

**KIT**  
**Universität des Landes Baden-Württemberg**  
**und**  
**nationales Forschungszentrum**  
**in der Helmholtz-Gemeinschaft**

**PTE-N Nr. 6**

BMBF geförderte FuE zu  
„Nukleare Sicherheitsforschung“

Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2012

Projektträger Karlsruhe  
Wassertechnologie und Entsorgung  
PTKA-WTE

**Mai 2013**

## **PTE-Berichte**

Der Projektträger Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) informiert mit Fortschrittsberichten über den aktuellen Stand der von ihm administrativ und fachlich betreuten FuE.

Die Fortschrittsberichtsreihen behandeln folgende Themenschwerpunkte:

- Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen  
(PTE Nr. x seit 1991, fortlaufend)
- Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen  
(PTE-S Nr. x seit 2001, fortlaufend)
- Nukleare Sicherheitsforschung  
(PTE-N Nr. x seit 2010, fortlaufend)

Die Fortschrittsberichtsreihen sind online verfügbar:

[www.ptka.kit.edu/wte/287.php](http://www.ptka.kit.edu/wte/287.php)

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren bzw. die entsprechenden Forschungsstellen. Das KIT übernimmt keine Gewähr insbesondere für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

## Vorwort

Das KIT betreut im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) Referat 722 als Projektträger FuE-Vorhaben auf dem Gebiet „Nukleare Sicherheitsforschung“.

Die „Nukleare Sicherheitsforschung“ ist einer der Förderschwerpunkte des BMBF-Förderkonzeptes „Grundlagenforschung Energie 2020+“ und umfasst FuE-Aktivitäten zu den Themenbereichen Sicherheitsforschung für Kernreaktoren, Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung und Strahlenforschung.

Jeder Fortschrittsbericht stellt eine Sammlung von Einzelberichten über Zielsetzung, durchgeführte Arbeiten, erzielte Ergebnisse, geplante Weiterarbeiten etc. dar, die von den Forschungsstellen selbst als Dokumentation ihres Arbeitsfortschritts in einheitlicher Form erstellt werden.

Der Fortschrittsbericht wird vom Projektträger *halbjährlich* herausgegeben, um alle Beteiligten aktuell über die durchgeführten Arbeiten zu informieren.

Dem Bericht liegt folgendes Gliederungsprinzip zugrunde:

- Im Teil 1 sind die FuE-Vorhaben dem jeweiligen Themenbereich zugeordnet.
- Im Teil 2, dem Hauptteil, sind die „formalisierten Zwischenberichte“ der FuE-Vorhaben, geordnet nach Themenbereichen, aufgeführt.
- Im Teil 3 sind die ausführenden Forschungsstellen alphabetisch aufgelistet.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen.....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Sicherheitsforschung für Kernreaktoren .....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung .....</i>	<i>5</i>
1.3	<i>Strahlenforschung .....</i>	<i>9</i>
<b>2</b>	<b>Formalisierte Zwischenberichte .....</b>	<b>15</b>
2.1	Sicherheitsforschung für Kernreaktoren .....	15
2.2	Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung.....	77
2.3	Strahlenforschung.....	133
<b>3</b>	<b>Verzeichnis der ausführenden Forschungsstellen.....</b>	<b>223</b>



# 1 Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen

## 1.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

<b>02 NUK 009A</b>	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren; TP: Strukturmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen	<b>Materialprüfanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut</b>	📖 16
<b>02 NUK 009B</b>	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren; TP: Strömungsmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen	<b>Universität Stuttgart</b>	📖 18
<b>02 NUK 009C</b>	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Thermische Ermüdung in Kraftwerkkomponenten - Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen; TP: Lebensdauerbewertung mit atomistischen und schädigungsmechanischen Werkstoffmodellen	<b>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG)</b>	📖 20
<b>02 NUK 009D</b>	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: TP: Numerische Simulation und experimentelle Charakterisierung des Ermüdungsrisswachstums unter thermozyklischer Beanspruchung	<b>TU Darmstadt</b>	📖 22
<b>02 NUK 009E</b>	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Thermische Ermüdung in Kraftwerkkomponenten; TP: Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen, Lebensdauerbewertung mit mikromechanischen Werkstoffmodellen	<b>Materialprüfanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut</b>	📖 24
<b>02 NUK 010A</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Entwicklung von CFD-Modellen für Wandsieden und Aufbau eines Bündeltests mit hochauflösender, schneller Röntgentomographie	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 26
<b>02 NUK 010B</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Turbulenz und Blasendynamik	<b>TU Dresden</b>	📖 28
<b>02 NUK 010C</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen mit optischen Verfahren und Parameterbestimmung für CFD-Rechnungen an kleinskaligen Versuchsständen	<b>Hochschule Zittau/ Görlitz</b>	📖 30

<b>02 NUK 010D</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Übertragung der CFD-Wandsiedemodelle zur Anwendung in Lumped Parameter-Codes zur Beurteilung der RDB-Außenkühlung	<b>Ruhr-Universität Bochum</b>	📖 32
<b>02 NUK 010E</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Einfluss von Turbulenz und Sekundärströmungen auf das unterkühlte Strömungssieden in reaktortypischen Konfigurationen	<b>TU München</b>	📖 34
<b>02 NUK 010F</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Valisierung von Unterkanal- und CFD-Programmen anhand von Brennstab-Bündelversuchen	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 36
<b>02 NUK 010G</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: CFD-Modellentwicklung und Validierung für die 3-dimensionale Simulation von Siedevorgängen in Brennelementen von DWR	<b>ANSYS GmbH Germany</b>	📖 38
<b>02 NUK 010H</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge	<b>TU Dresden</b>	📖 40
<b>02 NUK 010I</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Darstellung von Siedevorgängen mittels PIV und Optischer-Kohärenz-Tomographie	<b>TU Dresden</b>	📖 42
<b>02 NUK 011A</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A	<b>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG)</b>	📖 44
<b>02 NUK 011B</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B	<b>TÜV NORD SysTec GmbH &amp; Co KG, Hamburg</b>	📖 46
<b>02 NUK 011C</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C	<b>TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München</b>	📖 48
<b>02 NUK 011D</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D	<b>Technische Universität Hamburg-Harburg</b>	📖 50
<b>02 NUK 011E</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E	<b>TU München</b>	📖 52

<b>02 NUK 018A</b>	Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt A: Einsatz von Soft Computing-Methoden für die Kernzustandsdiagnose	<b>Hochschule Zittau/Görlitz</b>	📖 54
<b>02 NUK 018B</b>	Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt B: Berechnung von Gammastrahlungsfeldern des Reaktorkerns zur nichtinvasiven Zustandsüberwachung	<b>TU Dresden</b>	📖 56
<b>02 NUK 022A</b>	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie	<b>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen</b>	📖 58
<b>02 NUK 022B</b>	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt B: Extinktionsspektrometer zur Feuchtemessung in gemischtphasigen Systemen für die nukleare Sicherheitsforschung	<b>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., München</b>	📖 60
<b>02 NUK 022C</b>	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt C: Entwicklung eines effizienten Auswertalgorithmus zur Mie-Inversion	<b>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen</b>	📖 62
<b>02 NUK 022D</b>	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer	<b>TU Darmstadt</b>	📖 64
<b>02 NUK 023A</b>	Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt A: Untersuchung der Wirbelbildung in Pumpenzulaufbecken und der Auswirkung von Gasmitriss auf nachfolgende Anlagenkomponenten	<b>TU Hamburg-Harburg</b>	📖 66
<b>02 NUK 023B</b>	Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt B: Untersuchung von Zweiphasenströmungen in einer Kreiselpumpe und in Armaturen mittels tomographischer Bildgebungsverfahren	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 68

- 02 NUK 023C** Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt C: Analytische Untersuchungen der Wirbelbildung in Pumpeneinläufen **TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Hamburg**  70
- 02 NUK 023D** Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt D: Experimentelle Qualifizierung von Armaturen unter Normal- und Störfallbedingungen zur Entwicklung verifizierter Methoden **KSB Aktiengesellschaft, Frankenthal (Pfalz)**  72
- 02 NUK 111F** Kooperationsprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer **Universität der Bundeswehr München, Neubiberg**  74

## 1.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung

<b>02 NUK 012D</b>	Verbundprojekt Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Abtrennung langlebiger Radionuklide (Partitioning); TP: Spektroskopische Untersuchungen zur Stabilität und Koordination von Aktinidkomplexen mit ausgewählten Extraktionsliganden	<b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>	📖 78
<b>02 NUK 013A</b>	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 80
<b>02 NUK 013B</b>	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden	<b>TU Dresden</b>	📖 82
<b>02 NUK 013D</b>	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Gamma-Imaging mit hochsegmentierten Germaniumdetektoren	<b>Universität zu Köln</b>	📖 84
<b>02 NUK 013E</b>	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Herstellung und Nutzung von Aktinidentargets	<b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz</b>	📖 86
<b>02 NUK 013F</b>	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Ultrasensitive Nachweismethoden für Radionuklide	<b>TU München</b>	📖 88
<b>02 NUK 014A</b>	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	<b>TU Dresden</b>	📖 90
<b>02 NUK 014B</b>	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 92
<b>02 NUK 014C</b>	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	<b>Universität Leipzig</b>	📖 94

<b>02 NUK 019A</b>	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A	<b>Sondervermögen Großforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 96
<b>02 NUK 019B</b>	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B	<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 98
<b>02 NUK 019C</b>	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>	📖 100
<b>02 NUK 019D</b>	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 102
<b>02 NUK 019E</b>	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E	<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main</b>	📖 104
<b>02 NUK 020A</b>	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A	<b>Sondervermögen Großforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 106
<b>02 NUK 020B</b>	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B	<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 108
<b>02 NUK 020C</b>	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C	<b>Friedrich-Alexander- Universität Erlan- gen-Nürnberg</b>	📖 110
<b>02 NUK 020D</b>	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D	<b>Ruprecht-Karls- Universität Heidel- berg</b>	📖 112
<b>02 NUK 020E</b>	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>	📖 114
<b>02 NUK 021A</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>	📖 116
<b>02 NUK 021B</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 118

<b>02 NUK 021C</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C	<b>Sondervermögen Großforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 120
<b>02 NUK 021D</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D	<b>Rheinisch- Westfälische Techni- sche Hochschule Aachen</b>	📖 122
<b>02 NUK 021E</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E	<b>Rheinisch- Westfälische Techni- sche Hochschule Aachen</b>	📖 124
<b>02 NUK 021F</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F	<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main</b>	📖 126
<b>02 NUK 021G</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G	<b>Leibniz Universität Hannover</b>	📖 128
<b>02 NUK 033</b>	TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte	<b>Physikalisch- Technische Bundes- anstalt (PTB), Braunschweig</b>	📖 130



### 1.3 Strahlenforschung

- |                    |   |   |       |
|--------------------|---|---|-------|
| <b>02 NUK 001A</b> | Verbundprojekt: DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden: Dynamik der Reparaturfaktoren an lokalisierten Schäden   | <b>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt</b>  | 📖 134 |
| <b>02 NUK 001B</b> | Verbundprojekt: DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden: Untersuchungen über Backup Mechanismen der DSB Reparatur | <b>Universität Duisburg-Essen, Universitätsklinikum Essen</b>   | 📖 136 |
| <b>02 NUK 001C</b> | Verbundprojekt: DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden: Mechanismen an komplexen Läsionen                        | <b>TU Darmstadt</b>   | 📖 138 |
| <b>02 NUK 002F</b> | Verbundprojekt: Strahlung und Umwelt: Ausbreitungspfade von Radionukliden in Luft, Wasser, Boden; TP: Wechselwirkung von Uran(VI) mit Biofilmen   | <b>TU Dresden</b>   | 📖 140 |
| <b>02 NUK 003A</b> | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; Teilprojekt: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese    | <b>Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg</b>  | 📖 142 |
| <b>02 NUK 003B</b> | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; Teilprojekt: Alterungskorrelierte Prozesse der UVA-induzierten Hautkarzinogenese                   | <b>Universitätsklinikum Ulm</b>   | 📖 144 |
| <b>02 NUK 003C</b> | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; Teilprojekt: Mitochondriale Schäden  | <b>IUF – Leibniz-Institut für Umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</b> | 📖 146 |
| <b>02 NUK 003D</b> | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; Teilprojekt: Epigenetische Veränderungen, Schadensinduktion, Prozessierung und Reparatur           | <b>Elbe Kliniken Stade-Buxtehude, Stade</b>   | 📖 148 |
| <b>02 NUK 005A</b> | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität  | <b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>  | 📖 150 |

- |                    |  |  |       |
|--------------------|--|--|-------|
| <b>02 NUK 005C</b> | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität; TP: ATM/ATR Signaltransduktionswege und Strahlenempfindlichkeit in Normal- und Tumor-Zellen  | <b>Universität Duisburg-Essen, Universitätsklinikum Essen</b>  | 📖 152 |
| <b>02 NUK 005D</b> | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz zur Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit  | <b>Universität Rostock</b>   | 📖 154 |
| <b>02 NUK 007E</b> | Verbundprojekt Individuelle Strahlenempfindlichkeit und genomische Instabilität: Einfluss von Rb1 Gen-Variationen auf die Ausbildung akuter Nebenwirkungen und auf das Auftreten bösartiger Strahlenschäden nach den bei einer konventionellen Strahlentherapie angewendeten Gamma-Dosen | <b>TU München</b>  | 📖 156 |
| <b>02 NUK 008A</b> | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Physikalisch-technische Optimierung und Quantifizierung von CT-Systemen   | <b>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Oberschleißheim</b> | 📖 158 |
| <b>02 NUK 008D</b> | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Reduktion der Strahlenexposition von Patienten auf dem Gebiet der CT-Angiographie, der Abdomen-CT und der Dual Source CT                                  | <b>Charité - Universitätsmedizin Berlin</b>  | 📖 160 |
| <b>02 NUK 008E</b> | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Individuelle Dosisbestimmung und Berechnung   | <b>Carl von Ossietzky Universität Oldenburg</b>  | 📖 162 |
| <b>02 NUK 008F</b> | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Strahlenhygienische Bewertung und Optimierung diagnostischer und therapeutischer Verfahren in der Medizin   | <b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>   | 📖 164 |
| <b>02 NUK 008G</b> | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen - Reduktion der durch computertomographische Untersuchungen hervorgerufenen Strahlenexposition   | <b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>   | 📖 166 |
| <b>02 NUK 015A</b> | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A   | <b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>                             | 📖 168 |
| <b>02 NUK 015B</b> | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B   | <b>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Oberschleißheim</b> | 📖 170 |

<b>02 NUK 015C</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt C	<b>Friedrich-Schiller-Universität Jena</b>	📖 172
<b>02 NUK 015D</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt D	<b>Leibniz Universität Hannover</b>	📖 174
<b>02 NUK 015E</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>	📖 176
<b>02 NUK 015F</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt F	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf</b>	📖 178
<b>02 NUK 015G</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G	<b>Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Dresden</b>	📖 180
<b>02 NUK 015H</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H	<b>Universität Bremen</b>	📖 182
<b>02 NUK 016A</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt A	<b>Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz</b>	📖 184
<b>02 NUK 016B</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B	<b>Klinikum der Universität München</b>	📖 186
<b>02 NUK 016CX</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C	<b>BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung GmbH, Bremen</b>	📖 188
<b>02 NUK 016D</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D	<b>TU Darmstadt</b>	📖 190
<b>02 NUK 017A</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt A	<b>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt</b>	📖 192
<b>02 NUK 017B</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt B	<b>TU Darmstadt</b>	📖 194
<b>02 NUK 017C</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt C	<b>TU Darmstadt</b>	📖 196

<b>02 NUK 017D</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt D	<b>TU Darmstadt</b>	📖 198
<b>02 NUK 017E</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt E	<b>TU Darmstadt</b>	📖 200
<b>02 NUK 017F</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt F	<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main</b>	📖 202
<b>02 NUK 017G</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt G	<b>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</b>	📖 204
<b>02 NUK 024A</b>	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1	<b>Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter</b>	📖 206
<b>02 NUK 024B</b>	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2	<b>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg</b>	📖 208
<b>02 NUK 024C</b>	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3	<b>Klinikum der Universität München</b>	📖 210
<b>02 NUK 024D</b>	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4	<b>Universitätsklinikum Essen</b>	📖 212
<b>02 NUK 024E</b>	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5	<b>Charité - Universitätsmedizin Berlin</b>	📖 214

- 02 NUK 025A** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1 **GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt**  216
- 02 NUK 025B** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2 **Universität Konstanz**  218
- 02 NUK 025C** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 3 **Hochschule für angewandte Wissenschaften - Fachhochschule Aschaffenburg**  220



## **2 Formalisierte Zwischenberichte**

### **2.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Materialprüfanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 009A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren; TP: Strukturmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.189.390,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dipl.-Ing. Schuler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt ist Teil von 3 Verbundprojekten im übergeordneten BMBF-Verbundvorhaben „Grundlagen des System-, Ausström- und Werkstoffverhaltens von Rohrleitungen bei thermischer Wechselbeanspruchung“, welches im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung als Gesamtziel die Weiterentwicklung und Verbesserung von Simulationsmethoden zur sicherheitstechnischen Bewertung kerntechnischer Komponenten beinhaltet. Unter Berücksichtigung mehrere Längenskalen sollen zum einen Grundlagenuntersuchungen zur gekoppelten Simulation des Strömungs- und Strukturverhaltens unter Anwendung von CFD-Berechnungsverfahren durchgeführt werden, zum anderen mit atomistischen und mikromechanischen Simulationsmethoden werkstoffmechanische Modelle für die Beschreibung der Schädigungsentwicklung eines Werkstoffs unter thermo-mechanischer Belastung entwickelt werden.

