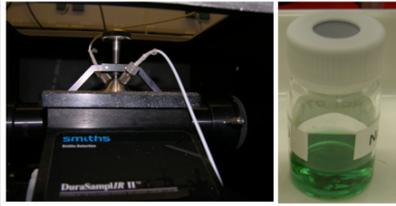


<b>Berichtszeitraum</b>	<b>2008</b>
<b>Programm</b>	<p data-bbox="470 271 948 304"><b>Nukleare Sicherheitsforschung</b></p> <p data-bbox="470 338 624 371"><b>Zielstellung</b></p> <p data-bbox="470 400 1412 580">Die Mission des Programms Nukleare Sicherheitsforschung besteht in der Grundlagen- und angewandten Forschung zum Schutz von Mensch und Umwelt vor den Risiken der Nutzung der Kernenergie. Dabei werden sowohl gegenwärtige als auch künftige Szenarien der Energieumwandlung betrachtet. Darüber hinaus wird die Expertise für die Prozesssimulation und -optimierung in anderen Industriezweigen eingesetzt.</p> <p data-bbox="470 582 1412 761">Die FE-Vorhaben sind auf die Bewertung und Minderung der Risiken aus dem Brennstoffkreislauf der Kerntechnik konzentriert und hier insbesondere auf die Altlasten des Uranerzbergbaus, auf die Energieerzeugung im Kernreaktor und auf die Entsorgung nuklearer Abfälle. Dieses wissenschaftliche Profil ist das Ergebnis der konsequenten Umsetzung der Voten und ausdrücklichen Empfehlungen des Wissenschaftsrats bei den Evaluierungen des FZD.</p> <p data-bbox="470 763 1412 916">Die Entwicklung und Validierung von Simulationswerkzeugen für die Prozess-, Störfall- und Langzeitsicherheitsanalyse, mit dem Schwerpunkt auf fortgeschrittenen thermo- und fluiddynamischen Berechnungsverfahren, stellt eine methodische Klammer für die Programmthemen Radioökologie, Reaktorsicherheit und Thermofluidynamik dar.</p> <p data-bbox="470 978 761 1012"><b>Wichtigste Ergebnisse</b></p> <p data-bbox="470 1041 644 1075"><u>Radioökologie</u></p> <p data-bbox="470 1104 1412 1375">Ziel der Forschungen ist es, zum besseren Verständnis des Verhaltens von Actiniden und langlebigen Radionukliden in der Umwelt beizutragen und die dominierenden Prozesse auf molekularer Ebene aufzuklären. Bei den Betrachtungen ist besonders zu berücksichtigen, dass die Actiniden unter den umweltrelevanten Bedingungen in Endlager- und Biosystemen sowohl gelöst als auch kolloidal in unterschiedlichen Oxidationsstufen auftreten können. Das Transportverhalten der Actiniden und langlebigen Radionuklide in den Geo- und Biosystemen wird wesentlich durch ihre Bindungsform unter den entsprechenden chemisch-physikalischen und bio-chemischen Bedingungen geprägt.</p> <p data-bbox="470 1377 1412 1464">Die Forschungen in diesem Bereich wurden ab 2008 in den FE-Vorhaben „Actiniden (Metalle) in Biosystemen“ und „Actiniden (Metalle) in Endlagersystemen“ konzentriert.</p> <p data-bbox="470 1500 1412 1713">Um den Transport der Actiniden beschreiben zu können, sind Kenntnisse zur Sorption dieser Schwermetalle an relevanten Gesteinen und Mineralen notwendig. Vergleichend wurde die Sorption des Neptuniums (V) an relevanten Oxiden (TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZnO) mittels Attenuated Total Reflection Spectroscopy (ATR) erstmals untersucht. Die Komplexierung erfolgte, unabhängig vom verwendeten Oxid, über gleiche innersphärische Komplexe (-Me-O-Np-Bindungen) auf der Oxidoberfläche über einen weiten pH-Bereich (siehe Abb.).</p>

