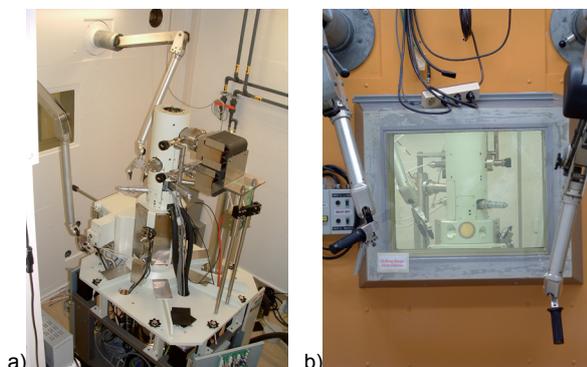
Das PSI-Hotlabor ist als einzige schweizerische Forschungsanlage zur Bearbeitung und Untersuchung aller Arten von radioaktiven Materialien und stark radioaktiver Komponenten (oder Teilen davon) von Kraftwerken und Forschungs- oder Beschleunigeranlagen ausgerüstet. Das Hotlabor als PSI-Grossanlage ist 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.

Die Anlage wird von ca. 35 Mitarbeitenden betrieben, die für die Hausinstallationen, die heissen Zellen, aber auch für die anspruchsvolle fortschrittliche Instrumentalanalytik verantwortlich sind. Die hauptsächlich bearbeiteten wissenschaftlichen Dienstleistungs- und Forschungsschwerpunkte bestehen in der:

- Charakterisierung des Bestrahlungsverhaltens von heutigen und fortschrittlichen LWR-Brennstäben;
- Analyse von verschiedenen Ablagerungen auf Reaktor-Komponenten (z.B. CRUD);
- Untersuchungen zur Radionuklidenausbreitung aus einem zukünftigen Endlager für radioaktive Abfälle;
- Eignungsabklärung von Containments aus einer Blei/Bismut-Legierung für das PSI-«Spallationstarget».

Im Berichtsjahr wurde die analytische Infrastruktur des Labors weiter verbessert und erneuert. Zwei



Figur 12: Installation der neuen Epma (Dezember 2008) im Hotlabor.

- a) Aufbau des neuen Geräts im Labor;
- b) Sicht auf das neue Gerät durch die biologische Abschirmung.

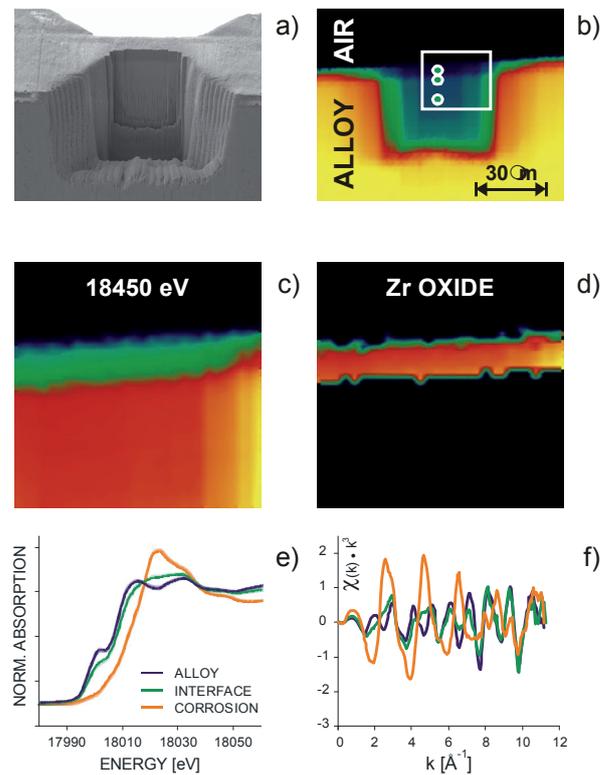
Hotzellen wurden komplett revidiert und umgerüstet; der alte «Elektron Probe»-Mikro-Analysator (Epma) wurde ausser Betrieb genommen und das Labor für ein neues Gerät vorbereitet (siehe Figur 12); schlussendlich wurde auch eine neue hoch auflösende ICP-MS in Betrieb genommen. Diese neuen Einrichtungen erlauben noch detailliertere Untersuchungen von nuklearen Materialien für die Hotlabor-Benutzer.