Vor diesem Hintergrund befasst sich das Verbundprojekt des IKE und der Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart mit experimentellen und numerischen Untersuchungen von LWR-spezifischen Rohrleitungselementen zur gekoppelten, dreidimensionalen numerischen Modellierung und Simulation der Strömung-Struktur-Wechselwirkung von thermischen Schichtenströmungen (Kaltwassereinspeisung in heißen Kühlmittelhauptstrom in T-förmiger Rohrverzweigung) und Leckströmungen (Ausströmung und Rissöffnung kleiner Lecks) sowie mit der Validierung der Modelle anhand von Experimenten in einer Versuchsanlage (Kreislauf) unter realitätsnahen Bedingungen (75 bar, 280 °C). Das IKE-Teilprojekt behandelt die messtechnische Erfassung der Strömungsvorgänge im Versuchskreislauf sowie die strömungsmechanische Modellierung (Thermofluidynamik) mit entsprechenden Simulationsrechnungen, das MPA-Teilprojekt (FKZ: 02NUK009A) umfasst den Aufbau der Versuchsanlage, die messtechnische Erfassung der Strukturbelastungen und die strukturmechanische (Werkstoff/Strukturmechanik) Modellierung mit entsprechenden Simulationsrechnungen. Gemeinsam werden gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen durchgeführt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- P.1: Planung Versuchsanlage, im Einzelnen: Anlagenauslegung (P.1.1), Konzeption Messstrecke thermische Vermischung (P.1.2), Konzeption Messstrecke Testleck / Riss (P.1.3).
- P.2: Aufbau Versuchsanlage, im Einzelnen: Beschaffung Komponenten (P.2.1), Einzelanfertigung von Spezialteilen (P.2.2), Aufbau / Abnahme / Inbetriebnahme (P.2.3).
- P.3: Implementierung Messtechnik, im Einzelnen: Messtechnik für Kreislaufsteuerung (P.3.1), Messtechnik für Strömungsuntersuchung (P.3.2), Messtechnik für Strukturuntersuchungen (P.3.3), Installation Messtechnik an Versuchsanlage / Tests (P.3.4).

- P.4: Theorie / Simulation, im Einzelnen: Strömungssimulation thermische Vermischung (P.4.1), Struktursimulation thermische Vermischung (P.4.2), Strömungssimulation Testleck / Riss (P.4.3), Struktursimulation Testleck / Riss (P.4.4), Gekoppelte Simulation Strömung / Struktur (P.4.5), Vergleich mit Messungen / Interpretation (P.4.6).
- P.5: Messungen, im Einzelnen: Thermische Vermischung (P.5.1), Strömung Testleck / Riss (P.5.2).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- P.1.1: Die Arbeiten zur Anlagenauslegung sind abgeschlossen.
- P.1.3: Zur Konzeption Messstrecke Testleck / Riss wurden Abschätzungen durchgeführt.
- P.2.1: Die Arbeiten zur Beschaffung von Komponenten sind abgeschlossen.
- P.2.2: Die Arbeiten zur Beschaffung und Einzelanfertigung von Spezialteilen sind abgeschlossen.
- P.2.3: Aufbau und Abnahme des Versuchskreislaufs in der Versuchshalle der MPA ist abgeschlossen.
- P.3.1: Applikation und Erprobung der Messtechnik (Thermoelemente, Druckaufnehmer) für die Kreislaufsteuerung ist abgeschlossen.
- P.3.4: Applikation von Thermoelementen in der Wand des T-Abzweigs ist abgeschlossen.
- P.4.2: Berechnungen zur Simulation des Gesamtverhaltens im quasi-stationären Zustand sind abgeschlossen.
- P.4.4: Literaturdurchsicht zum Ausströmen aus einem Rohrleitungsleck wurde weitergeführt.
- P.4.5: Gekoppelte Berechnung Fluid-Struktur für Volumenstrom im Hauptstrang mit 0,4 l/s bei 280 °C und Volumenstrom im Nebenstrang mit 0,1 l/s bei 20 °C und einem Innendruck von 75 bar unter Berücksichtigung der gesamten Struktur des Kreislaufs.
- P.4.6: Vergleich und Bewertung der Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Daten wurde fortgeführt.
- P.5.1: Versuche zur Belastung der Rohrleitungsstruktur infolge thermischer Vermischungsvorgänge (T-Abzweig) sind abgeschlossen.
- P.5.2: Keine Arbeiten im Berichtszeitraum.
- P.6: Die Erstellung des Berichtsentwurfs wurde weitergeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Entsprechend der Arbeitsplanung wurde das Vorhaben zum 31.12.2012 abgeschlossen.  
Zu P.6: Fertigstellung des Abschlussberichts.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Schuler X., K.-H. Herter, H. Huber, S. Moogk, E. Laurien, D. Klören, R. Kulenovic, M. Kuschevski, Thermal fatigue: Fluid-structure interaction at thermal mixing events, 38th MPA-Seminar, October 1 and 2, 2012, MPA Universität Stuttgart

Herter K.-H., H. Huber, S. Moogk, Thermische Ermüdung - Grundlagen des System-, Ausström- und Werkstoffverhaltens von Rohrleitungen bei thermischer Wechselbelastung, Poster Präsentation, KTG-Fachtagung „Thermo- und Fluidodynamik“, HZDR, 11.-12. Oktober 2012, Dresden-Rossendorf

Moogk, S., Simulation of temperature and stress fields in a piping system being exposed to thermal loading, Workshop on Modeling and Experimentation of Mixing Phenomena in T-Junctions, Institut für Energietechnik (IET), Labor für Kernenergiesysteme, ETH-Zürich, 2012, Zürich, CH

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 009B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren; TP: Strömungsmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.383.637,20 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. Kulenovic	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt ist Teil von 3 Verbundprojekten im BMBF-Verbundvorhaben „Grundlagen des System-, Ausström- und Werkstoffverhaltens von Rohrleitungen bei thermischer Wechselbeanspruchung“. Das Gesamtziel ist die Weiterentwicklung und Verbesserung von Simulationsmethoden zur sicherheitstechnischen Bewertung von Leichtwasserreaktor(LWR)-Komponenten im Rahmen der Reaktorsicherheitsforschung. Hierzu sollen unter Berücksichtigung mehrere Längenskalen Grundlagenuntersuchungen zur gekoppelten Simulation des Strömungs- und Strukturverhaltens unter Anwendung von CFD-Berechnungsverfahren durchgeführt sowie mit atomistischen und mikromechanischen Simulationsmethoden werkstoffmechanische Modelle für die Beschreibung der Schädigungsentwicklung eines Werkstoffs unter thermo-mechanischer Belastung entwickelt werden. Das Verbundprojekt der Projektpartner IKE und MPA (Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart) befasst sich mit der Bereitstellung einer validierten numerischen Analyse- und Vorhersagemethode für das gekoppelte Strömungs- und Strukturverhalten von LWR-typischen Rohrleitungselementen. Das IKE behandelt die strömungsmechanische (Thermofluidodynamik), die MPA die strukturmechanische (Werkstoff/ Strukturmechanik) Modellierung. Zuerst werden thermische Vermischungsvorgänge oder Schichtenströmung in einer typischen T-förmigen Rohrverzweigung (Kaltwassereinspeisung in heißen Kühlmittelhauptstrom), danach Ausströmvorgänge und Rissöffnung kleiner Lecks untersucht. In beiden Fällen bestimmt die Interaktion zwischen Fluid und Rohr-Struktur maßgeblich die Bauteilbeanspruchung und resultierende Werkstoffermüdung. In diesem Kontext ist die Überprüfung der verwendeten numerischen Modelle (Validierung) anhand von Vergleichen mit experimentellen Daten zwingend erforderlich. Diese Validierungsdaten sollen durch eine im Vorhabensrahmen zu errichtende Versuchsanlage bereitgestellt werden, in der LWR-spezifische Rohrleitungselemente realitätsnahen thermischen und strömungsmechanischen Bedingungen (Temperatur 280 °C, Druck ca. 75 bar) ausgesetzt werden können.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- P1: Planung Versuchsanlage, i. E.: Anlagenauslegung (P.1.1), Konzeption Messstrecke thermische Vermischung (P.1.2), Konzeption Messstrecke Testleck / Riss (P.1.3).
- P2: Aufbau Versuchsanlage, i. E.: Beschaffung Komponenten (P.2.1), Einzelanfertigung von Spezial-/ Sonderbauteilen (P.2.2), Aufbau / Abnahme / Inbetriebnahme (P.2.3).
- P3: Implementierung Messtechnik: Messtechnik für Kreislaufsteuerung (P.3.1), Messtechnik für Strömungsuntersuchungen (P.3.2), Messtechnik für Strukturuntersuchungen (P.3.3), Installation Messtechnik an Versuchsanlage / Tests (P.3.4).
- P4: Theorie / Simulation, i. E.: Strömungssimulation thermische Vermischung (P.4.1), Struktursimulation (P.4.2), Strömungssimulation Testleck / Riss (P.4.3), Struktursimulation Testleck / Riss (P.4.4), Gekoppelte Simulation Strömung / Struktur (P.4.5), Vergleich mit Messungen / Interpretation (P.4.6).
- P5: Messungen, i. E.: Thermische Vermischung (P.5.1), Strömung Testleck / Riss (P.5.2).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- P.1.1: Arbeiten zur Anlagenauslegung sind abgeschlossen.
- P.1.2: Arbeiten zur Konzeption Messstrecke thermische Vermischung sind abgeschlossen.

- P.1.3: Durchführung von Abschätzungen zur Konzeption Messtrecke Testleck / Riss.
- P.2.1: Beschaffung Messtechnikbauteile für Versuchsanlage ist abgeschlossen.
- P.2.2: Einzelanfertigung von Spezial-/ Sonderbauteilen für Versuchsanlage ist abgeschlossen.
- P.3.2: Arbeiten zur Messtechnik für Strömungsuntersuchungen sind abgeschlossen.
- P.3.3: Arbeiten zur Messtechnik für Strukturuntersuchungen sind abgeschlossen.
- P.3.4: Installationsarbeiten für Messtechnik an Versuchsanlage sind abgeschlossen.
- P.4.1:
- CFD-Simulationen zur Quantifizierung des TE-Ansprechverhaltens bei Strömungstemperaturmessungen (Diplomarbeit).
  - Durchführung von 2 weiteren LES (Fall 1: Einlaufemperaturdifferenz  $\Delta T=30$  K, Einlaufmassenströme 0,4 kg/s / 0,1 kg/s im Haupt-/Nebenstrang; Fall 2:  $\Delta T=130$  K, 0,6 kg/s / 0,1 kg/s) mit jeweils adiabater Innenwand (Vorrechnung) und thermisch gekoppelter Randbedingung. Im Fallvergleich bei  $\Delta T=30$  K wesentlich stärkere Strömungsinstabilitäten im vorderen Vermischungsbereich der Einströmung des kalten Fluids in den Hauptstrang, zudem für horizontale T-Stückströmung typische, geschichtete Wellenstruktur wesentlich ausgedehnter. Für  $\Delta T=130$  K Vorliegen einer kleinen Rezirkulationszone mit heißem Fluid im Nebenstrang und durch erhöhten Massenstrom Unterbindung stromaufwärts gerichteter Rezirkulation von kaltem Fluid in den heißen Hauptstrang. Dies ist konsistent mit experimentellen Beobachtungen.
  - Untersuchungen zu Skalierungseigenschaften für parallelisierte Rechnungen anhand grober bzw. feiner Gitterdiskretisierung (Rechenzeiteffizienz Parallelisierung).
- P.4.2: Comsol-Simulationen zur Beurteilung des TE-Ansprechverhaltens für Temperaturmessungen in der Struktur (Diplomarbeit).
- P.4.3: Weiterführung Literaturdurchsicht zum Ausströmen an einem Rohrleitungsleck.
- P.4.5: Bereitstellung LES-Daten ( $\Delta T=130$  K, 0,6 kg/s / 0,1 kg/s im Haupt-/Nebenstrang) für weitere gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationsrechnung.
- P.4.6: Vergleich der Comsol-Simulationen (TE-Ansprechverhalten) mit Experimenten in einem TE-Versuchsaufbau, an dem ein Temperatursprung erzeugt und mittels eines Hochgeschwindigkeitsdatenerfassungssystems die Sprungantwort unterschiedlicher TE-Typen erfasst wurde.
- P.5.1: Einsatz der Nahwand LED-induzierten Fluoreszenz-Messmethode (NWLED-IF) am großen optischen Modul unter Verwendung einer mit Fluoreszenzfarbstoff beschichteten Stahlplatte in Ergänzung zu den Untersuchungen mit einem beschichteten Stahlrohr. Vermessung der Lichtstrahlablenkung aufgrund der inhomogenen Temperaturfelder im optischen Modul und T-Stück-Einlauf.  
Vermessung der Geschwindigkeitsprofile in den Einläufen des T-Stücks unter Verwendung der beiden optischen Module (DN40 und DN80) und der PIV-Messtechnik für unterschiedliche Massenstromverhältnisse und Temperaturbereiche. Applikation der Hochgeschwindigkeits-PIV zur Bestimmung von Geschwindigkeitsdichtespektren in den Einläufen des T-Stücks.
- P.5.2: Im Berichtszeitraum keine Arbeiten.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- P.1.1 bis P4.1: Keine, Arbeiten sind abgeschlossen.
- P.4.3: Entsprechend der Arbeitsplanung Arbeiten zum Vorhabensende (31.12.2012) beendet.
- P.4.5: Abschließende Auswertung der Ergebnisse gekoppelter Strömungs-Struktur-Simulationsrechnungen.
- P.4.6: Abschließender Vergleich und Bewertung der Simulationsergebnisse mit gemessenen Daten.
- P.5.1: Keine, Arbeiten sind abgeschlossen.
- P.6: Erstellung Abschlussbericht zum Vorhaben.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Kuschewski M., Laurien E.: „Entwicklung von Messtechnik zur Untersuchung von Strömungs-Struktur-Interaktionen in Rohrleitungssystemen unter LWR-Bedingungen“, Internationale Zeitschrift für Kernenergie atw, 57. Jg., August/September 2012.

Schuler X., Herter K.-H., Moogk S., Laurien E., Klören D., Kulenovic R., Kuschewski M.: „Thermal fatigue: Fluid-structure interaction at thermal mixing events“, 38th MPA-Seminar, Stuttgart, Germany, 01-02 Oct., 2012.

Klören D., Laurien E.: "Large-Eddy Simulations of Stratified and Non-Stratified T-junction Mixing Flows", The 15th Results and Review Workshop of the HLRS, Stuttgart, Germany, 10-11 Oct., 2012.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (FhG), Hansastr. 27c, 80686 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 009C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Thermische Ermüdung in Kraftwerk-komponenten - Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen; TP: Lebensdauerbewertung mit atomistischen und schädigungsmechanischen Werkstoffmodel-len		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 860.294,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. Siegele	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht in der Weiterentwicklung und experimentellen Validierung von Werkstoffmodellen und Methoden zur Beschreibung der Schädigungsentwicklung und der Lebensdauerbewertung unter thermischer Wechselbeanspruchung.

Hierzu sollen die Mechanismen, die zur Schädigung kerntechnischer Komponenten unter thermischer Ermüdung führen können, durch experimentelle und numerische Analysen auf mehreren Längenskalen untersucht sowie entsprechende werkstoffmechanisch basierte Modellen zur Lebensdauerbewertung weiterentwickelt werden.