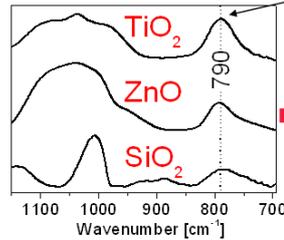
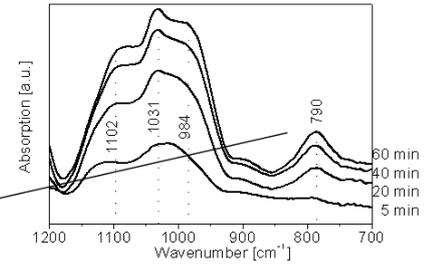
### Experimentelles



Messeinheit für ATR-FT-IR Spektroskopie

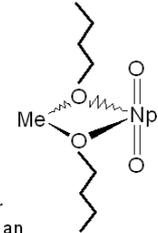
Np(V)-Lösung

Aufnahme zeitaufgelöster Infrarotspektren der Np(V)-Sorbate an den Oxiden (Beispiel TiO<sub>2</sub>) bei umweltrelevanten Konzentrationen.



Spektrenvergleich der Np(V)-Sorbate an den verschiedenen Oxiden ( $\lambda = 790 \text{ cm}^{-1}$ ).

IR-spektroskopische Identifikation gleicher Np(V) inner-sphärischer Oberflächenkomplexe an Titan-, Zink- und Siliziumoxid.



Ergebnisse dienen der Aufklärung der Sorptionsmechanismen der Actiniden an Gesteins- und Mineraloberflächen.

### Sorption von Neptunium(V) an Oxidoberflächen

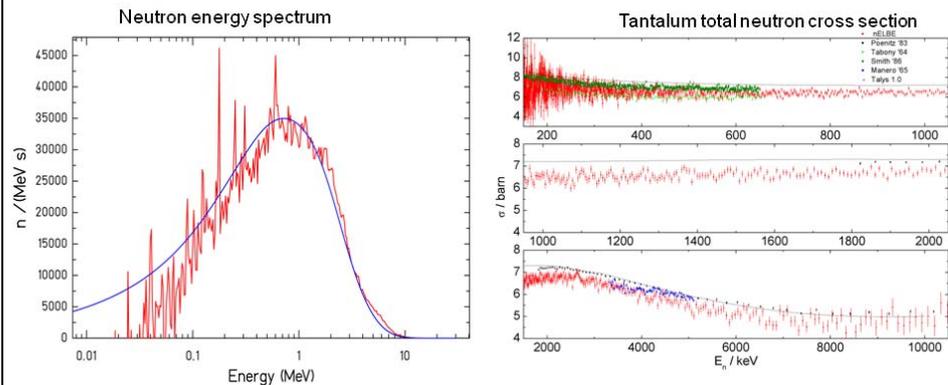
Erstmals wurden die Interaktionen von prokaryotischen *Archaea* mit U(VI) untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass Zellen des acidophilen Crenarchaeons *Sulfolobus acidocaldarius* signifikante Mengen U(VI) binden. Mittels Röntgenspektroskopie und Laserfluoreszenzspektroskopie wurde eindeutig nachgewiesen, dass U(VI) im sauren pH-Bereich (1,5-4,5) dominierend durch organische Phosphatgruppen der Zellwand gebunden wird.

Tongesteine werden als Wirtsformation für Nukleare Endlager in Betracht gezogen. Um die Sorption /1/ und die Diffusion von Actiniden und langlebigen Radionukliden beschreiben zu können, ist es wichtig, den Einfluss von enthaltenen Tonorganika, die aus kleinen organischen Molekülen, aber auch aus polymeren huminsäureartigen Verbindungen bestehen, zu kennen. Es wurde erstmalig ein Ton-Huminsäure-Assoziat synthetisiert, um die Prozesse der Wechselwirkung von Tonorganika mit Radionukliden parameterabhängig studieren zu können /2/. Zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen funktionellen Gruppen auf die Metallionen-Komplexierung durch Huminstoffe wurden schwefelhaltige Huminsäure-Modellverbindungen synthetisiert und hinsichtlich Elementzusammensetzung, Struktur und Funktionalität (Vorhandensein von Thiol, Dialkylsulfid- und Disulfid-Gruppen) charakterisiert.