### Mikro-XAS Beamline [13]

Ein Röntgen-Mikroskop im Dienste der nuklearen Materialwissenschaften: Ein zentraler Themenkomplex der nuklearen Materialwissenschaften ist die Korrosion von metallischen Komponenten in Nuklearanlagen. Korrosionsphänomene sind in zweierlei Hinsicht von grosser Bedeutung. Einerseits beeinflusst die Korrosion sicherheitsrelevante Materialeigenschaften wie Brüchigkeit, Rissbildung etc. Andererseits bestimmen Aktivierungsprodukte angereichert in den Korrosionsschichten zu einem grossen Teil die Strahlenbelastung während Unterhaltsarbeiten. Ein vertieftes Verständnis der Korrosionsvorgänge hätte demzufolge einen bedeutenden betriebswirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Nutzen. Das System «Metall-Legierung-Hochtemperatur-Wasser» ist jedoch chemisch und physikalisch sehr komplex und mangels detailliertem Prozessverständnis noch nicht restlos kontrollierbar.

Nebst den häufig genutzten empirischen, makroskopischen Methoden und den klassischen mikroskopischen Methoden und den klassischen mikroskopischen Analysen (z.B. Elektronenmikroskopie) stehen den nuklearen Materialwissenschaften seit kurzem auch Röntgenmikroskope zur Verfügung. Diese Instrumentierung erlaubt es insbesondere, vertiefte Einblicke betreffend chemischen Zuständen und Eigenschaften zu gewinnen. Aufgrund der charakteristischen Art der Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie wird die Abbildung von komplexen molekularen Strukturen mit atomarer Auflösung mittels Streu-, Diffraktions- oder Absorptionsexperimenten möglich. Die microXAS-Strahllinie an der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS) ist ein solch hoch auflösendes Röntgen-Mikroskop und erlaubt als Besonderheit die Untersuchung von aktivierten Proben.

In einer ersten Betriebsphase wurden bereits verschiedene nukleartechnisch relevante Systeme untersucht. Ein illustratives Beispiel ist in Figur 13 wiedergegeben. In dieser Studie wurden Zirkon-Niobium-Legierungen unter Neutronen-Bestrahlung im Druckwasserreaktor gealtert. Die entstandenen Korrosionsprodukte wurden mittels Röntgen- und Elektronenmikroskopie eingehend untersucht. Diese Untersuchungen wurden durch eine ausgeklügelte Probenpräparation mittels fokussiertem Ionenstrahl (FIB) ermöglicht. Im



Figur 13: Untersuchung von Neutronen-bestrahltem Cladding.

- SEM Bild
- Röntgen-Mikroskopie: Absorptionskontrast-Bild
- Röntgen-Spektromikroskopie: Absorptionskontrast-Bild bei durchstimmbarer Anregungsenergie
- Röntgen-Spektromikroskopie: Rekonstruiertes Verteilungsmuster der oxidierten Zr-Atome
- Röntgen-Mikrospektroskopie: Unterschiedliche mikro-XANES-Signale aufgrund unterschiedlicher Chemie und molekularer Struktur
- Unterschiedliche mikro-EXAFS-Signale erlauben die Bestimmung der molekularen Zr Strukturen in der Legierung und in der Korrosionsschicht.

Das Rechteck in b) zeigt die Lage der Abbildungen c) und d). Die Kreise in b) entsprechen den Lagen der spektroskopischen Messungen in e) und f).

(limitierten) Zeitfenster der Alterung bildete sich eine nur 8 – 10 µm dicke Korrosionsschicht. Dies verdeutlicht bereits die Notwendigkeit von mikroskopischen Methoden zur Analyse der Korrosionsvorgänge.

Von den Kenntnissen der chemischen, molekularen Bindungsformen insbesondere der Dotierelemente versprechen sich die nuklearen Materialwissenschaften grundlegende Erkenntnisse hinsichtlich verbesserter Korrosionsbeständigkeit von dotierten Legierungen. Die gewonnenen Strukturinformationen und das Wissen über die Identität und räumliche Verteilung von mineralischen Phasen erlauben Rückschlüsse über die Abläufe der verschiedenen Prozesse während der Korrosionsschichtbildung.