Das Vorhaben ist Teil des Verbundvorhabens „Grundlagen des System-, Ausström- und Werkstoffverhaltens von Rohrleitungen bei thermischer Wechselbeanspruchung“.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Entwicklung einer Prüfvorrichtung für komplexe thermomechanische Beanspruchung unter definierten Temperaturspektren,
- Versuche unter thermischer und mechanischer Wechselbelastung mit konstanter Amplitude und für definierte Lastspektren,
- Mikroskopische Untersuchungen zur Schädigungsentwicklung,
- Atomistische Simulationen zur Untersuchung der Auswirkungen von Korngrenzen, Versetzungen und Mikrorissen auf die mikrostrukturellen und makroskopischen mechanischen Eigenschaften,
- Weiterentwicklung von makroskopischen Werkstoffmodellen im Hinblick auf HCF-Belastung und variablen Amplituden,
- Weiterentwicklung von klassischen spannungs-, dehnungs- sowie Energie-basierten Ermüdungsmodellen zur Beschreibung thermo-mechanischer Ermüdungsvorgänge

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Auf der experimentellen Seite wurden weitere Versuche unter thermischer Ermüdung (TF) durchgeführt. Mikroskopische Untersuchungen der Oberflächen der geprüften Proben zeigen im angesprützten Bereich je nach Versuchsbedingungen Rissnetzwerke, separierte Risse, beginnende Schädigung (Gleitlinien, Extrusionen, beginnende Risse) oder keine Anzeichen von Ermüdung. Sind Risse vorhanden, so sind sie senkrecht zur Probenachse orientiert. In der Regel treten Mehrfachrisse auf, die sich axial über den gesamten durch Ansprühen mit kaltem Wasser thermisch beanspruchten Bereich verteilen und in Umfangsrichtung spätestens außerhalb dieses Bereichs stoppen. In Längsschliffen durch die Mitte des thermisch beanspruchten Bereichs wurde die Verteilung der Risse und ihre Tiefe gemessen. Die tiefsten Risse wurden bei Temperaturdifferenzen von 300 °C bei 0,5 Hz beobachtet: Hier wurden nach 300.000 Zyklen mehrere Risse mit Tiefen um 1 mm beobachtet. Die Versuchsbedingungen (100 °C, 0,5 Hz, 200.000 Zyklen) und (150 °C, 0,5 Hz, 300.000 Zyklen) führten dagegen zu keiner auf der Oberfläche oder im Längsschliff beobachtbaren Schädigung. Bei Temperaturdifferenzen von 200 °C oder höher erkennt man dagegen nach mindestens 50.000 Zyklen eine beginnende Schädigung oder Risse. Insgesamt nimmt die Schädigung mit Zunahme der Temperaturdifferenz und Abnahme der Belastungsfrequenz zu.

Zum Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Voraussagen der Lebensdauermodelle für die TF-Versuche wurden für jeden Satz von Versuchsparametern die thermischen Randbedingungen (Wärmeübergangskoeffizienten) eines FE-Modells der Probe an die Daten von detaillierten Temperaturmessungen angepasst und mit diesen Modellen die lokalen Beanspruchungen berechnet. Zur Beschreibung der zyklischen Wechselplastifizierung wurden Werkstoffmodelle der Chaboche-Klasse eingesetzt und die Werkstoffparameter aus LCF-Versuchen bestimmt. Die Berechnung der Lebensdauer in Form von Anrisslastwechselzahlen erfolgt mit unterschiedlichen Schädigungsmodellen mit den jeweiligen Schädigungsparametern: Dem bruchmechanisch abgeleiteten Schädigungsparameter  $D_{TMF}$  sowie aus Festigkeitshypothesen abgeleitete Schädigungsparameter, z. B. nach Smith, Watson, Topper und Fatemie, Socie.

Zur numerischen Beschreibung des makroskopischen plastischen Verhaltens in Stählen wurden die atomistischen Simulationen von Versetzungen vervollständigt. Zusätzlich zu den ausgeführten Untersuchungen von Versetzungen im kubisch raumzentrierten (krz) Eisen (Ferrit) wurden auch atomistische Strukturen und die Beweglichkeit von Versetzungen im kubisch flächenzentrierten (kfz) Eisen (Austenit) berechnet. Wegen geringer Stapelfehlerenergie spalten die Versetzungen im kfz-Gitter von Austenit in zwei Teilversetzungen auf. Infolgedessen sind die aufgespalteten Versetzungen mobiler als die Versetzungen des krz-Eisens. Die berechneten Eigenschaften der Versetzungen in den wichtigsten Eisenphasen können als Input-Daten für mesoskopische Verformungsmodelle, zum Beispiel die Discrete-Dislocation-Dynamics, verwendet werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Erstellung des Abschlussberichts.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 009D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: TP: Numerische Simulation und experimentelle Charakterisierung des Ermüdungsrisswachstums unter thermozyklischer Beanspruchung		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 696.011,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Vormwald	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der Zustand der Materialermüdung infolge einer thermomechanischen Beanspruchung in einem austenitischen Stahl für Anwendungen in der Kernenergie-technik wird durch Verfolgen des Wachstums mechanischer Risse sowohl experimentell untersucht als auch mit den Mitteln der Schwingbruchmechanik beschrieben. Dabei besteht das Ziel, die auftretenden Schädigungsmechanismen und insbesondere deren zeitliche Entwicklung besser zu verstehen und zu beschreiben. Darüber hinaus besteht das Ziel, die aktuell vorhandenen Kompetenzen im Rahmen von regelmäßig durchzuführenden Weiterbildungsmaßnahmen weiter zu geben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Von den Forschungspartnern IfW (Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde, TU Darmstadt), FGWM (Fachgebiet Werkstoffmechanik, TU Darmstadt) und AREVA (AREVA NP GmbH, Erlangen) werden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP1: Numerische Simulation des Ermüdungsrisswachstums unter thermozyklischer Beanspruchung und Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in Lebensdauerberechnungsverfahren (FGWM, AREVA)
- AP2: Weiterentwicklung von Plastizitätsmodellen zur kontinuumsmechanischen Beschreibung der zyklischen Plastizität bei transienten, thermomechanischen Beanspruchungen (AREVA, IfW)
- AP3: Validierung klassischer Ansätze zur Beschreibung der thermomechanischen Ermüdung einschließlich regelwerksbasierter Konzepte (IfW, AREVA)
- AP4: Experimentelle Bestimmung des thermozyklischen Ermüdungsverhaltens eines Werkstoffes des Primärkreislaufs (IfW)
- AP5: Organisation und Durchführung eines Weiterbildungsseminars (FGWM, IfW, AREVA)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *Forschungsstelle Fachgebiet Werkstoffmechanik*

Simulation des Ermüdungsrisswachstums mit der Methode der finiten Elemente. Detaillierte numerische Untersuchungen: Berechnung des J-Integrals bei nicht-isothermen Bedingungen mit Berücksichtigung von Rissöffnen und -schließen, Auswertung der Simulationsergebnisse. Durchführung des Seminars „TME 2012“.

#### *Forschungsstelle „Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde“*

Durchführung und Abschluss der einaxialen TMF-Versuche. Gegenüberstellung mit isothermen Ergebnissen. Durchführung der mehraxialen TMF-Versuchen und Abschluss der Serie K1. Durchführung und Abschluss der uniaxialen Versuche mit erhöhter Oberflächenrauheit. Zuordnung der aufgetretenen Effekte durch die Oberflächenrauheit. Beschreibung und vergleichende Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung metallographischer Befunde und verfügbarer aktuelle Daten anderer Forschungsstellen. Aktive Mitarbeit am TME-Seminar.

#### *Forschungsstelle „AREVA“*

Vorbereitung des Beitrages zum Materialmodell nach Ohno&Wang für den Abschlussbericht. Numerische Untersuchung des Rissöffnungs- und Risschliessverhaltens sowie Bestimmung des effektiven zyklischen J-Integrals unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses des verwendeten nichtlinear kinematischen Materialmodells (Chaboche bzw. Ohno&Wang). Aktive Beteiligung an der Durchführung des Seminars „TME 2012“.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

#### *Forschungsstelle „Fachgebiet Werkstoffmechanik“*

Verfassen des Abschlussberichtes, Abschluss der numerischen Simulationen, Ausarbeitung von Empfehlungen für die Praxis. Weiterentwicklung und Durchführung des o. g. Weiterbildungsseminars über den Projektzeitraum hinaus.

#### *Forschungsstelle „Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde“*

Abschluss der letzten verbleibenden mehraxialen TMF-Versuche. Statistische Auswertung der Gesamtheit der Versuchsergebnisse aus dem Projekt. Erstellung der Abschlussdokumente Schlussbericht und Erfolgskontrollbericht. Beteiligung am oben genannten Weiterbildungsseminar über die Projektlaufzeit hinaus.

#### *Forschungsstelle „AREVA“*

Konsolidierung des Parametersatzes für die Materialmodelle nach Chaboche und Ohno&Wang. Erstellung der zutreffenden Abschnitte des Abschlussberichtes.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Siegele, D.; Fingerhuth, J.; Mrovec, M.; Schuler, X.; Utz, S.; Fischaleck, M.; Scholz, A.; Oechsner, M.; Vormwald, M.; Bauerbach, K.; Schlitzer, T.; Rudolph, J.; Willuweit, A.: Thermal Fatigue – Materials Modeling. 38<sup>th</sup> MPA-Seminar, 1.-2. Oktober, 2012, Stuttgart

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut - Materialprüfanstalt, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 009E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Thermische Ermüdung in Kraftwerk- komponenten - Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen; TP: Lebensdauerbewertung mit mikromechanischen Werkstoffmodellen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 863.100,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dipl.-Ing. Schuler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt „Thermische Ermüdung in Kraftwerkkomponenten - Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen“ ist Teil von insgesamt 3 einzelnen Verbundprojekten, die im übergeordneten BMBF-Verbundvorhaben „Grundlagen des System-, Ausström- und Werkstoffverhaltens von Rohrleitungen bei thermischer Wechselbeanspruchung“ zusammengefasst sind.

Das vorliegende Verbundprojekt, welches in 2 Teilprojekte der Verbundprojektspartner Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) Freiburg untergliedert ist, befasst sich mit der Aufklärung der Mechanismen, die zur Schädigung kerntechnischer Komponenten unter thermischer Ermüdung führen können. Durch die Kombination experimenteller Methoden und die Simulation der Verformungs- und Schädigungsprozesse auf mehreren Längenskalen, beginnend von der atomaren Ebene über die Mikroskala (Versetzungen, Kristallplastizität) bis zur Kontinuumsmechanik, wird ein vertieftes Verständnis der für die Schädigung des Werkstoffs relevanten Mechanismen erreicht. Die Ergebnisse fließen in die Verbesserung von Werkstoffmodellen und Simulationsmethoden im Hinblick auf thermische Ermüdung ein. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens sollen die grundlegenden experimentellen und numerischen Arbeiten an einem austenitischen Rohrleitungswerkstoff im Temperaturbereich bis 350 °C durchgeführt werden, der in den derzeitigen LWR-Anlagen eingesetzt wird. Der Schwerpunkt der geplanten Untersuchungen liegt hierbei im Bereich der hochfrequenten thermisch-mechanischen Werkstoffermüdung (HCF).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das an der MPA Universität Stuttgart durchzuführende Teilprojekt gliedert sich in folgende Arbeitspakete:

### Experimentelle Arbeiten

- AP7: Entwicklung einer Prüfvorrichtung für Grundlagenuntersuchungen unter thermisch-mechanisch wechselnder Belastung im High Cycle Fatigue (HCF) Bereich
- AP8: Durchführung von thermisch-mechanischen HCF-Versuchen
- AP9: Mikrostrukturanalysen, u. a. Untersuchungen der Gefügeveränderungen (Lichtmikroskopie, REM), Analyse der Entwicklung von Versetzungsstrukturen (TEM), Messung der Eigenspannungen im Gefüge (Röntgen- / Neutronenbeugung)

### Theoretische Arbeiten

- AP10: Mikrostrukturmechanische Simulation von Eigenspannungen, d. h. Berechnung der Entwicklung von Eigenspannungen in einem Mikromodell vom Realgefüge bei zyklischer thermischer Belastung
- AP11: Untersuchungen zum Einfluss von Versetzungsstrukturen auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, u. a. kontinuumsmechanische Modellierung von Versetzungsstrukturen und Entwicklung mikromechanischer Schädigungsmodelle anhand vom „Zweiphasenmodell“ von Mughrabi
- AP12: Validierung der mikromechanischen Schädigungsmodelle anhand experimenteller Ergebnisse

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Aufgrund der unklaren Werkstoffsituation – das zur Verfügung gestellte Material (X6CrNiNb18-10) stammt aus unterschiedlichen Schmelzen bzw. Chargen, wurde als Platten- und als Stangenmaterial mit jeweils unterschiedlichen Abmessungen geliefert, wurde nicht einheitlich umgeformt, sondern teils (warm-) gewalzt bzw. geschmiedet, wurde unterschiedlich wärmebehandelt – wurde das Probenmaterial nach Rücksprache mit den Projektpartnern erneut wärmebehandelt (IfW Darmstadt).

Sowohl bei den experimentellen (AP7, AP8, AP9) als auch bei den rechnerischen (AP10, AP11, AP12) Untersuchungen ergab sich dadurch eine zeitliche Verschiebung der Arbeitspakete, da die Terminplanung an die Werkstoffbereitstellung und an die anschließend am IfW Darmstadt durchzuführende Grundcharakterisierung (LCF/HCF-Versuche) gekoppelt ist.

AP7:

Die Arbeiten sind abgeschlossen.

AP8:

Thermische Wechselversuche an Kalottenproben wurden durchgeführt. Während der Versuche wurden 3D-Verformungsanalysen (ARAMIS) und Temperaturmessungen der Oberflächentemperaturen gezielt durchgeführt und ausgewertet.

AP9:

Kontinuierliche Fortführung der Arbeiten zur Analyse thermisch ermüdeter Proben.

Vorarbeiten zu AP10, AP11 und AP12:

Die Vorarbeiten, insbesondere die erweiterte Materialmodellierung (anisotherme Belastung) auf Grundlage der vom IfW Darmstadt zur Verfügung gestellten Schwingversuchsdaten, sind abgeschlossen.

AP10, AP11 und AP12:

Entsprechend dem Untersuchungsprogramm wurden umfangreiche Vorarbeiten durchgeführt, sodass nach Vorliegen aller erforderlicher Versuchsdaten (IfW Darmstadt) mit der Implementierung in die numerischen Modelle begonnen werden konnte.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP8:

Auswertung und Dokumentation thermisch-mechanischer HCF-Versuche.

AP9:

Auswertung und Dokumentation der Arbeiten zur Analyse thermisch ermüdeter Proben.

AP10:

Auswertung und Dokumentation der Berechnungen zur mikrostrukturmechanischen Simulation von Eigen-  
spannungen.

AP11:

Auswertung und Dokumentation der Untersuchungen zum Einfluss von Versetzungsstrukturen.

AP12:

Auswertung und Dokumentation der Validierung mikromechanischer Schädigungsmodelle anhand experimenteller Ergebnisse.

Dokumentation:

Erstellung des Abschlussberichts.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Siegele D., Fingerhuth J., Mrovec M., Schuler X., Utz S., Fischaleck M., Scholz A., Oechsner M., Vormwald M., Bauerbach K., Schlitzer T., Rudolph J.: Thermal Fatigue – Materials Modelling; 38. MPA-Seminar, 1. und 2. Oktober 2012, MPA Universität Stuttgart

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Entwicklung von CFD-Modellen für Wandsieden und Aufbau eines Bündeltests mit hochauflösender, schneller Röntgentomographie		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 664.900,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Krepper	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben ist der Weiterentwicklung der CFD-Modellierung von Blasensieden bis hin zu Filmsieden gewidmet. Die mit Hilfe von ANSYS in den Code ANSYS/CFX zu implementierenden Modellansätze werden zunächst anhand durch andere Projektpartner durch zuführende kleinskalige Experimente getestet. Im Rahmen des vorliegenden Abtrages sollen im FZD ein Brennelementbündeltest an der Versuchsanlage TOPFLOW aufgebaut werden, der mit schneller Röntgentomographie ausgestattet ist.

Das Projekt wird im gemeinsamen Vorhaben mit der Technischen Universität Dresden (Professur für Wasserstoff und Kernenergie-technik TUD-WKET, Institut für Strömungsmechanik TUD-ISM und Medizinische Fakultät TUD-MF), der Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG), des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), der Ruhr-Universität Bochum (RUB), der Technischen Universität München und der Firma ANSYS bearbeitet und ist über einen Kooperationsvertrag mit den weiteren Teilvorhaben des Projektverbundes 02NUK010 verbunden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Ziele betreffen im Einzelnen:

- Literaturstudie, Auswahl der in Frage kommenden Modellansätze
- Parameterstudie und numerischer Test ihrer Eignung
- Test der durch ANSYS implementierten Modellansätze anhand kleinskaliger Experimente
- Nachrechnung von Bündeltests
- Entwicklung der schnellen Röntgentomographie
- Aufbau des Bündelversuches
- Experimentelle Untersuchungen von Siedevorgängen im Versuchsbündel
- Analyse der gewonnenen Daten durch die implementierten Modelle

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Unter Ausnutzung der Erfahrungen mit dem in CFX implementierten Siedemodell wurden Rechnungen zur Nachanalyse der HZDR-Experimente durchgeführt. Zur Justierung der Parameter Blasenablösedurchmesser und Siedekeimdichte wurde ein vereinfachter Datensatz erstellt und eine Versuchsreihe gerechnet. Darauf basierend erfolgte die Aufstellung eines Da-

tensatzes für das Bündel. Es wurden Auslegungs- und Vergleichsrechnungen zu den Experimenten mit dem gammadensitometrischen Verfahren sowie mit dem schnellen Röntgentomographischen Verfahren durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner der TU-Dresden, ISM, wurden sowohl Vergleichsrechnungen unter Verwendung des Codes CFX zu den DNS-Rechnungen blasenbeladener Strömungen als auch zu den LES-Rechnungen des BE-Kanals durchgeführt.