### Transmutation

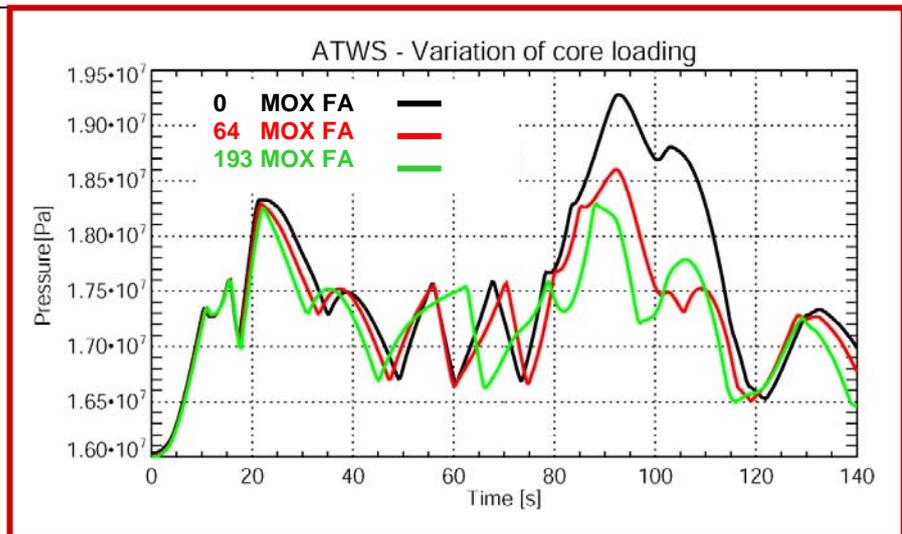
Langlebige radioaktive Abfälle können durch Beschuss mit schnellen Neutronen in kurzlebigeren umgewandelt werden, so dass die Stoffe nur für überschaubare Zeiträume sicher endgelagert werden müssen. An der Photoneutronenquelle nELBE /3/ können die vielfach nur unzureichend genau bekannten Reaktionsraten schneller Neutronen mit Strukturmaterialien von Kernreaktoren der IV. Generation sowie von langlebigen minoren Actiniden experimentell bestimmt werden. Der Forschungsschwerpunkt liegt auf der inelastischen Streuung schneller Neutronen. In Zukunft soll auch die Spaltung minorer Actiniden untersucht werden. Dazu sollen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie dünne Schichten von Actiniden hergestellt werden, an denen die neutroneninduzierte Spaltung untersucht werden kann.

Die Experimente an der Photoneutronenquelle nELBE wurden im Jahr 2008 fortgesetzt. Die Intensität des Neutronenstrahls wurde durch Verbesserung der Strahlführung am ELBE-Beschleuniger optimiert. Das Energiespektrum der Neutronen wurde mit Plastikszintillatoren und einer kalibrierten  $^{235}\text{U}$  Spaltkammer gemessen, erste Messungen der totalen Neutronenwirkungsquerschnitte an Aluminium und Tantal sind erfolgt (Bild). Experimente zur inelastischen Streuung an  $^{56}\text{Fe}$  wurden begonnen. Ein internationaler „Workshop on modern methods using fast neutrons for research related to the transmutation of nuclear waste“ mit ca. 50 Teilnehmern wurde im FZD im Rahmen des Projekts EFNUDAT ausgerichtet.