## Nationale Zusammenarbeit

Eine Vielzahl der im NES durchgeführten Projekte werden aufgrund ihrer Thematik in enger Zusammenarbeit mit den Betreibern der Schweizer Kernkraftwerke, der Elektrizitätswirtschaft und der HSK (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 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](http://nes.web.psi.ch/int_cooperations.html).

## Bewertung 2008 und Ausblick 2009

Die Ziele aller Projekte wurden im Jahr 2008 erreicht. Insbesondere sind auch 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, erfolgreich in ihre Selbstständigkeit gestartet. Mit rund einem Drittel haben die Änderungen in der Pensionskasse des Bundes zum ohnehin schon grossen Personalabgang von rund 35 Personen beigetragen, welcher aber auch Ausdruck der erhöhten Nachfrage nach verschiedenartigen Fachleuten in der Nukleartechnik ist. Das sich abzeichnende Personalnachwuchsproblem im Nuklearbereich wird hoffentlich durch das neue Master-Ausbildungsangebot der beiden Technischen Hochschulen, das im Herbst 2008 gestartet wurde, mehrheitlich aufgefangen.

Auf der Vertragsseite wurde im Jahre 2008 ein neuer Vertrag mit der Nagra, ein bilateraler Zusammenarbeitsvertrag mit der Areva NP mit dem Thema Siedewasserreaktor der dritten Generation, sowie mit dem GIF (Generation IV International Forum) die System- und Projektvereinbarungen zum VHTR abgeschlossen. Im Rahmen der EU-Forschungsprogramme wurden 2008 vier neue

Projekte ins Leben gerufen: Fuel-Bridge, Assept, Nuresp, Rescoy. Besonders hervorzuheben ist auch die Vereinbarung mehrerer zweijähriger Arbeitsprogramme mit Swissnuclear im Rahmen des Vertrags zur Förderung der Kernenergie-Forschung und der Nachwuchsförderung. Sie sichern die Fortführung von NES-Forschungsarbeiten in verschiedenen wichtigen und interessanten Gebieten.

Neben den fortlaufenden Projektarbeiten werden auch im Jahre 2009 verschiedene auslaufende Verträge erneuert werden müssen, um die Kontinuität in den einzelnen Forschungsgebieten aufrecht zu erhalten. Zum Teil sind diese neuen Verträge bereits in Vorbereitung, wie zum Beispiel für Stars, für sechs Projekte im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm sowie für den natriumgekühlten Brüter im Rahmen von GIF. Daneben werden die Arbeiten zur Erlangung der Baubewilligung für den Nulleistungsreaktor Proteus einen Schwerpunkt bilden. Die bereits im Jahre 2008 begonnenen Kontakte vor dem Hintergrund des möglichen Baus von neuen Kernkraftwerken in der Schweiz werden 2009 intensiviert, mit dem Ziel, eine entsprechende vertragliche Zusammenarbeit auf nationaler Ebene zu beginnen.

**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] O. Köberl, (oliver.koerberl@psi.ch), PSI, Villigen, Proteus Upgrade; <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](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](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](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] D. Gavillet (didier.gavillet@psi.ch), PSI, Villigen, Hotlabor, <http://lww.web.psi.ch/lww/hotlab.shtml>.
- [13] D. Grolimund (daniel.grolimund@psi.ch), PSI, Villigen, Mikro-XAS-Beamline, <http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/mxas/index.html>.

**Impressum**

Juni 2009

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

Druck: Ackermanndruck, Bern-Liebefeld

Bezug der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

**Programmleiter**

Dr. Jörg Dreier

Paul Scherrer Institut PSI

CH-5232 Villigen – PSI

[joerg.dreier@psi.ch](mailto:joerg.dreier@psi.ch)

**Bereichsleiter**

Dr. Christophe de Reyff

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

[christophe.dereyff@bfe.admin.ch](mailto:christophe.dereyff@bfe.admin.ch)