Es wurden weitere gammadensitometrische Messungen am beheizten Stabbündel durchgeführt, dabei unter Verwendung der bisherigen Messergebnisse Parameter variiert.

Weiterhin wurde eine Messserie am beheizten Bündel unter Einsatz der schnellen Röntgentomographie durchgeführt. Beide Messserien werden zurzeit intensiv ausgewertet.

Gemeinsam mit der Fachgruppe „Thermo- und Fluidodynamik“ der KTG und dem TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG wurde ein Fachtag organisiert und in Rossendorf mit etwa 100 Teilnehmern durchgeführt. Es wurden die wichtigsten Resultate der beiden BMBF-geförderten Verbundvorhaben „Kondensationsinduzierte Druckschläge“ sowie „Sieden in DWR“ vorgestellt.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan. Das betrifft:

- Abschluss der im Bericht angesprochenen Rechnungen
- Fertigstellung des Abschlussberichtes.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Krepper, E.; Rzehak, R.; Lifante, C.; Frank, T. 2013: „CFD for subcooled flow boiling: “Coupling wall boiling and population balance models”, Nuclear Engineering and Design, 255, 330-346

Krepper, E.; Rzehak, R.: “CFD analysis of a void distribution benchmark of the NUPEC PSBT tests - model calibration and influence of turbulence modelling”, Science and Technology of Nuclear Installations, 2012, Article ID 939561

Rzehak, R. and Krepper, E.: 2013. CFD for Subcooled Flow Boiling: Parametric Variations, Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2013, Article ID 687494

Krepper, E.; Rzehak, R.; Lifante, C.; Frank, T.: 2012. CFD model of wall boiling including a population balance model, CFD4NRS-4, Daejeon, Südkorea, Sept. 2012

Barthel, F.; Franz, R.; Krepper, E.; Hampel, U. 2012. Experimental Studies On Sub-Cooled Boiling In A 3x3 Rod Bundle, CFD4NRS-4, Daejeon, Südkorea, Sept. 2012

Rzehak, R.; Krepper, E.; Lifante, C. (2012) Comparative study of wall-force models for the simulation of bubbly flows, Nuclear Engineering and Design 253, 41-49

Rzehak, R.; Krepper, E.: “Bubble-induced Turbulence: Comparison of CFD Models”, Nuclear Engineering and Design, eingereicht

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Turbulenz und Blasendynamik		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 309.368,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Fröhlich	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Gesamtvorhabens ist die Verbesserung der CFD-Modellierung von Siedevorgängen an beheizten Oberflächen bis hin zur Siedekrise. Ziel des Teilprojekts ist die Durchführung und Analyse von Direkten Numerischen Simulationen und Large Eddy Simulation. Infolge der Geometrie im Reaktorkern sind die Strömung und das entstehende Turbulenzfeld bereits bei einphasiger Strömung sehr komplex. Daher ist zu klären, ob auf der Reynolds-Mittelung (RANS) beruhende Turbulenzmodelle für derartige Strömungen ausreichend sind oder ob Large Eddy Simulation (LES) bzw. verwandte Ansätze erforderlich werden. Die Direkt Numerischen Simulationen (DNS) sollen für die Modellierung mit Blasen beladener Strömungen notwendige Erkenntnisse liefern. Untersucht werden der Impuls-, Wärme- und Masseaustausch beim Sieden, die Blasendynamik sowie die Blasen-Blasen- und Blasen-Strömungs-Wechselwirkungen. Diese Simulationen werden für das Experiment des Partners HS Zittau-Görlitz (02NUK010C) durchgeführt und dienen der Validierung und Ergänzung der dort gewonnenen Daten. Diese Resultate wiederum bilden die Datenbasis für das FZ Dresden (02NUK010A) bei der Modellentwicklung.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

#### 2.1 Large Eddy Simulation in Rohrbündelgeometrien mit Einbauten

- LES1 Implementierung Rohrbündelgeometrie ohne Einbauten, Validierung
- LES2 Rohrbündel mit Einbauten, Analyse Turbulenzstruktur, Vergleich mit RANS
- LES3 Wärmetransport und Vermischung, Vergleich mit RANS
- LES4 Geometrieoptimierung

#### 2.2 Direkte numerische Simulation turbulenter Blasenströmungen:

- DNS1 Ebene Geometrie, Schwarm monodisperser sphärischer Blasen
- DNS2 Multidisperser Schwarm sphärischer Blasen, Modellierung
- DNS3 Nicht-sphärische Blasen
- DNS4 Phasenübergang und Evolution der Blasengröße
- DNS5 Modellierung von Koaleszenz und Zerfall
- DNS6 Variation der Einströmturbulenz
- DNS7 Simulationen in rohrbündelähnlicher Geometrie

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeitspakete DNS1 und DNS2 sind abgeschlossen. DNS4 wurde weitergetrieben und erste Vergleiche mit Resultaten der Experimentatoren (HSZG) durchgeführt. DNS3 wurde fortgeführt und wird auf Tagungen präsentiert (s. u.). Untersuchungen zu DNS5 sind weiter gelaufen. Zum Arbeitspaket

DNS1 wurde intensiv mit dem Projektpartner HZDR zusammengearbeitet, um eine gegenseitige Validierung der Resultate durchzuführen.

Das Arbeitspaket LES4 wurde abgeschlossen, während Arbeitspakete LES2 und LES3 wurden fortgeführt. Die LES-Ergebnisse wurden an Partner HZDR zum Vergleich mit RANS-Rechnungen weitergeleitet.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Pakete DNS3, DNS4 und DNS5 werden abgeschlossen.

Pakete LES2 und LES3 werden abgeschlossen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

*Folgende studentische Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes angefertigt:*

M. Donath, Studie zur Modellierung der Strömung und des Wärmeübergangs an unvollständig benetzten Brennstabbindeln in einem Lagerbecken, DA, ISM TU Dresden, 2012.

R. Schadwill, Large Eddy Simulation der turbulenten Strömung in einem T-Rohr, DA, ISM TU Dresden, 2012.

C. Froh, Implementierung und Erprobung einer Vortex-Methode für skalenauflösende Simulationen mit dem DLR-TAU Code, DA, ISM TU Dresden - DLR Göttingen, 2012.

*Folgende Konferenzbeiträge wurden präsentiert bzw. eingereicht:*

C. Santarelli, J. Fröhlich, „Simulation of spherical bubbles in turbulent vertical channel flow“, 9th European Fluid Mechanics Conference (EFMC9), 9.-13. 9 2012, Rom, Italien (präsentiert).

C. Santarelli, J. Fröhlich, „Characterization of bubble clusters in simulations of upward turbulent channel flow“, 84. Tagung der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM), 26.-31. 3 2013, Novi Sad, Serbien (als Präsentation akzeptiert, Zeitschriftveröffentlichung nach Konferenz).

C. Santarelli, J. Fröhlich, „Numerical simulation of elliptical particles in vertical turbulent channel“, 8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF), 26.-31. 13 2013, Jeju, Korea (als Präsentation akzeptiert, Proceedingsbeitrag wird bis 31.1.13 eingereicht).

E. Séverac, J. Fröhlich, "Large Eddy Simulation of the incompressible swirly flow in a subchannel of a fuel rod bundle", THMT-12 ,Palermo, Sicily, ITALY, September 24-28, 2012 (präsentiert). Proceedingsbeitrag: In Turbulence, Heat and Mass Transfer 7, K. Hanjalic, Y. Nagano, D. Borello and S. Jakirlic (Eds), Begell House Inc., Wallingford (UK), 375--378, 2012. In ICHMT DIGITAL LIBRARY ONLINE, 961-91393-0-5, Begell House Inc., Wallingford (UK), 12p, 2012.

*Folgende Zeitschriftenartikel wurden eingereicht:*

C. Santarelli, J. Fröhlich, "On the pair correlation function in a bubble swarm", KERNTECHNIK, Sonderheft 78/1, 2012.

E. Séverac, J. Fröhlich, "Large Eddy Simulation of the shear flow instability in a rod-bundle assembly", KERNTECHNIK, Sonderheft 78/1, 2012.

E. Séverac, J. Fröhlich, "Single phase Large Eddy Simulation of the flow in a subchannel of a fuel rod bundle", Int. J. of Heat and Fluid Flow - Special Issue from the 9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 2012.

*Weitere Präsentationen:*

Der Lehrstuhl organisiert den europäischen Workshop „Direct and Large Eddy Simulation 9“ ([www.dles9.org](http://www.dles9.org)), bei dem unter anderem auch die Resultate des vorliegenden Projekts vorgestellt werden. Der Projektpartner HZDR ist Mitveranstalter.

Mit den im Rahmen des Verbundprojektes erworbenen Resultaten und Kenntnissen organisiert der Lehrstuhl in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl „Strömungsmechanik in Mehrphasenströmungen“ von Prof. Schlüter der Technischen Universität Hamburg Harburg ein Minisymposium. Das Minisymposium „Simulation and modeling of bubbly flows“ findet am 18. März 2013 im Rahmen der GAMM-Fachtagung 2013 statt.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen mit optischen Verfahren und Parameterbestimmung für CFD-Rechnungen an kleinskaligen Versuchsständen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 30.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 312.830,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hampel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Gesamtvorhabens ist die Verbesserung von CFD- Modellen zur Beschreibung von Siedevorgängen an beheizten Oberflächen im Druckwasserreaktor, bis hin zur Siedekrise.

Vorhabensziele des Teilprojektes sind experimentelle Untersuchungen zu Prozessen beim Sieden von unterkühlten Flüssigkeiten und beim Übergang vom Blasen- zum Filmsieden einschließlich der Bereitstellung einer Datenbasis zur Modellierung dieser Prozesse sowie eine exaktere Prozessmodellierung. Die Analysen befassen sich sowohl mit Phänomenen an Einzelblasen als auch mit Effekten an mehrdimensionalen Geometrien der Wärmeübertragerfläche in Abhängigkeit differierender Randbedingungen. Die Bereitstellung von Simulationsdaten des Partners TU Dresden-ISM (02NUK010B) dienen der Validierung und der Ergänzung der experimentell gewonnen Daten. Die daraus resultierenden Ergebnisse bilden die Datenbasis für das FZ Dresden (02NUK010C) bei der Modellentwicklung.

Die experimentellen Untersuchungen werden in Zusammenarbeit mit der TU Dresden- Medizinische Fakultät Carl- Gustav- Carus (02NUK010I) durchgeführt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1.1: Konzeption und Aufbau der Versuchsstände  
Entwurf von 2 Versuchsständen zur Untersuchung von Siedeprozessen an eindimensionalen und mehrdimensionalen Geometrien unter Einsatz von Deionat und ggf. niedrigsiedenden Flüssigkeiten zur Erzielung der CHF- Parameter.
- AP1.2: Experimentelle Arbeiten  
Aufstellung der Versuchsmatrix zu den Einzeleffektexperimenten an den Versuchsständen 1 und 2 (iterativ) sowie Durchführung und Bewertung der Experimente zur Aufklärung der Mikrophenomene.
- AP1.3: Theoretische und Methodische Arbeiten  
Konstruktion und Auslegung der Versuchsanlagen sowie Auswahl, Anpassung und Anwendung entsprechender Verfahren und Algorithmen zur Modellierung signifikanter Teilzusammenhänge zwischen Zustandsgrößen.
- AP1.4: Optische Verfahren und Bildverarbeitung  
Aufklärung von Siedevorgängen und Ermittlung relevanter Parameter mittels des Einsatzes schneller zweidimensionaler Bildgebung wie Highspeed- und Infrarotkameras, Mikro- PIV sowie tiefenauflösender Optischer Kohärenztomographie.
- AP1.5: Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.2: Die experimentellen Arbeiten am Kapillarrohr zur Erfassung von Blasenzyklen beim unterkühlten Strömungssieden bis zum Filmsieden unter Verwendung der High-Speed-Kamera sind abgeschlossen. Da das Erreichen des Filmsiedens bei unterkühlter Strömung meist mit einer Zerstörung des Kapillarrohres einhergeht, waren die Versuche mit einem erhöhten technischen Aufwand verbunden. Daher fanden die Versuche nur für einzelne Prozessparameter statt. Weiterhin wurden Versuche zur Bestimmung des Temperaturprofils am Kapillarrohr entlang der Strömungsrichtung, bei simultaner Erfassung der Siedevorgänge mit videographischen Methoden durchgeführt. Unter Verwendung von Inertgasen als Tracerpartikel in der Strömung erfolgten weitere Versuche zur Bestimmung des Einflusses der einzelnen Blasenstadien auf die Grundströmung.
- AP1.3: Unter Anwendung der entwickelten Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung sowie der Auswertungsalgorithmen in VBL, wurden Blasenwachstumsverläufe aus zahlreichen thermohydraulischen Parametern extrahiert und deren Einflussgrößen bewertet. Zur Bestimmung des Einflusses der Blasenbildung und Kondensation auf die Grundströmung wurden unterschiedliche Algorithmen der Particle Image Velocimetry (PIV) angewendet und auf das aufbereitete Bildmaterial angepasst. Die während der Projektlaufzeit ermittelten und ausgewerteten Daten wurden entsprechend abgelegt und dokumentiert. Die Dokumentation ist Inhalt des Abschlussberichtes.
- AP1.4: Erste High-Speed-Kamera Sequenzen zur Erfassung der Siedevorgänge am Kapillarrohr wurden mittels digitaler Bildverarbeitung DBV aufbereitet und ausgewertet. Weiterhin erfolgte die Anpassung von Algorithmen der DBV zur Aufbereitung des Bildmaterials für die Anwendung von PIV-Algorithmen.
- AP1.5: Der erste Entwurf des Abschlussberichtes wurde zu 75 % fertiggestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.5: Erstellung des Abschlussberichtes.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- C. Schneider, R. Hampel, A. Hurtado, S. Meissner, E. Koch, A. Traichel: Experimental investigation of flow boiling heat transfer on optically transparent ITO-surfaces and capillary tubes, 7th International Youth Nuclear Congress IYNC 2012, 5 – 11 August, Charlotte, North Carolina, USA
- C. Schneider, R. Hampel, A. Traichel, A. Hurtado, S. Meissner, E. Koch: Experimental investigation of nucleate boiling on capillary tubes under PWR- specific subcooling and flow parameters, Proceedings of the 20th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE20, July 30-August 3, 2012, Anaheim, California, USA
- C. Schneider, L. Kirsten, S. Meissner, A. Hurtado, E. Koch, R. Hampel: Kleinskalige Siedeeperimente unter Einsatz zweidimensionaler Bildgebung mit High-speed Kamera und Optischer Kohärenztomographie, Vortrag zum KTG Fachtag: Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland, 11.-12. Oktober 2012, Dresden-Rossendorf

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Übertragung der CFD-Wandsiedemodelle zur Anwendung in Lumped Parameter-Codes zur Beurteilung der RDB-Außenkühlung		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 31.01.2013		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 194.241,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Koch

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Forschungsvorhaben ist in das Verbundprojekt *Modellierung Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren* eingebunden. Siedephänomene beeinflussen entscheidend den Wärmeübergang von heißen Oberflächen in das Kühlmittel. Sie sind deshalb von sicherheitstechnischer Bedeutung. Die zuverlässige theoretische Beschreibung der Siedevorgänge leistet daher einen unmittelbaren Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit von Kernkraftwerken. Ziel des Vorhabens ist ausgehend von den Arbeiten der Kooperationspartner des Verbundprojektes zur Verbesserung der CFD-Modellierung von Siedevorgängen an beheizten Oberflächen hier die Modellierung der Reaktordruckbehälter-Außenkühlung für Systemcodes wie z. B. ATHLET-CD.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Verbundprojekt bearbeitet RUB das Arbeitspaket 4. Dieses ist unterteilt in:

- AP1: Verfügbarmachung, Analyse, und Bewertung der CFD-Modellierung der Reaktoraußenkühlung bzw. der Wandsiedemodelle.
- AP2: Konzept für die Modellerstellung zum Wandsieden in LP-Codes.
- AP3: Entwicklung und Implementierung eines Modells zur Reaktordruckbehälter (RDB)-Außenkühlung in einen LP-Code.
- AP4: Demonstrationsrechnungen und Plausibilitätstests.
- AP5: Validierungsrechnungen
- AP6: Erstellung des Abschlussberichts und digitale Archivierung der Rechnungen.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP3: Aufgrund der eingeschränkten Anwendbarkeit des Containment Codes COCOSYS hinsichtlich der Flutung von ganzen Raumbereichen ist eine Implementierung des Modells derzeit nicht durchführbar.