### Reaktorsicherheit

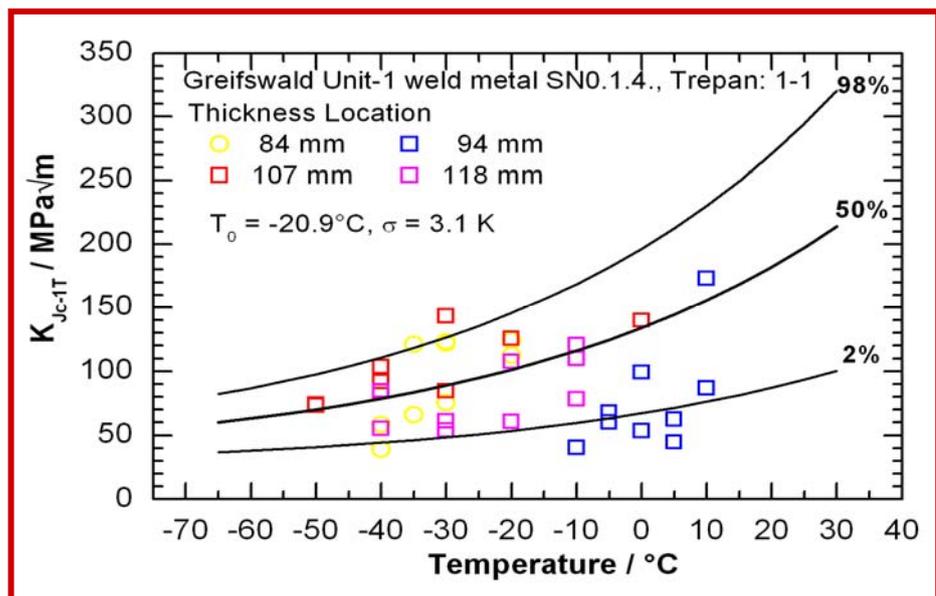
Das im Institut für Sicherheitsforschung entwickelte Reaktordynamik-Programm DYN3D steht sowohl für die Simulation von Leichtwasserreaktoren russischer und westlicher Bauart als auch für Salzschnmelzenreaktoren (GEN-IV) /4/ zur Verfügung. Für die Erhöhung der Rechengenauigkeit in Gebieten hoher Fluss- und Spektralgradienten sowie für Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum wurde eine Mehrgruppenversion von DYN3D in Verbindung mit einer vereinfachten Neutronentransportnäherung entwickelt und in Benchmarks überprüft /5/. Gekoppelt mit dem Thermohydraulik-Systemcode ATHLET wurde DYN3D bspw. für die Analyse von Transienten mit postuliertem, vollständigem Ausfall der Reaktorschnellabschaltung bei Druckwasserreaktoren eingesetzt /6/. Die Analyse dieser ATWS (Anticipated Transient Without Scram)-Ereignisse stellt besondere Anforderungen an die Simulation der inhärenten Rückkopplungsmechanismen. Stand der Technik sind Rechnungen mit einem Punktmodell des Reaktors. Mit den erhaltenen Ergebnissen stehen nun genauere 3-D-Analysen zur Verfügung. DYN3D/ATHLET wurde u. a. für die Analyse einer Transiente mit Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung der Dampferzeuger und nachfolgendem mechanischen Blockieren aller Steuerstäbe bei Kernbeladungen mit unterschiedlichem Anteil an MOX-Brennstoff eingesetzt. Es ist nachzuweisen, dass die Leistung des Reaktors über die Restwassermengen in den Dampferzeugern und die primäre Druckentlastung soweit abgeführt werden kann, dass der Druck im Primärkreis den 1,3-fachen Auslegungsdruck (22,75 MPa) nicht übersteigt, bis der Reaktor durch Einspeisung von Bor abgeschaltet werden kann. Dabei ist entscheidend, dass die Reaktorleistung über die inhärente Rückkopplung der Dichteabnahme des Moderators auf die Reaktivität im Verlauf der Transiente ausreichend abgesenkt wird. Die Rechnungen zeigen (siehe Bild), dass die Druckspitze nach dem Austrocknen der Dampferzeuger mit zunehmendem Anteil an MOX-Brennstoff abnimmt. Ursache ist die Spektrumshärtung bei MOX als Folge der epithermischen Resonanzabsorption im Pu-240. In allen analysierten Fällen kann der Druck auch ohne Abschaltung der Hauptkühlmittelpumpen unter 20 MPa und damit unter dem maximal zulässigen Druck gehalten werden.