Daher werden zunächst noch iterative Rechnungen durchgeführt. Eine indirekte Anbindung des entwickelten Modells ist nun über GCSM (General Control Simulation Modul)-Signale an das Modul AIDA im Code ATHLET-CD vorgesehen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP6: Im Rahmen der Erstellung des Abschlussberichts werden die noch offenen Punkte zur Modellanbindung behandelt. Hierzu gehören auch Rechnungen zur Validierung anhand von Versuchen an der Versuchsanlage LIVE des Forschungszentrums Karlsruhe.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Einfluss von Turbulenz und Sekundärströmungen auf das unterkühlte Strömungssieden in reaktortypischen Konfigurationen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 356.503,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Sattelmayer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben verfolgt das Ziel, das Wissen zum Strömungseinfluss auf den Wärmeübergang von den Brennelementen in das Arbeitsfluid (Druckwasserreaktoren) anhand von Modellversuchen zu verbessern und so sowohl zur Erhöhung der Sicherheit als auch zur technischen Verbesserung beizutragen. Als wichtiger Nebeneffekt wird der Kompetenzerhalt und -aufbau in der Kerntechnik hinsichtlich wesentlicher Sicherheitsfragen nuklearer Technologien unterstützt.

Im Verbundprojekt besteht eine Zusammenarbeit mit folgenden Einrichtungen: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf; Hochschule Zittau Görlitz; Technische Universität Dresden Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik, Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik; Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Strömungsmechanik; Technische Universität Dresden, Medizinische Fakultät; Ruhr Universität Bochum, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft; Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Kern- und Energietechnik sowie ANSYS Germany GmbH.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Validierungsdaten: Das Vorhaben soll zur Bereitstellung von Daten zur Validierung vorhandener und innerhalb des Verbundprojektes entwickelter CFD-Modelle dienen.
- AP2: Algorithmen: Es sollen im Laufe des Projektes am Lehrstuhl für Thermodynamik vorhandene Algorithmen zur Auswertung optischer Messverfahren bereitgestellt und weiterentwickelt werden, insbesondere auch zum Einsatz in Verbindung mit digitaler Holographie.
- AP3: Holographieentwicklung: Die bereits in einem Vorgängerprojekt am Lehrstuhl für Thermodynamik eingesetzte digitale Holographie soll zur Anwendung an Siedephänomenen weiterentwickelt werden.
- AP4: Fluidkreislauf: Es soll ein Versuchsstand zur Untersuchung des unterkühlten Strömungssiedens mit niedrig siedenden Kältemitteln konstruiert, aufgebaut und betrieben werden.
- AP5: Instrumentierung: Der Versuchsstand soll mit geeigneter Messtechnik ausgestattet werden, hierbei soll auf frühere Erfahrungen zurückgegriffen werden wobei der Schwerpunkt auf holographischen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Kombination mit Leitfähigkeitssensoren liegen soll.
- AP6: Strömungscharakterisierung: Die einphasige Strömung soll in Vorversuchen mit PIV und Thermoelementen vermessen werden.
- AP7: konv. Siedeexperimente: Im Rahmen des Versuchsprogramms sollen verschiedene Konfigurationen mit unterschiedlichen Turbulenzgraden und Sekundärströmungsmustern vergleichend untersucht werden.
- AP8: Holographieanwendung: Die in Arbeitspaket 3 weiterentwickelte digitale Holographie soll an dem Versuchsstand eingesetzt und evaluiert werden.
- AP9: Datenanalyse: Die gewonnenen Daten sollen ausgewertet und zusammengefasst werden um diese u. a. für die CFD-Validierung nutzbar zu machen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Entsprechend den Angaben im Aufstockungsantrag wurden die Arbeiten der AP7, 8 und 9 weitergeführt. Im Bereich der experimentellen Arbeiten (AP7) wurden Messungen mit den optischen Mikrosonden, der digitalen holografischen Interferometrie und Hochgeschwindigkeitsvideometrie und –PIV durchgeführt. Die Messungen wurden überwiegend im technisch wichtigen Bereich des Übergangs vom Blasen- ins Filmsieden (Siedekrise) durchgeführt. Alle Messungen wurden jeweils am Referenzfall des Kanals ohne Einbauten sowie mit zwei Turbulenz und Drall erzeugenden Einbauten (Einzelloch und sog. „Twisted Tape“) durchgeführt. Die Unterkühlung und die Strömungsgeschwindigkeit wurden systematisch variiert.

Mittels Hochgeschwindigkeitsvideometrie wurden vertiefte Untersuchungen des periodischen Verhaltens der Dampfschicht im stationären Sieden kurz vor der Siedekrise und während des Übergangs durchgeführt. Hierbei konnte eine weitgehende Unabhängigkeit der Frequenz des Auftretens größerer Zusammenballungen von den jeweiligen Einbauten und Unterkühlungen gezeigt werden. Ebenfalls zeigte der Übergang ins Filmsieden lediglich ein Abnehmen der Amplitude der periodisch auftretenden Zusammenballungen, nicht aber deren Frequenz. Hierdurch konnte ein in der Literatur diskutierter Mechanismus der Koaleszenz größerer Dampfstrukturen als Auslöser der Siedekrise ausgeschlossen werden. Des Weiteren wurde durch Anwendung eines Kreuzkorrelations-Algorithmus eine Analyse der Dampfgeschwindigkeit durchgeführt, die eine deutliche Beschleunigung der Dampfphase in Richtung der Heizeroberfläche zeigte.

Um neben dem Verhalten der Dampfphase zusätzliche Aussagen über das Verhalten der flüssigen Phase treffen zu können wurden Versuche mit Hochgeschwindigkeits-PIV durchgeführt. Hierbei konnte im Nachlauf größerer Dampfstrukturen eine Beschleunigung des Fluids in Richtung der Heizeroberfläche gezeigt werden.

Durch die weiterentwickelte digitale holografische Interferometrie konnten Temperaturverteilungen im Kanal zeitaufgelöst ermittelt werden (AP8). Hiermit konnte die Verteilung von unterkühlter und gesättigter Flüssigkeit dargestellt werden. Des Weiteren konnte die verbesserte Durchmischung des Kanals beim Einsatz der Einbauten gezeigt werden.

Mit den optischen Mikrosonden konnte das Verhalten der Dampfphase in Heizernähe während der Siedekrise detailliert untersucht werden. Hierbei konnte eine Zunahme von Dampfkonzentration, Blasengrößen und –frequenzen in wandnahen Bereichen ( $\leq 4$  mm) bei gleichzeitiger Abnahme der Dampfkonzentration in wandferneren Schichten ( $> 4$  mm). Dieses Verhalten weist auf eine die Siedekrise verursachende Sättigung der wandnahen Dampfschicht durch Blasen hin.

Die ermittelten Daten wurden vertieft ausgewertet und die einzelnen Messtechniken untereinander verglichen (AP9). Die Daten wurden mit gängigen mechanistischen Modellvorstellungen zur Siedekrise verglichen. Hierbei konnten die Modelle jeweils in Teilbereichen bestätigt werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Analyse der Daten soll fortgeführt werden, um eine breite und gut zugängliche Datenbasis zu schaffen. Die bisherigen Ergebnisse sollen durch Veröffentlichung einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bloch, G.; Jenke, C.; Kuczaty, J.; Böck, L., Sattelmayer, T.: “Einsatz von digitaler holografischer Interferometrie zur Erfassung von Temperaturgradienten und Wärmetransport in Siedevorgängen“, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Rostock 2012

Bloch, G.; Jochum, C.; Schechtl, T., Sattelmayer, T.: “Subcooled Flow Boiling in a Rectangular Channel With Added Turbulence and Longitudinal Vortices”, Proceedings of the 2012 20th International Conference on Nuclear Engineering collocated with the ASME 2012 Power Conference, Anaheim 2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Validierung von Unterkanal- und CFD-programmen anhand von Brennstab-Bündelversuchen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 268.933,84 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Cheng	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

- Aufstellung einer experimentellen Datenbasis für die Validierung von Unterkanal- sowie CFD-Rechenprogrammen und für ihre Anwendung auf die DWR-Brennstabbündeln;
- Erweiterung des Verständnisses zum Strömungs- und Wärmeübertragungsverhalten in Brennstabbündeln unter Einfluss relevanter Parameter;
- Entwicklung neuer Modelle zur Beschreibung des Queraustausches zwischen Unterkanälen für einen breiten Gültigkeitsbereich der Dampfqualität von einphasiger Strömung bis zur Zweiphasenströmung unter KHB-Zuständen;
- Validierung von Unterkanal- und CFD-Rechenprogrammen und Auswertung vorhandener KHB-Korrelationen anhand von Brennstab-Bündelversuchen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das lokale Strömungsverhalten in Stabbündeln soll durch Unterkanal- und CFD-Simulation untersucht werden. Basierend auf der detaillierten CFD-Analyse sollen neue Modelle zur Beschreibung des Queraustausches für das Unterkanal-Programm abgeleitet werden. Die am IKET vorhandenen und die am FZD (Forschungszentrum Dresden-Rossendorf) neu gewonnenen Versuchsdaten sollen zur Validierung der Modelle benutzt werden. Anhand der Versuchsdaten und des modifizierten Unterkanal-Programms sollen anschließend einige vorhandene Korrelationen zur Vorhersage von KHB in Stabbündeln ausgewertet werden. Das Projekt soll sich in sechs Arbeitspakete aufteilen:

- Aufbereitung von Versuchsdaten;
- Simulation ausgewählter Experimente mit einem Unterkanal-Programm;
- Simulation der Bündelströmung mit einem CFD-Programm und Ableitung neuer Modelle für den Queraustausch;
- Validierung von Unterkanal- und CFD-Programm anhand von Bündelversuchsdaten;
- Auswertung von KHB-Korrelationen;
- Erstellung des Abschlussberichts.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- Validierung des in der Arbeit angewendeten CFD Modells wurde anhand der Versuchsdaten von Gonzalez-Santalo (1970) mit Zwei-Kanal-System durchgeführt.
- Gleichgewichtsdampfanteilsverteilung wurden mit periodischer Randbedingung untersucht. Dabei wurde sowohl der Einfluss von Massenstromdichtenunterschied als auch der Einfluss von geometrischem Unterschied zwischen den zwei benachbarten Unterkanälen berücksichtigt. Basierend auf eine systematische CFD Untersuchung wurde eine Korrelation zur Beschreibung der Gleichgewichts- dampfanteilverteilung entwickelt.
- Zur Untersuchung der charakteristischen Vermischungsgeschwindigkeit von Void Drift wurde CFD Simulation mit zwei Zentral-Kanal-System durchgeführt. Ein weiter Bereich von Reynolds Zahl wurde dabei bedeckt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die geplanten Arbeiten in den nächsten sechs Monaten (Januar bis Juni 2013) sind:

- Auswertung der Simulationsergebnisse zur Untersuchung der charakteristischen Vermischungsgeschwindigkeit von Void Drift, für welche eine Korrelation entwickelt werden soll.
- Validierung des neuen Void-Drift Modells mit Stabbündel-Benchmark Ergebnissen durchgeführt.
- Bewertung der ausgewählten und bereits in MATRA implementierten KHB Korrelationen anhand des neuen Void-Drift Modells.
- Verfassung des Abschlussberichts.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> ANSYS Germany GmbH, Birkenweg 14a, 64295 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: CFD-Modellentwicklung und Validierung für die 3-dimensionale Simulation von Siedevorgängen in Brennelementen von DWR		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 604.214,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. habil. Frank	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist die Verbesserung der CFD-Modellierung von Siedevorgängen in Brennelementen von Druckwasserreaktoren. Die von den Partnern ausgeführten kleinskaligen und integrativen TOPFLOW-Experimente werden eingesetzt, um die CFD-Modelle in der ANSYS CFD Software für die numerische Simulation von Wandsiedeprozessen in Brennelementen von Druckwasserreaktoren zu verbessern. Schwerpunkt liegt hierbei auf der Kopplung von Wandsiedemodell und Wärmeleitung im Festkörper (CHT), der Kopplung des RPI-Wandsiedemodells mit Populationsbilanzmodellen, der Erweiterung des Wandwärmestrommodells im RPI-Wandsiedemodell sowie einer Verbesserung der CFD-Modellierung der Zwischenphasengrenzflächendichte und der wirkenden fluiddynamischen Kräfte zwischen beiden Phasen beim Übergang zwischen verschiedenen Strömungsregimen mit zunehmendem Dampfgehalt. Ein Brennelement-Bündelexperiment an der TOPFLOW-Versuchsanlage des HZDR wird schließlich die Validierung der CFD-Modelle ermöglichen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

- AP1: Kopplung von Wandsiedemodell und Wärmeleitung im Festkörper (CHT)
- AP2: Kopplung des RPI-Wandsiedemodells mit Populationsbilanzmodellen
- AP3: Erweiterung des Wandwärmestrommodells im RPI-Wandsiedemodell
- AP4: Algebraische Modellierung der Zwischenphasengrenzfläche und symmetrische Modellierung des Phasenimpulsaustausches; Integrale Modellvalidierung an dem HZDR-Experiment
- AP5: Bereitstellung des CFD-Moduls für die Verbundprojektpartner, Dokumentation und Abschlussbericht

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP5:

Über den gesamten Berichtszeitraum hinweg fand mit den Projektpartnern ein regelmäßiger und intensiver Austausch von Informationen, gewonnenen Erfahrungen und neuen Erkenntnissen sowie von neu implementierten Modellen in ANSYS CFX in Form von CFD-Solver-Prototypen statt, die insbesondere am HZDR intensiven Tests und Validierungsuntersuchungen unterzogen wurden.

Im Berichtszeitraum wurden die letzten Untersuchungen zur RPI-Wandsiede-Modellvalidierung unter Bedingungen nahe von Dry-out- und CHF-Bedingungen an den Bartolomei- und Hoyer-Testfällen detailliert ausgewertet und in der ANSYS-internen Datenbank von Validierungs-Testfällen archiviert. Damit stehen die so untersuchten Validierungs-Testfälle potentiell allen Anwendern der ANSYS CFX-Software zur Verfügung.

Des Weiteren wurde im Berichtszeitraum ein ausführlicher Abschlussbericht verfasst, in dem alle in dem Projekt durchgeführten Modell-Entwicklungsarbeiten und Simulationen zur Modellvalidierung dokumentiert wurden.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Ein Abschlussbericht über das gesamte Projekt wurde angefertigt.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

C. Lifante, B. Krull, T. Frank, R. Franz and U. Hampel: CFD-Modeling of turbulent flows in rod bundle and comparison to experiments, Fachtagung der KTG-Fachgruppe „Thermo- und Fluidodynamik“, des Instituts für Fluidodynamik des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf sowie der TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, 11. und 12. Oktober 2012.

C. Lifante, Th. Frank and A. Burns: Wall boiling modeling extension towards critical heat flux. The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics, NU-RETH-15, Pisa, Italy, May 12-15, 2013. (Abstract accepted and paper submitted)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010H</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 468.048,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hurtado	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In einem gemeinsamen Verbundprojekt sollen CFD-Modelle für Siedevorgänge in Druckwasserreaktoren vom Blasensieden bis hin zu Phänomenen des Filmsiedens weiterentwickelt und validiert werden.

Das Ziel der Arbeiten an der Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik besteht dabei darin, die Wirkung DWR-typischer Kühlmittelzusätze auf das Siedeverhalten an beheizten metallischen Wänden experimentell zu untersuchen und die Ergebnisse für die Modellbildung aufzubereiten.

Zusammenarbeit mit Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, KIT, Ruhr-Universität Bochum, Technische Universität München, Hochschule Zittau-Görlitz und ANSYS Germany GmbH.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Planung und Konstruktion der Versuchsanlage

AP2: Errichtung und Inbetriebnahme der Versuchsanlage

AP3: Versuche ohne Kühlmittelzusätze

AP4: Versuche mit Kühlmittelzusätzen

AP5: Auswertung der Versuchsdaten

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im vorangegangenen Berichtszeitraum sind die Versuche mit Heizbündel und den Zusätzen Borsäure sowie Lithiumhydroxid abgeschlossen worden.

Im aktuellen Berichtszeitraum wurde die Auswertung der stationären und instationären Versuche abgeschlossen und Teilergebnisse wurden im September auf der NUTHOS-9 vorgestellt. Der Einzelkanal mit einem Heizstab mit hoher Wärmestromdichte wurde gebaut und erfolgreich in Betrieb genommen; die Versuche sind abgeschlossen und ausgewertet.

Die Versuche simulierten unterkühltes Sieden während des Normalbetriebes eines Druckwasserreaktors mit Wärmestromdichten von bis zu  $60 \text{ W/cm}^2$  und Unterkühlungen bis 20 K. Die Ergebnisse geben keine Anzeichen darauf, dass es eine Beeinflussung des Siedeverhaltens durch Zugabe von Kühlmittelzusätzen in Druckwasserreaktoren gibt. Lediglich im Bereich zwischen  $120 \text{ °C}$  und  $160 \text{ °C}$  lässt sich eine Änderung der Blasengrößenverteilung bei kleinen Dampfanteilen durch Zugabe von Borsäure beobachten. Die Differenz ist jedoch klein und die Zugabe von Lithiumhydroxid unterbindet den Effekt, wahrscheinlich bedingt durch eine Erhöhung des pH-Wertes.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Versuchsprogramm ist abgeschlossen. Im letzten Monat des Projektes werden die Auswertungen vervollständigt und das Projekt wird abgeschlossen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

R. Nakath; C. Schuster; A. Hurtado: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge in Druckwasserreaktoren, Jahrestagung Kerntechnik 2011, Berlin, 17.-19. Mai 2011, Tagungsbericht

R. Nakath; C. Schuster; A. Hurtado: Experimental Investigation into the Effects of Reactor Coolant Additives on boiling phenomena in Pressurized Water Reactors, 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics NURETH 14, Toronto, September 25-30 2011, Conference Proceedings

R. Nakath; C. Schuster; A. Hurtado: Effects of boric acid on flow boiling phenomena under high pressure, 9th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety, NUTHOS-9, September 8-15 2012, Conference Proceedings

R. Nakath; C. Schuster; A. Hurtado: About the change in boiling behaviour of water with coolant additives in PWR, KERntechnik - Independent Journal for Nuclear Engineering, Energy Systems, Radiation and Radiological Protection, Heft 78/1, 2013, Akzeptiert zur Veröffentlichung

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 010I</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Darstellung von Siedevorgängen mittels PIV und Optischer-Kohärenz-Tomographie		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 283.252,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. rer. nat. Koch	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In diesem Teilprojekt wird das Ziel verfolgt, den Einfluss der Blasenbildung auf den Wärmetransport von Brennelementen zur Kühlflüssigkeit zu verstehen und zu optimieren und damit zur Erhöhung der Sicherheit und weiteren technischen Verbesserung von Reaktoren beizutragen. Dazu sollen die Erscheinungen beim Blasensieden von der Einzelblase bis zum Blasenfilm dreidimensional und mit hoher zeitlicher Auflösung sichtbar gemacht werden um diese experimentellen Befunde mit den theoretischen Vorhersagen vergleichen zu können. Alle bisher bei der Erforschung von Dampfblasen eingesetzten Verfahren können entweder nur zweidimensionale Projektionen darstellen oder es können nur einzelne Momentaufnahmen dreidimensional erfasst werden. Nur durch die 4D-Erfassung (3 Raum- und eine Zeit-Dimension) ist eine Optimierung und Verifizierung der theoretischen Modelle möglich.

Wissenschaftliche und technische Teilziele sind deshalb:

- Aufbau eines Versuchsstands zur gezielten Erzeugung von Einzelblasen und Blasenfilmen mit optischem Zugang (Versuchsstand Deionat).
- Aufbau eines Systems zur Darstellung von dynamischen 3-dimensionalen Strukturen mit hoher zeitlicher Auflösung (Aufbau des schnellen OCT-Systems).
- Visualisierung von 3-dimensionalen Gas-Flüssigkeitsstrukturen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.
- Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen der theoretischen Modelle.

Für die Aufklärung der Siedevorgänge ist die Verwendung schneller zweidimensionaler Bildgebung PIV und tiefenauflösender Optischer Kohärenztomographie (OCT) einschließlich Methodenentwicklung dringend erforderlich. Der Aufbau des Versuchstandes zur Erzeugung von Einzelblasen und Blasenfilmen erfolgt in enger Abstimmung mit der Gruppe von Frau Prof. Traichel, an der Hochschule Zittau/Görlitz. Auch verfügen diese Arbeitsgruppe und die anderen Partner im Verbund über die notwendigen theoretischen und praktischen Kenntnisse bei der Beschreibung und Erzeugung von Blasen und Blasenfilmen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Auswahl und Aufbau eines optimierten OCT-Systems für das Studium der Dampfblasen
- Anpassung der Konstruktion eines vorhandenen OCT-Messkopfes an den Versuchsstand zur Blasenherzeugung. Aufbau des OCT-Messkopfes.

- Auswahl und Optimierung der synchronen Bildgebung mittels Kamera.
- Optimierung der Beleuchtung (Stroboskoplicht).
- Optimierung und Aufbau eines OCT-Messkopfes zur parallelen Messung mit Kamera und OCT für unterschiedliche relevante Geometrien.
- Entwicklung und Programmierung der synchronen Erfassung mittels Kamera (PIV) und OCT.
- Durchführung der Experimente an Einzelblasen, Blasenystemen bis zum Blasenfilm.
- Auswertung der Daten.
- Gemeinsame Zusammenstellung der Ergebnisse.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In diesem Berichtszeitraum wurde eine Verbesserung der numerischen Prozessierung und Auswertung der mit OCT generierten Datensätze erreicht. Zur Verfügung standen Datensätze, welche am Versuchsstand Deionat an der Hochschule Zittau/Görlitz aufgenommen worden waren. Die momentan erreichte Schnittbildfrequenz von 240 Hz ermöglicht die zeitlich hochaufgelöste zweidimensionale Darstellung der Siedeprozesse. Durch eine bereits im vorangegangenen Zwischenbericht begonnene und beschriebene Verbesserung der Postprozessierung konnten Bildartefakte weitgehend eliminiert werden, welche durch unterschiedliche Absorption, Dispersion und Polarisation im buffered Fourier domain mode locked (FDML) Setup entstehen. Somit wurde eine verbesserte Auflösung erreicht, wodurch die Phasengrenzflächen zwischen Dampf und Fluid besser rekonstruiert werden. Die Schnittbildrate von 240 Hz ist ausreichend, um das Blasenwachstum bei kleinen Wärmestromdichten abzubilden. Um auch bei höheren Wärmestromdichten mit höheren Blasenfrequenzen eine hinreichende zeitliche Auflösung zu erreichen, ist die Steigerung der Schnittbildrate notwendig. Diesbezüglich wurde begonnen, ein effizienteres sinusförmiges Scanmuster einzuführen. Charakteristische Parameter der Blasengeometrie konnten mit einer automatisierten Segmentierung aus den OCT-Schnittbildern bestimmt werden und ermöglichen auch Aussagen über das Verhalten einzelner Dampfblasen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Bestimmung charakteristischer geometrischer Parameter des Dampfblasen.
- Weitere Steigerung der Schnittbildrate durch Vergrößerung der Repetitionsrate des FDML Lasers sowie durch Kombination mit einem effizienterem sinusförmigen Scanmuster.
- Korrektur von Bildartefakten, die durch Reflexion und Brechung an Dampf-Fluid Grenzflächen entstehen.
- Validierung der Messmethode sowie der numerischen Postprozessierung an einfachen Strömungs- und Siedemodellen und im Vergleich mit etablierten Bildgebungsverfahren (high-speed Videometrie, PIV).
- Ausnutzung der phase-resolved Doppler Methode sowie weiterer Verfahren und numerischer Methoden, um Strömungsverhältnisse in der Nähe der Dampfblasen mehrdimensional darzustellen und den Einfluss auf den Siedevorgang zu bestimmen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

L. Kirsten, S. Meissner, C. Schneider, R. Hampel, E. Koch: „Untersuchung von Siedevorgängen an beheizten Oberflächen mittels Optischer Kohärenztomographie“, 20. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, (Vortrag und Proceedings) (2012)

C. Schneider, L. Kirsten, S. Meissner, A. Hurtado, E. Koch, R. Hampel: „Small scale boiling experiments using two-dimensional imaging with high-speed camera and optical coherence tomography“, Kerntechnik, under review

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG), Hansastr. 27c, 80686 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 011A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 484.253,45 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Dudlik	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

- Koordination des Gesamtprojektes
- Beratung der Projektpartner bei Umbau, Betrieb und Messtechnik der Versuchsanlagen
- Umbau des institutseigenen Versuchsstandes
- Teilnahme an den Druckstoß-Seminaren

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Leitung des AP2: Experimente zu Kondensationsschlägen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- End-Fertigung der Testsektion
- Fertigstellung eines Hilfsteststandes zur dynamischen Kalibrierung der Drucksensoren
- Instandsetzung der vorhandenen Anlage, Austausch und Reparatur vorhandener (Mess)technik abgeschlossen
- Fertigung neuer Komponenten für die Testsektion (Einspritzdüse) abgeschlossen
- Unterstützung TUHH und BWM beim Versuchsbetrieb
- Organisation und Durchführung eines Projekttreffens und einer Telefonkonferenz, Oktober & November 2012, Oberhausen

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Versuchsdurchführungen, Koordination der Experimente mit TUHH und BWM, Klibrierexperimente mit Drucksensoren

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> TÜV NORD SysTec GmbH & Co KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 011B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 496.419,92 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Schaffrath	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung von kondensationsinduzierten Druckstößen in Rohrleitungssystemen. Neue, experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass vorhandene analytische Modelle keine abdeckenden Ergebnisse liefern und daher zu verbessern sowie zu validieren sind. Im Rahmen des Vorhabens sollen die bei kondensationsinduzierten Druckstößen auftretenden Phänomene beschreiben und anschließend modelliert werden. Die Modelle sollen validiert, in bestehende 1D sowie 3D Codes eingebunden und für den Einsatz in kerntechnischen Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren qualifiziert werden. Darüber hinaus soll das Vorhaben einen Beitrag dazu liefern, die Sicherheit der sich im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke entsprechend dem Atomgesetz nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten. Das Forschungsvorhaben wird im Verbund mit der TÜV Süd Industrie Service GmbH, dem IMS der Technischen Universität Hamburg-Harburg, dem E.on-Energie-Lehrstuhl für Nukleartechnik an der Technische Universität München und dem Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT sowie dem Institut für Hydromechanik und Wasserbau an der Bundeswehr Universität München durchgeführt. Für die Zusammenarbeit wurde zwischen den Partnern ein Kooperationsvertrag geschlossen, die Arbeitsteilung ist in dem Projektantrag geregelt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben ist in 6 Arbeitspakete (AP1 - AP6) unterteilt. Zusätzlich ist die Durchführung von 2 Seminaren vorgesehen (AP-S). Jedes Arbeitspaket wird von einem sog. technischen Manager geleitet.

AP1: Modell und Datenrecherche

AP2: Experimente zu Kondensationsschlägen

AP3: Entwicklung eines Kondensationsschlagmodells

AP4: Implementierung und Validierung des Modells in DYVRO Mod. 3

AP5: Softwarequalifizierung für kerntechnische Anwendungen

AP6: Abschlussbericht

APS: Druckstoßseminare

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nachfolgend gehen wir nur auf die AP ein, in denen im Berichtszeitraum Arbeiten durchgeführt wurden. Dies sind die AP2, AP3, AP4, AP5 sowie APS.

AP2: Die Versuchsanlagen der TUHH und der UniBW wurden in Betrieb genommen und erste Versuche zum Anlagenverhalten durchgeführt. Aktuell wird eine harmonisierte Versuchsplanung

ausgearbeitet. Zu diesem Zweck wurde zunächst in einer Videokonferenz mit dem Schwerpunkt Modellierung (siehe auch AP3) erarbeitet, welchen Parameterbereich die Experimente aus Sicht der Modellierer abdecken sollten. Im Anschluss wurden dann bei einem projektübergreifenden Treffen Testmatrizen diskutiert und vier Vergleichsexperimente festgelegt, die eine maximale Vergleichbarkeit der Versuche gewährleisten.

- AP3: Die bereits zuvor erwähnte Videokonferenz zum AP3 wurde federführend vom TÜV NORD organisiert. Nach einer Bestandsaufnahme des Entwicklungsstandes der Software-Module und der Einigung auf noch zu leistende Arbeiten wurde festgelegt, welcher Input von den Experimenten generiert werden sollte, um die weitere Entwicklung der Modelle bestmöglich zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde beim TÜV NORD ein Impulsaustausch-Modell für DYVRO und daraus ein neues Kriterium für den Umschlag von Schichten- zu Schwallströmung (Slugging Kriterium) entwickelt. Dieses Modell basiert auf der Vorstellung, dass eine Oberflächenwelle einem Staudruck ausgesetzt ist, der destabilisierend wirkt.
- AP4: Das neu entwickelte Modell für den Impulsaustausch, das die Auswirkungen eines Staudrucks auf Oberflächenwellen berücksichtigt, wurde in DYVRO implementiert und getestet. Erwartungsgemäß führt es zu einer Verstärkung von Oberflächenwellen und einem früheren Umschlag von einer Schichten- in eine Schwallströmung. Darüber hinaus wurden weitere technische Verbesserungen an DYVRO vorgenommen. So wurde ein neues Verzweigungsmodell implementiert und der Lösungsalgorithmus für das 6-Gleichungssystem optimiert. Beides sind Voraussetzungen für eine erfolgreiche Nachrechnung der Versuche.
- AP5: Die vom TÜV NORD zugesagte Zuarbeit zum Validierungskonzept ist erfolgt. Aufgabe des TÜV NORD war die Erstellung eines Textbausteins, der die PMK-2-Versuche am damaligen KFKI-AEKI Institut in Budapest zusammenfasst. Zudem wurde der gesamte Textentwurf für das Validierungskonzept einer kritischen Durchsicht unterzogen.
- APS: In Zusammenarbeit mit dem Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf sowie der Fachgruppe Thermofluidodynamik der KTG wurde im Oktober ein Fachtag in der Veranstaltungsreihe „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung“ organisiert und durchgeführt. Ausgewählte Beiträge der Projektpartner erscheinen in einem Sonderheft der Zeitschrift Kerntechnik.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Nachfolgend gehen wir nur auf die AP ein, in denen im folgenden Berichtszeitraum Arbeiten durchgeführt werden sollen. Dies sind die AP2, AP3, AP4, AP5 sowie der APS.

- AP2: Es ist geplant, an ausgewählten Experimenten teilzunehmen und bei der (phänomenologischen) Auswertung der Versuche zu den Kondensationsschlägen mitzuwirken.
- AP3: Zur Ergänzung des Impulsaustausch-Modells in DYVRO wird aktuell ein Ansatz für die Reibung an der Phasengrenzfläche zwischen der gasförmigen und flüssigen Phase entwickelt. Zudem soll das bestehende Modell zur Berechnung des Umschlages von Schichten- zu Schwallströmungen weiter verbessert werden. Unter anderem soll das Slugging-Kriterium an experimentellen Daten aus der Literatur validiert und ggf. geeignet erweitert werden.
- AP4: Die Implementierung der Wärmeübergangsmodele an der Phasengrenze soll abgeschlossen werden. Anhand von Validierungsrechnungen soll die Eignung der Modelle geprüft werden. Des Weiteren sind für das Modell für den Impulsaustausch Validierungsrechnungen geplant.
- AP5: Die weitere Unterstützung des TÜV SÜD Industrie Service bei der „Software-Qualifizierung“ ist vorgesehen.
- APS: Des Weiteren ist geplant, auf der NURETH-15 in Pisa (im Nachgang zum Mini-Symposium der NURETH-14) eine Sitzung zum Thema Kondensationsschläge zu organisieren. Der TÜV NORD hat hierzu einen Beitrag eingereicht.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Schmitt-Hannig (ed.), A. Krüssenberg (ed.), Forschungsverbände „CIWA“ und „Sieden in DWR“, Kerntechnik Sonderheft, Vol. 78, No. 1, 2013

<b>Zuwendungsempfänger:</b> TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Westendstr. 199, 80686 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 011C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 202.790,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Swidersky	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundprojekts CIWA werden Modellentwicklungen zur Berechnung von Direkt-Kondensationsvorgängen (CIWH) sowie experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Das Vorhabenziel ist u. a. die Bereitstellung eines experimentell validierten und wissenschaftlich fundierten Berechnungsmodells, das fluiddynamische Belastungen aus CIWH abdeckend ermittelt. Hierfür erfolgt eine qualifizierende Bewertung des Programmoduls für die Anwendung in der kerntechnischen Überwachung und erlaubt die Entwicklung von Bewertungskriterien nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Die Zusammenarbeit erfolgt mit dem Fraunhofer UMSICHT, der technischen Universität München, der technischen Universität Hamburg-Harburg, der Bundeswehruniversität München sowie der TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Rahmen des Arbeitspakets 5 des Verbundprojekts, werden von der TÜV SÜD Industrie Service GmbH derzeit verfügbare und eingesetzte Berechnungsmethoden evaluiert.

Es erfolgen die konzeptionelle Planung durchzuführender Validierungsberechnungen, Versuchsnachrechnungen und die Definition von Qualifizierungsmerkmalen und programmtechnischer Schnittstellen.

Abschließend wird das Programmodul für die Anwendung in kerntechnischen Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren qualifizierend bewertet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Abschluss der Beiträge zur der Literaturrecherche.
- AP5.1: Validierungskonzept: Vervollständigung des Leitfadens um Kapitel zu Fehlereinflüssen, bestehender Experimente und Beschreibung der Versuchsanlagen.
- AP5.2: Schnittstellen: Weiterentwicklung und Erprobung einer C- und FORTRAN-Schnittstelle in paralleler Umgebung unter Linux mit OpenMPI. Verifikation und Testberechnung mit OpenFOAM. Dokumentation.
- AP6.1: Beitrag auf der "11<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges - Surge Analysis", Lissabon, Oktober 24 - 26, 2012.
- AP6.1: Beitrag auf der KTG-Fachtagung „Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung in Deutschland“, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 10.-11.10.2012.