Mit DYN3D/ATHLET berechneter Primärkreisdruck für ein ATWS-Szenarium

Der Reaktordruckbehälter (RDB) ist der Bestrahlung mit schnellen Neutronen ausgesetzt. Dies führt zu Gitterdefekten /7/, die eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs nach sich ziehen und die Lebensdauer des Reaktordruckbehälters bestimmen. Im Wesentlichen wird der Spröd-Duktil-Übergang zu höheren Temperaturen verschoben. Dies gilt insbesondere für bestrahltes Schweißnahtmaterial.

Ein wichtiges Projekt zur Aufklärung dieser Phänomene ist die bruchmechanische Untersuchung von authentischem RDB-Material des stillgelegten KKW Greifswald. Der Schwerpunkt liegt auf der Ermittlung der temperaturabhängigen Bruchzähigkeit nach dem Master-Curve (MC)-Konzept /8/, dessen charakteristischer Parameter die Referenztemperatur  $T_0$  ist. Im Bild ist die Bruchzähigkeit von Proben aus den Fülllagen hinter der Schweißnahtwurzel dargestellt. Im vorliegenden Fall ist die ermittelte Referenztemperatur  $T_0 = -20.9^\circ\text{C}$  für Proben aus der Tiefenlage 94 mm offensichtlich nicht gültig.



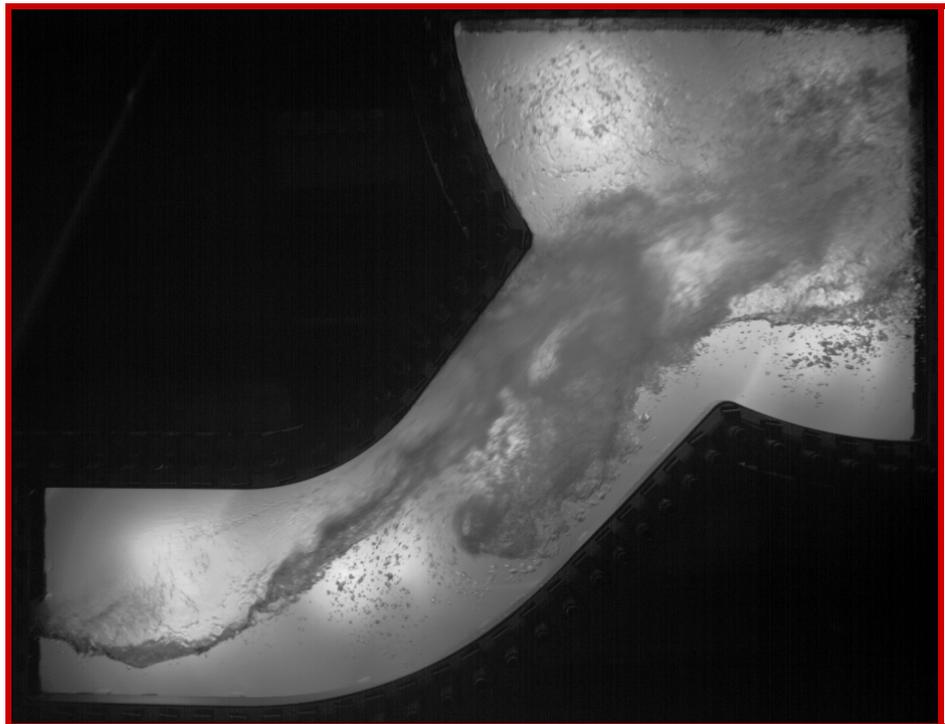
Bruchzähigkeiten über der Prüftemperatur und Master Curve ( $T_0 = -20.9^\circ\text{C}$ ) für 2%, 50% und 98% Bruchwahrscheinlichkeit ermittelt an Proben der Fülllagen der Core-Schweißnaht (Greifswald Block 1, VVER-440/230)