Im Berichtszeitraum wurde an zwei Projektsitzungen und an zwei Videokonferenzen teilgenommen. Es wurde an einer internationalen Konferenz teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2.4: Auswertung geeigneter Versuche der CIWA-Partner.
- AP5.1: Vervollständigung des Validierungskonzepts.
- AP5.2: Implementation, Verbesserung und weitere Tests der Funktionsbibliothek CPI für die Anwendung im CIWA-Projekt. Kopplung mit ATHLET und OpenFOAM, Dokumentation und Schulung.
- AP5.3: Softwarequalifizierung.
- AP6.1: Beitrag auf der Konferenz 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics NURETH-15, 12 - 15 May, 2013, Pisa, Italy
- AP6.1: Beitrag in der Zeitschrift Kerntechnik, Sonderheft 78/1.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Swidersky H; Schiefer S.: "Numerical simulation of condensation induced water hammer (CIWH) with 1D thermalhydraulic codes", proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surges - Surge Analysis, Vol. 1, pp 495-504, 24 - 26 October 2012, Lisbon, Portugal.

Swidersky H., Neuhaus T.: "Kondensationsinduzierte Druckstöße, Einführung, Relevanz für die Kerntechnik, Stand von Wissenschaft und Technik", KTG-Fachtagung "Aktuelle Themen der Reaktorsicherheitsforschung", HZDR Institut für Fluidodynamik, 11.-12. Oktober 2012, Dresden-Rossendorf.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 011D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 305.621,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schlüter	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Vorrangiges Ziel ist die Erfassung und Bewertung von schnellen Kontaktkondensationsvorgängen sowie eine Erweiterung derzeit bestehender Berechnungsmöglichkeiten. Hierfür sollen experimentelle Ergebnisse an einer Versuchsanlage gewonnenen und zur Validierung von Simulationen mit unterschiedlichen Programmcodes genutzt und die derzeitigen Grenzen in den Berechnungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Auf Basis theoretischer und experimenteller Arbeiten wird ein Berechnungswerkzeug entwickelt, das die Anforderungen bzgl. der Ermittlung konservativ abdeckender Ergebnisse erfüllt. Zu diesen Zwecken erfolgt eine zusätzliche Validierung mit den Ergebnissen von 2 weiteren Versuchsanlagen der Partner unter veränderten Geometrie- und Betriebsbedingungen. Die praktikable Anwendbarkeit des Modells in der Praxis stellt eine wichtige Forderung dar. Hierfür soll durch Entwicklung einer transparenten Datenschnittstelle das CIWA-Modul an externe System- und CFD-Codes gekoppelt werden können. In den o. g. Schwerpunkten werden die in dem Verbundprojekt involvierten Nachwuchswissenschaftler wechselweise eingebunden und erhalten damit einen starken Praxisbezug mit dem Ziel des Kompetenzerhalts in der Kraftwerkstechnik.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Modell- und Datenrecherche
- AP2: Experimente zu Kondensationsschlägen
- AP3: Entwicklung eines Kondensationsschlagmodells
- AP4: Implementierung und Validierung des Modells in DYVRO mod. 3
- AP5: Software-Qualifizierung für kerntechnische Anwendungen
- AP6: Abschlussbericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Experimentelle Vorhaben:

- Erzeugung und Interpretation von über 50 Kondensationsschlägen.
- Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit von Kondensationsschlägen, mit Vergleichbaren Ergebnissen.
- Erfolgreiche Lokalisierung von Druckstößen.
- Voruntersuchungen zur laseroptischen Bestimmung der Temperaturschichtung in der flüssigen Phase einer Zweiphasenströmung.
- Ausrichtung eines Projekttreffens zur Erarbeitung von Testmatrizen. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden Versuchseinstellungen bestimmt, welche an allen Versuchsanlagen umgesetzt werden können.
- Begonnen: Fertigung eines transparenten Rohrabschnitts.
- Begonnen: Bachelor-Arbeit zur Bearbeitung der Testmatrizen.

Simulationsvorhaben:

- OpenFOAM-Simulationen von gegenläufigen isothermen Zweiphasenströmungen zur Identifizierung von relevanten Teilphänomenen. Als besonders relevant hat sich die Definition der Zu- und Ablaufrandbedingungen der gasförmigen und flüssigen Phase ergeben.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Experimentelle Vorhaben:

- Bearbeitung der vereinbarten Testmatrizen.
- Erarbeitung von weiteren Testmatrizen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.
- Einbau eines transparenten Rohrabschnitts für optische Untersuchungen.
- Optische Untersuchungen im Gegenlichtverfahren zur Analyse der Phasengrenzflächenverteilung.
- Untersuchungen mittels laserinduzierter Fluoreszenzthermometrie zur Analyse der Temperaturverteilung in der flüssigen Phase.

Simulationsvorhaben:

- Portierung der GUI von FLOWSIS nach OpenFOAM, sofern dies sinnvoll erscheint.
- Lastrechnungen und Validierung von Kondensationsmodellen der TU München mit OpenFOAM.
- Lastrechnung der Strömungsverteilung an der Injektionsdüse mit OpenFOAM.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

I. Goibrzuch: Numerische Simulation der Wellenbildung bei Schichtenströmungen in Rohrleitungen mit OpenFOAM, Bachelor-Arbeit, TU Hamburg-Harburg 2012

J. Prüßner: Experimentelle Untersuchungen von thermohydraulischen Zweiphasenströmungen bei kondensationsinduzierten Druckstößen, Diplomarbeit, TU Hamburg-Harburg 2012

Vortrag und Postervorstellung im Rahmen der Fachtagung der KTG 2012: Optische Untersuchungen von kondensationsinduzierten Druckstößen, C. Urban, M. Schlüter, 11.10.2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 011E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 216.560,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Macián-Juan	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundprojekts CIWA werden Modellentwicklungen zur Berechnung von Direkt-Kondensationsvorgängen (CIWH) sowie experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Das Vorhabenziel ist u. a. die Bereitstellung eines experimentell validierten und wissenschaftlich fundierten Berechnungsmodells, das fluiddynamische Belastungen aus CIWH abdeckend ermittelt. Hierfür erfolgt eine qualifizierende Bewertung des Programmmoduls für die Anwendung in der kerntechnischen Überwachung und erlaubt die Entwicklung von Bewertungskriterien nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

Die Zusammenarbeit erfolgt mit dem Fraunhofer UMSICHT, der technischen Universität München, der technischen Universität Hamburg-Harburg, der Bundeswehruniversität München sowie der TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP3:

Die Validierung des Hybridmodells für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten basierend auf die Oberflächenenergieerneuerungstheorie wurde weitergeführt. Die Entscheidung ob große oder kleine Wellen für die Wärmeabfuhr, von der Wasseroberfläche Richtung Fluidinnere, zuständig sind, anhand der turbulente Reynoldszahl, erwies sich als zutreffend. Die von uns in dem Systemcode ATHLET 22A implementierte Version des Hybrid-Modells zeigte in der Nachrechnung, der an der ungarischen PMK2-Versuchsanlage durchgeführten Experimente, gute Ergebnisse. Die 1D-Nachrechnungen der insgesamt 33 Versuche, wiedergaben in 28 der Fälle ein ähnliches Verhalten wie in den Experimenten. Zusätzlich wurden quasi-2D Simulationen der Anlage mit dem Systemcode durchgeführt durch eine geschickte Anordnung von 1D-Komponenten.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3:

In diesem Halbjahr wurden hauptsächlich an der Implementierung und Optimierung des Hybrid-Modells in 1D gearbeitet. Das ursprüngliche Hybrid-Wärmeübergangsmodell wurde für CFD-Programme entwickelt und musste für die Implementierung in dem Systemcode ATHLET 22A angepasst werden. Erste Validierungsrechnungen der ungarischen PMK2 Versuchsanlage mit dem neuen System, gebildet aus ATHLET und das neuentwickelte Hybrid-Oberflächenenerneuerungsmodell, zeigten ein robustes Verhalten des Codes. Die Trennung zwischen den zwei einzelnen Oberflächenenerneuerungsmodelle anhand der turbulenten Reynolds beweist sich als richtig.

Es wurden alle 33 Experimente der Versuchsanlage aus Budapest mit dem veränderten ATHLET Systemcode nachgerechnet. In 19 Simulationen, der insgesamt 24 Experimente in denen Druckstöße auftraten, wurden Druckspitzen vom veränderten Systemcode vorhergesagt. Die Druckamplitude war in den Simulationen kleiner als in den Experimenten. In den 9 Versuchen wo keine Druckstöße im Experiment gemessen wurden traten auch in der Simulation keine auf.

Es wurden zusätzlich quasi-2D Simulationen mit ATHLET 22A durchgeführt, dabei wird die horizontale Teststrecke in mehreren parallelen Kanälen unterteilt und mit Querverbindungen gekoppelt. Das quasi-2D Modell wurde vorerst nur für die Nachrechnung des Experiments 05 benutzt da uns für diesen Fall detaillierte Daten zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse der quasi 2D-Simulation waren denen der einfachen 1D-Simulation überlegen, dadurch dass sich die Strömung durch die verfügbare zweite Dimension schneller aufgrund der Kondensationsrate, von einer horizontal geschichteten Strömung zu einer Schwallströmung, mit Dampfblaseneinschluss, entwickelte und somit die Experimente besser reproduzieren konnte. Die Druckspitze höher als bei der Standard 1D-Simulation und die Vorhersage des Druckstoßzeitpunkts war genauer. Die Druckstossamplitude war in allen Simulationen niedriger als in den Experimenten. Die Ursache dafür ist die unzureichende Beschleunigung des Wasserschwalls aufgrund der Kondensation. Bessere Modellierungsmethoden der turbulenten kinetischen Energie und der Wirbeldissipationsrate sollen hierbei untersucht werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Der Validierungsprozess des Hybrid-Oberflächenenerneuerungsmodells wird anhand der von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Messdaten weitergeführt. Dabei soll das neue Modell gegen die experimentellen Messdaten der Verbundpartner verglichen werden. Im Falle der 1D-Simulation wird nach zusätzlichen Modelle für die Berechnung der turbulenzspezifischen Größen wie der turbulenten kinetischen Energie und der Wirbeldissipationsrate in der Literatur gesucht werden, da diese in 1D-Simulationen oder quasi-2D Simulationen nicht direkt berechnet werden können. Die Frage ob nicht beide Oberflächenenerneuerungsmodelle über einen Bereich der turbulenten Reynoldszahl gleichzeitig benutzt werden sollen bleibt weiterhin offen, dafür sollen Studien durchgeführt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Es wurden zwei Konferenzbeiträge an die kommende NURETH 15 und ICONE21 zugeschickt. Ein Vortrag der im Rahmen des KTG-Fachtags Fluidodynamik 2012 in Oktober in Dresden gehalten wurde, ist anschließend für die Veröffentlichung in der deutschen Zeitschrift Kerntechnik ausgearbeitet worden.

Hammer: New Approaches for Heat, Mass and Momentum Transfer“ auf derselben Konferenz mit.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 018A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt A: Einsatz von Soft Computing-Methoden für die Kernzustandsdiagnose		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 649.368,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kratzsch	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung eines Messverfahrens zur Erkennung der Füllstandsabsenkung und des Einsetzens einer Kernschmelze bei schweren Störfällen in Leichtwasserreaktoren.

Die Ziele des Teilprojektes sind der Aufbau eines Kleinversuchsstandes sowie die Entwicklung von Methoden und Algorithmen zur Identifikation signifikanter Zustandsänderungen des Reaktorkerns. Mit Hilfe des Kleinversuchsstandes wird eine umfassende Daten- und Wissensbasis generiert und die Untersuchung unterschiedlicher Anordnungen von Strahlungsdetektoren um ein sich änderndes Gammastrahlungsfeld durchgeführt. Ausgehend von der erzeugten Daten- und Wissensbasis sind die Methoden und Algorithmen zur Zustandsüberwachung eines Reaktorkerns zu entwickeln und anzupassen. Hierbei liegt der Schwerpunkt in der Weiterentwicklung von Kriterien zur verbesserten physikalischen Verifikation von Algorithmen/Modellen auf Grundlage von Soft-Computing-Methoden. Die entwickelten Methoden und Algorithmen werden mit Hilfe des Kleinversuchsstandes und mittels ausgewählter Strahlungstransportrechnungen (Teilprojekt des Verbundpartners TU Dresden: 02NUK018B) analysiert und validiert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1.1: Einarbeitung in die Problemstellung - Kernschmelze  
Recherchearbeiten zum Ablauf von Kernschmelzunfällen sowie zu vorhandenen Strahlungstransportrechnungen. Die Recherchearbeiten erfolgen in Kooperation mit dem Projektpartner und dienen dem Ableiten von Anforderungen an die durchzuführenden Strahlungstransportrechnungen beim Projektpartner sowie der Auslegung des Versuchsstandes.
- AP1.2: Einarbeitung in die Problemstellung – Signalverarbeitung/Messtechnik  
Recherchen zum Stand von Wissenschaft und Technik zu den Themen „Soft Computing“, „Signalverarbeitung“ und „Strahlungsmesstechnik“ sowie Analyse bisheriger Methoden zur physikalischen Verifikation von Modellen/Algorithmen des Soft Computing.
- AP1.3: Entwurf und Aufbau des Kleinversuchsstandes  
Durchführung von Auslegungsrechnungen und –simulationen für den Kleinversuchsstand sowie Einarbeitung in die Richtlinien des Strahlenschutzes. Des Weiteren Planung, Aufbau und Inbetriebnahme des Kleinversuchsstandes.
- AP1.4: Algorithmenentwicklung zur Zustandsüberwachung  
Analyse und Auswahl in Frage kommender Methoden des Soft Computing. Weiterhin Planung und Durchführung von Experimenten zum Aufbau einer Datenbasis und darauffolgend die Entwicklung von Algorithmen zur Zustandsbewertung von Reaktorkernen. Im Anschluss erfolgt die Entwicklung und Anpassung der Kriterien zur verbesserten physikalischen Verifikation von Soft-Computing-Algorithmen sowie der Nachweis der Funktion der entwickelten Algorithmen anhand experimenteller Daten und Strahlungstransportrechnungen.
- AP1.5: Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Kernschmelzunfälle haben stets als Vorbedingung ein auslösendes Ereignis. Abhängig vom auslösenden Ereignis wird zwischen einem Kernschmelzunfall im Niederdruckpfad (ND-Pfad) oder einem Kernschmelzunfall im Hochdruckpfad (HD-Pfad) unterschieden. Die Vorbedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf eines Kernschmelzunfalls. Ist das auslösende Ereignis nicht kontrollierbar, folgt der Beginn des Kernschmelzunfalls. Der Ablauf gliedert sich in vier Phasen. Hierbei kommt es von der Kernaufheizung über die Verlagerung von Kernmaterialien in die RDB-Bodenkalotte zu einem Aufschmelzen des Reaktordruckbehälters. Das Ende eines Kernschmelzunfalls bildet die Verlagerung von Kernmaterialien in das Containment eines KKW sowie bei einem Überdruckversagen des Containments die Spaltproduktfreisetzung an die Umwelt. Für die projektrelevanten Phasen eines Kernschmelzunfalls (Phasen im Reaktordruckbehälter) wurden signifikante Zustände erarbeitet, die die wesentlichen Kernzerstörungen und das damit verbundene Spaltproduktverhalten beschreiben. Bei der Erarbeitung der signifikanten Zustände wurde zwischen einem Wiederfluten bzw. Nichtwiederfluten des Reaktordruckbehälters während eines Kernschmelzunfalls unterschieden.
- Bei der Recherche zu Strahlentransportrechnungen wurde der Schwerpunkt auf einfache physikalische Modelle gelegt, die eine schnelle Abschätzung zur Gammastrahlungsverteilung liefern. Im Projekt „Nichtinvasive Zustandsüberwachung an SWR (NZÜ)“ (BMW gefördertes Vorhaben: 150 1248) wurde ein Gammastrahlungsverteilungsmodell erstellt. Das zugrundeliegende physikalische Modell basiert auf der Strahlungsschwächungsberechnung unter Annahme der Gammastrahlungsabsorption. Entstehende Streustrahlungen aus dem Compton- und Paarbildungseffekt werden nicht berücksichtigt, da diese nur mit einer Monte-Carlo-Berechnung möglich sind. Das Modell dient als Grundlage für die Auslegung des geplanten Versuchsstands und wird im Arbeitspunkt 1.3 angepasst bzw. weiterentwickelt.
- AP1.3: Aufbauend auf dem vorliegenden Gammastrahlungsmodell des Projektes NZÜ wurde ein Anforderungsprofil in Form eines Lastenheftes „Ein handliches Modell für die Simulation von Strahlentransport/Gammaverteilungen“ erstellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: Ausgehend von den bisherigen Ergebnissen zu Kernschmelzunfällen sind die signifikanten Zustände übergeordneten Kernschmelzszenarien zuzuordnen. Zwischen den Kernschmelzszenarien sind Unterschiede und Gemeinsamkeiten (z. B. Kernzerstörungen, Spaltproduktverhalten) zu definieren. Mit Hilfe der erarbeiteten Erkenntnisse können Aussagen bezüglich messtechnisch zu erfassenden Größen sowie zur Anordnung des nichtinvasiven Messsystems um einen RDB getroffen werden.
- AP1.2: Recherchen zum Stand von Wissenschaft und Technik zu den Themen „Soft Computing“, „Signalverarbeitung“ und „Strahlungsmesstechnik“ sowie Analyse bisheriger Methoden zur physikalischen Verifikation von Modellen/Algorithmen des Soft Computing.
- AP1.3: Das erstellte Lastenheft „Ein handliches Modell für die Simulation von Strahlentransport/Gammaverteilungen“ bildet die Grundlage für die programmtechnische Erstellung einer neuen Funktionsblockbibliothek für das Simulationssystem „DynStar“. Damit können Strahlentransportrechnungen und Gammastrahlungsverteilungen für verschiedene Versuchsanordnungen durchgeführt werden, um Schlussfolgerungen für den Versuchsstands Aufbau zu erhalten. Es erfolgt eine weitere Einarbeitung in die Richtlinien des Strahlenschutzes und Planung, Aufbau und Inbetriebnahme des Kleinversuchsstands.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Schmidt, C. Brachem: Kernzustandsdiagnose, Verbundposter, Doktorandenseminar Kompetenzzentrum Ost für Kerntechnik 2012, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 018B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt B: Berechnung von Gammastrahlungsfeldern des Reaktorkerns zur nichtinvasiven Zustandsüberwachung		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 363.588,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hampel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Es soll ein Verfahren entwickelt werden, um bei schweren Störfällen in Leichtwasserreaktoren mittels nichtinvasiver Messung der Gammastrahlungsverteilung außerhalb des RDB eine Absenkung des Kühlmittelstandes und das Einsetzen der Kernschmelze detektieren zu können.