Das zeigt, dass das MC-Konzept in seiner derzeit angewandten Form u. U. zu hohe Bruchzähigkeiten bei der Sicherheitsbewertung von Schweißnähten liefern kann und damit zu nicht konservativer Sicherheitsbewertung führen würde. Dies liegt maßgeblich an dem stark inhomogenen Gefüge des Schweißgutes. Das insgesamt relativ niedrige Niveau der Temperatur  $T_0$  im Bereich um  $-20^\circ\text{C}$  zeigt aber auch, dass die großtechnisch durchgeführte thermische Ausheilung zu einer Erholung der mechanischen Eigenschaften geführt hat. Die Wiederversprödung nach 2 Jahren Betrieb ist sehr gering /9/.

#### Thermofluiddynamik

An der TOPFLOW-Anlage wurden Experimente zu geschichteten Zweiphasenströmungen an einem Modell des heißen Strangs eines Druckwasserreaktors durchgeführt /10/. Dabei wurde die neu entwickelte Drucktanktechnologie genutzt, die Hochdruckexperimente in dünnwandigen Komponenten erlaubt. Somit konnten weltweit erstmalig Dampf/Wasser-Strömungen bei Drücken bis zu 50 bar und entsprechenden Sättigungstemperaturen von bis zu  $264^\circ\text{C}$  über ein großflächiges Fenster beobachtet werden. Insbesondere wurde bei diesen reaktornahen Bedingungen das sicherheitstechnisch relevante Phänomen der Gegenstrombegrenzung untersucht.

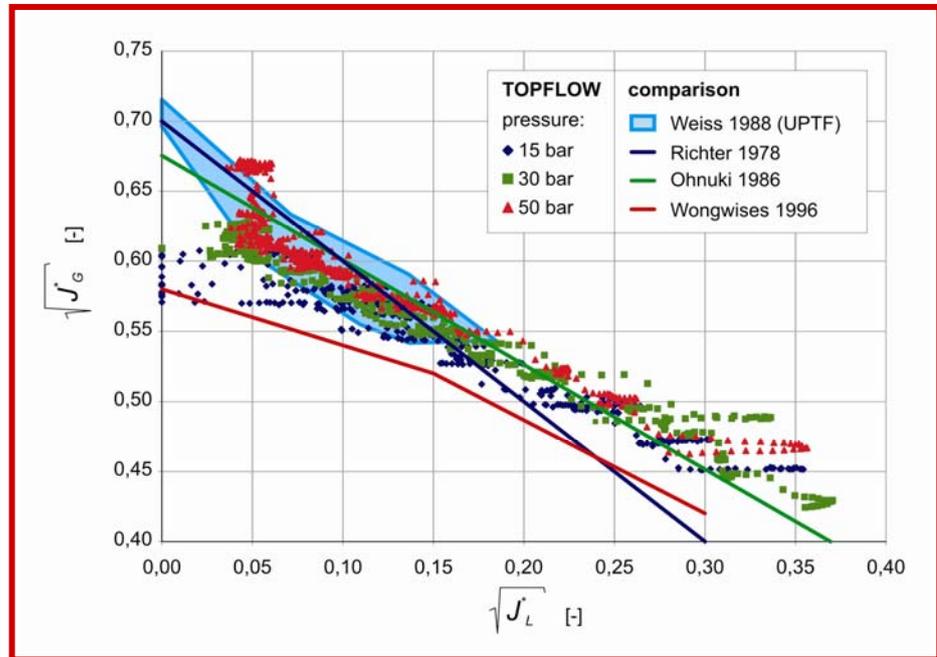
Die detaillierten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen bei hohen Leerrohrgeschwindigkeiten von Wasser und Dampf eine ausgeprägte dreidimensionale Struktur der Zwischenphasengrenzfläche: Blasen werden in der Flüssigphase mitgerissen und Tropfen lösen sich von der Grenzfläche ab.



*Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Gegenstrombegrenzung von Wasser und Dampf bei 50 bar im TOPFLOW Heißstrangmodell*

Aus den Experimenten wurden die Flutkurven des Heißstrangmodells für verschiedene Drücke ermittelt /11/. Diese geben den maximal möglichen Wasserdurchsatz an, der entgegen dem Gasdurchsatz auf der Flutkurve strömen kann. Dafür wird eine Darstellung basierend auf dem dimensionslosen Wallis-Parameter genutzt, bei der der Wasserdurchsatz ( $L$ ) auf der Abszisse und der

Gasdurchsatz (G) auf der Ordinate abgetragen wird (siehe Bild). Ein Vergleich mit Angaben für Rohrleitungen aus der Literatur zeigt trotz der unterschiedlichen Geometrie eine gute Übereinstimmung mit den neuen Ergebnissen.



Flutkurven vom TOPFLOW Heißstrangversuch (Flachkanal) im Vergleich zu Daten für Rohrgeometrien

Die gewonnenen Daten, insbesondere die hoch aufgelösten Videoaufnahmen, stellen eine weltweit einzigartige Basis für die Validierung von Computational Fluid Dynamics (CFD)-Verfahren dar.

- [1] A. Krepelova et al., Journal of Colloid and Interface Science 319 (2008) 40
- [2] S. Sachs et al., Chemosphere 72 (2008) 1441
- [3] A.R. Junghans et al., IEEE Nucl. Science Symp. Conf. Record, N42-3, 2008
- [4] J. Krepel et al., Nuclear Technology 164 (2008), 34-44
- [5] C. Beckert, U. Grundmann, Annals of Nuclear Energy 35 (2008)1, 75-86
- [6] S. Kliem, Jahrestagung Kerntechnik 2008, eingeladener Vortrag
- [7] F. Bergner et al., Journal of Physics: Condensed Matter 20 (2008) 104262
- [8] H.W. Viehrig et al., Int. Journal Pressure Vessels and Piping, im Druck
- [9] U. Rindelhardt U. et al., Nuclear Engineering and Design, im Druck
- [10] C. Vallée et al., Proc. of XCFD4NRS, 10-12 Sept. 2008, Grenoble, France
- [11] Deendarlianto et al., Nuclear Engineering and Design, 238 (2008) 3389

#### Zusammenarbeit mit externen Partnern (Auswahl)

#### Radioökologie

##### Gemeinsame Forschungsvorhaben und Publikationen

- Universität zu Köln (gem. Publikationen)
- Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (gem. Publikationen)
- University of Gothenburg, Schweden (gem. Publikationen)
- SKB Äspö Hard Rock Laboratory, Schweden (gem. Publikationen)
- Berkeley University of California, USA (gem. Publikationen)
- Université Joseph-Fourier, Grenoble, Frankreich (gem. Publikationen)
- Tokyo Institute of Technology, Japan (gem. Publikationen)
- Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Japan (gem. Publikationen)

Forschungszentrum Karlsruhe (gem. Drittmittelprojekte u. Publikationen)  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (gem. Forschungsvorhaben und Publikationen)  
Johannes Gutenberg-Universität Mainz (gem. Forschungsvorhaben und Publikationen)  
TU Dresden (gem. Forschungsvorhaben und Publikationen)  
Commissariat à l'Energie Atomique, Paris, Frankreich (gem. EU-Projekte)  
SKN-CEN Mol, Belgien (gem. EU-Projekte)  
Institut für Transurane (ITU), Karlsruhe (gem. EU-Projekte)  
Paul-Scherrer-Institut Villigen, Schweiz (gem. EU-Projekte)

#### **Reaktorsicherheit**

Forschungszentrum Karlsruhe (gem. Projekte + Publikationen)  
Hochschule Zittau/Görlitz (gem. Projekte + Publikationen)  
TU Dresden (gem. Projekte + Publikationen)  
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS), Köln, München (gem. Projekte + Publikationen)  
TÜV Süddeutschland, München (Lizenznehmer DYN3D)  
Vattenfall Europe Nuclear Energy(VENE), Hamburg (Finanzierung von Nachwuchswissenschaftlern)  
Commissariat à l'Énergie Atomique, Frankreich (gem. Projekte + Publikationen)  
Paul Scherrer-Institut(PSI), Villigen, Schweiz (gem. Projekte + Publikationen)  
SCK CEN Mol, Belgien (gem. Projekte + Publikationen)  
EDO Hidropress, Podolsk, Russland (gem. Projekte + Publikationen)  
Institute of Physics and Power Engineering, Obninsk, Russland (gem. Projekte + Publikationen)  
KFKI Budapest, Ungarn (gem. Projekte + Publikationen)  
Nuclear Research Institute(NRI), Řež, Tschechische Republik (gem. Projekte + Publikationen)  
VTT Finnland (gem. Projekte + Publikationen)  
PennState University, USA (gem. Projekte + Publikationen)

#### **Thermofluiddynamik**

Forschungszentrum Karlsruhe (gem. Projekte + Publikationen)  
TU Bergakademie Freiberg (SFB 609 + gem. Publikationen)  
TU Dresden (SFB 609 + gem. Publikationen)  
Astrophysikalisches Institut Potsdam (gem. Projekte + Publikationen)  
ANSYS-CFX, Germany (gem. Projekte + Publikationen)  
TU München, Lehrstuhl für Thermodynamik (gem. Projekt)  
Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (gem. Projekte + Publikationen)  
AREVA NP, Erlangen, Paris (Kooperationsrahmenvertrag, Förderung von Nachwuchswissenschaftlern)  
Commissariat à l'Énergie Atomique, Frankreich (gem. Projekte + Publikationen)  
Electricité de France, Frankreich (gem. Projekte + Publikationen)  
Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire(IRSN), Frankreich (gem. Projekte + Publikationen)  
Purdue University, West Lafayette, USA ( gem. Publikation)  
Paul Scherrer-Institut (PSI), Villigen, Schweiz (gem. Projekte + Publikationen)  
ETH Zürich, Professur für Kernenergiesysteme, Schweiz (gem. Projekte + Publikationen)  
University of Nottingham, UK (gem. Publikationen)  
University of Trondheim, Norwegen (gem. Publikationen )  
Institute of Physics Riga, Lettland (gem. Projekte + Publikationen)  
Idaho National Laboratory(INL), Idaho Falls, USA (gem. Publikationen)  
Rensselaer Polytechnic Institute (Rensselaer), Troy, NY, USA (gem. Publikationen )

VTT Finland (gem. Projekte + Publikationen)  
 Atomic Energy of Canada Ltd. (gem. Projekte)

**Statistische Angaben**

<b>Mitarbeiter (Planstellen)</b>			
Gesamt	89,8	Wissenschaftler	34,7
<b>Annexpersonal (Personenjahreskapazität)*</b>			
Postdoc	1,1	Doktoranden**	8,4
Gastwissenschaftler	0,8		
<b>Drittmittelfinanziertes Personal (Personenjahreskapazität)*</b>			
Wissenschaftler	33,1	Technisches Personal	7,2
Doktoranden	5,9	Gastwissenschaftler	5,6

\* Personenjahre mit Berücksichtigung der VZÄ (Personenjahreskapazität)  
 \*\* Doktoranden werden mit 0,5 Stellen berücksichtigt.