Durch Monte-Carlo-Simulation der Gammastrahlungsverteilungen für einen intakten Kern mit verschiedenen Kühlmittelfüllständen einerseits und für einen in verschiedenen Maßen deformierten Kern andererseits, begleitet von einer Berechnung der Strahlung durch Spaltprodukte und Aktivierung der Komponenten, sollen eine geeignete Detektoranordnung für ein hypothetisches Messsystem sowie Kriterien zur Bewertung des Kernzustandes abgeleitet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1.1: Einarbeitung in MCNP; Literaturstudien
- AP1.2: Implementierung hinreichend detaillierter und rechentechnisch realisierbarer geometrischer Modelle für Reaktorkern bzw. RDB; Modellierung von Zuständen eines deformierten bzw. (teil)geschmolzenen Kerns; Definition von Detektoren
- AP1.3: Monte-Carlo-Rechnungen und Sensitivitätsanalysen zur Erkennung einer Füllstandsabsenkung im Kern bzw. einer Kerndeformation
- AP1.4: Instrumentierungsvorschläge und inverses Problem: Ableitung optimaler Detektoranordnungen; Berechnung der Quellverteilung aus Detektormesswerten
- AP1.5: Abschlussbericht zur Dokumentation der Ergebnisse

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Die Einarbeitung in die Bedienung von MCNP (Geometriedefinition, Erstellen diverser Quellverteilungen und Detektoranordnungen) sowie in varianzreduzierende Methoden verlief zufriedenstellend und ist zu großen Teilen abgeschlossen.  
Es wurden ebenfalls in großem Umfang Literaturstudien durchgeführt, die aber natürlich, da sich über den gesamten Zeitraum des Vorhabens neue Erkenntnisse in der Forschung ergeben könnten, kontinuierlich in geringerem Umfang weiter geführt werden müssen.
- AP1.2: Es wurde mit der Erstellung eines ersten, detaillierten RDB-Rechenmodells mit einem intakten Kern begonnen.  
Derzeit werden Berechnungen zu Störfallabläufen durchgeführt, aus denen sich der Zeitverlauf einer Füllstandsabsenkung des Kühlmittels und Modelle für die Kerndeformation ableiten lassen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: Weitere gezielte Literaturrecherche nach möglichen ähnlichen Projekten, die sich mit Gammastrahlungsmessungen, Zustandsrekonstruktion aus Messwerten oder Zustandüberwachung von Kernreaktoren (insbesondere nichtinvasive Verfahren) befassen.
- AP1.2: Fertigstellung des detaillierten RDB-Rechenmodells. Anschließend muss untersucht werden, ob das Modell bezüglich der Rechenzeitansprüche geeignet ist für ausführliche Monte-Carlo-Rechnungen und wie sich das Modell ggf. mit einem möglichst geringen Verlust von Genauigkeit vereinfachen lässt.  
Weiter sollen möglichst generische, in Störfällen auftretende, Zustände für den Reaktorkern einerseits im intakten Zustand (mit verschiedenen Füllständen) und andererseits in verschiedenen deformierten Zuständen definiert werden, um diese Zustände in MCNP modellieren zu können.
- AP1.3: Mit dem RDB-Rechenmodell sollen erste Strahlungsfeldberechnungen durchgeführt werden, um eine räumliche Verteilung der Gammastrahlung zu erhalten, aus der sich wiederum Ansatzpunkte für weitere Berechnungen ergeben (z. B. für eine mögliche Positionierung von Detektoren).  
Zusätzlich soll die Aktivierung der Reaktorkomponenten berechnet werden, um den Strahlungshintergrund in einer möglichen Detektoranordnung abschätzen zu können.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Schmidt, C. Brachem: Kernzustandsdiagnose, Verbundposter, Kompetenzzentrum Ost für Kerntechnik 2012, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 2012.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 022A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung inno- vativer Extinktionsphotometrie		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 681.684,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Allelein	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Verbundprojektes ist die Verbesserung der messtechnischen Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und der Feuchtemessung unter den anspruchsvollen Randbedingungen bei Versuchen mit Bezug zur Reaktorsicherheit. Gleichzeitig wird durch die Verbundstruktur aus Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen durch die qualifizierte interdisziplinäre Ausbildung von Doktoranden/innen ein signifikanter Beitrag zum Kompetenzerhalt in Form einer praxisnahen Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern geleistet. Die ins Auge gefasste Entwicklung innovativer Messtechnik soll dazu beitragen, die in der Reaktorsicherheitsforschung mittelfristig vorgesehenen Versuche zum radiologischen Quellterm und zu komplexen Strömungen in der 3D-Geometrie eines LWR-Sicherheitsbehälters auch in Anwesenheit einer Wasserphase mit höherem Detaillierungsgrad zu analysieren, um so die entsprechenden Modelle weiterentwickeln zu können.

Im Rahmen dieses Teilprojektes werden neben der Gesamtkoordination Versuchseinrichtungen zur Qualifizierung der im Rahmen des Verbundprojektes entwickelten Messsysteme geplant und errichtet. Mit Hilfe der Experimente werden die entsprechenden Messdaten gewonnen, die es erlauben zu beurteilen, ob die in den anderen Teilprojekten entwickelten Messsysteme die jeweiligen Zielspezifikationen erfüllen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Berichtszeitraum waren als Einzelaufgaben die Bereitstellung eines Zweikomponenten-Referenzaerosols, die Erarbeitung der Gesamtkonzeption, die Erstellung der Zielspezifikationen und die Koordination des Gesamtprojektes zu bearbeiten.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Im Berichtszeitraum wurde ein Entwurf für die Zielspezifikation erstellt.

Zur Koordination des Projektes wurden zwei zweitägige Projekttreffen abgehalten. Eines der beiden diente dabei zur Vorbereitung des Entwurfes für die Zielspezifikationen. Zur besseren Koordination wurde ein Netzplan erstellt.

Für die Charakterisierung des Zweikomponenten-Referenzaerosols wurden die bestehenden konventionellen Messgeräte (APS, SMPS) zur Aerosolbestimmung an den Hersteller zur Kalibrierung und Wartung gesendet. Zum Ende des Berichtszeitraumes standen diese aber noch nicht wieder zur Verfügung. Mit der Herstellung eines Referenzaerosols wurde begonnen.

Die Diskussion über die Zielspezifikationen hat gezeigt, dass der für die Qualifizierung der zu entwickelnden Geräte vorgesehene Kleinversuchsstand komplexer sein muss als ursprünglich angenommen. Deshalb wurde –früher als im Zeitplan vorgesehen– bereits im Berichtszeitraum mit seiner Auslegung begonnen. Ein Angebot für die Erweiterung des bestehenden Messdatenerfassungssystems wurde eingeholt und ein Angebot beauftragt. Zur besseren Planung des Behälters musste in diesem Zeitraum auch schon eine Marktanalyse für die konventionelle Messtechnik durchgeführt werden. Erste Vergleichsangebote liegen für unterschiedliche Systeme (z. B. Temperatur und Druck) vor. Auslegung des Behälters und seine Instrumentierung sind letztlich ein iterativer Prozess.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im kommenden Berichtszeitraum liegt der Fokus der Arbeiten auf der Detailplanung, Fertigung und Auslieferung des Kleinversuchsstandes. Dafür muss neben dem Behälter auch die handelsübliche Messtechnik bestellt und ausgeliefert werden, sodass sie dann in den Behälter installiert werden kann. Die Detailplanung und Fertigung aller Zu- und Abführungen am Behälter muss im kommenden Berichtszeitraum abgeschlossen werden. Eine weitere Einzelaufgabe ist die Auslegung der Behälterheizung samt Beschaffung und Auslieferung.

Die Dokumentation der Zielspezifikationen wird im kommenden Berichtszeitraum abgeschlossen.

Ein weiterer wichtiger Arbeitspunkt betrifft die Herstellung eines möglichst reproduzierbaren Zweikomponenten-Referenzaerosols aus  $\text{SnO}_2$  und  $\text{CsI}$ .

Konzentrationspektren aus vorherigen Versuchen werden aufbereitet und den Projektpartnern zur Validierung des erweiterten Auswertalgorithmus zur Verfügung gestellt.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Hansastr. 27c, 80686 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 022B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt B: Extinktionsspektrometer zur Feuchtemessung in gemischtphasigen Systemen für die nukleare Sicherheitsforschung		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 605.403,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Giel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Verbundprojektes ist die Verbesserung der messtechnischen Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und der Feuchtemessung unter den anspruchsvollen Randbedingungen bei Versuchen mit Bezug zur Reaktorsicherheit. Gleichzeitig wird durch die Verbundstruktur aus Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen durch die qualifizierte interdisziplinäre Ausbildung von Doktoranden/innen ein signifikanter Beitrag zum Kompetenzerhalt in Form einer praxisnahen Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern geleistet. Die ins Auge gefasste Entwicklung innovativer Messtechnik soll dazu beitragen, die in der Reaktorsicherheitsforschung mittelfristig vorgesehenen Versuche zum radiologischen Quellterm und zu komplexen Strömungen in der 3D-Geometrie eines LWR-Sicherheitsbehälters auch in Anwesenheit einer Wasserphase mit höherem Detaillierungsgrad zu analysieren, um so die entsprechenden Modelle weiterentwickeln zu können.

Für das IPM besteht das Projektziel zum einen in der spektralen Erweiterung des bestehenden Aerosolspektrometers (FASP) und zum anderen im Aufbau und Inbetriebnahme eines Feuchtemessgerätes mit Mehrphasenmesskopf zur Messung der relativen Feuchte auf Basis der Extinktionsphotometrie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Berichtszeitraum ging es um die Erfassung der notwendigen Änderungen für die spektrale Erweiterung des FASP Gerätes. Dazu gehören das Überarbeiten der vorhandenen Optikkomponenten (Spiegel, Prisma,...), der Elektronik und der Einbau eines zusätzlichen Detektors.

Das Konzept für ein Messgerät zur Messung der relativen Feuchte soll aufgestellt werden und die Zielspezifikationen für beide Geräte bis zum März 2013 ausgearbeitet werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen der im Arbeitspaket 1 festgelegten Arbeiten wurde die Konzeption für die spektrale Erweiterung des bestehenden Gerätes weiter vorangetrieben. In seinem jetzigen Aufbau kann das FASP Gerät bis zu einer Wellenlänge von 800nm messen. Diese Grenze wird im Wesentlichen vom verwendeten InGaAs-Detektor vorgegeben. Um auch den kurzwelligen Bereich auszuwerten, ist in erster Linie ein zweiter Detektor notwendig. Der Si-Detektor C10439-01 von Hamamatsu hat einen Wellenlängenbereich von 190 nm bis 1100 nm. Damit ergibt sich ein ausreichender Überlapp mit dem vorhandenen Detektor. Um das zweite Detektorsignal erfassen zu können wurde die bisherige einkanalige Elektronik zu einer zweikanaligen Version modifiziert. Da die Konzeption aber noch nicht vollständig abgeschlossen ist, wurde noch keine Fertigung der Elektronik veranlasst. Ebenso ist es notwendig, die vorhandenen Goldspiegel durch Silberspiegel zu ersetzen, da die Reflektivität im kurzwelligen Bereich stark abnimmt. Es wurden Recherchen durchgeführt, wo man vorhandene Spiegel mit Silber beschichten lassen kann. Das Spektrum wird im Gerät motorisch durchgestimmt und muss (mechanisch) neu angepasst werden. Parallel dazu wurde die Bestellung für ein neues Paar Fasern veranlasst. Die notwendigen Endstücke (Ferule) wurden gefertigt und sind dem Faserhersteller zugestellt worden.

Ein anderer Arbeitsschritt beinhaltet die Bestimmung der geringstmöglichen Konzentration bzw. Konzentrationsänderung des bestehenden Gerätes. Dazu wurde eine Messung ohne angeschlossenen Messkopf durchgeführt. Ziel war es, eine Aussage über die Qualität des Messsignals (Rauschen) zu erhalten und damit auf die Genauigkeit bzw. Präzision des Gerätes zu schließen. Nach ersten Abschätzungen liegt die Präzision des Messsignals bei +/-0,25 %. Die Auswertung ist noch nicht abgeschlossen.

Entsprechend Arbeitspaket 2 wurde die bestehende Auswertesoftware des IPM an CCES übergeben und damit auf Basis eines gegebenen Datensatzes eine Größenverteilung berechnet.

Die Konzeption des SteamFASP (Arbeitspaket 4) wurde angefangen und es kristallisierten sich erste Spezifikationen heraus. Der Wellenlängenbereich wurde vorerst auf 900 nm bis 1700 nm festgelegt, da sich in diesem Bereich viele Wasserabsorptionslinien befinden. Erste theoretische Berechnungen wurden hinsichtlich der notwendigen spektralen Auflösung, Lichtquelle und Detektor durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die nächsten Schritte bestehen in der Bestellung weiterer Komponenten z. B. Leiterplatten, Bauteile, beschichtete Spiegel und dem eigentlichen Umbau des Gerätes. Daneben werden die notwendigen mechanischen Komponenten konstruiert und gefertigt. Parallel dazu wird die Firmware der Elektronik an den zweiten Detektor angepasst. Danach wird die Funktion der einzelnen Baugruppen im IPM getestet. Das modifizierte Gerät wird nach dem derzeitigen Zeitplan zum Meilenstein M18 (Ende 2013) für erste Messungen zur Verfügung stehen.

Das Konzept des SteamFASP wird weiter bearbeitet und soll bis Mitte 2013 abgeschlossen sein. Danach werden die Schlüsselkomponenten bestellt und das SteamFASP zusammengebaut. Mitte 2014 soll dann ein erster Prototyp für Labormessungen zur Verfügung stehen. Zum Meilenstein M9 im März 2013 werden im Rahmen eines weiteren Projekttreffens die Spezifikationen beider Geräte festgelegt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 022C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt C: Entwicklung eines ef- fizienten Auswertalgorithmus zur Mie-Inversion		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 280.116,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Frank	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Verbundprojektes ist die Verbesserung der messtechnischen Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und der Feuchtemessung unter den anspruchsvollen Randbedingungen bei Versuchen mit Bezug zur Reaktorsicherheit. Gleichzeitig wird durch die Verbundstruktur aus Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen durch die qualifizierte interdisziplinäre Ausbildung von Doktoranden/innen ein signifikanter Beitrag zum Kompetenzerhalt in Form einer praxisnahen Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern geleistet. Die ins Auge gefasste Entwicklung innovativer Messtechnik soll dazu beitragen, die in der Reaktorsicherheitsforschung mittelfristig vorgesehenen Versuche zum radiologischen Quellterm und zu komplexen Strömungen in der 3D-Geometrie eines LWR-Sicherheitsbehälters auch in Anwesenheit einer Wasserphase mit höherem Detaillierungsgrad zu analysieren, um so die entsprechenden Modelle weiterentwickeln zu können.

Thema des Teilvorhabens ist die Entwicklung einer verbesserten, innovativen Messtechnik auf Basis der Extinktionsphotometrie zur Analyse nicht-sphärischer Mehrkomponenten-Aerosole. Es sollen verbesserte Algorithmen für die Bestimmung von Materialeigenschaften aus gemessenen Spektren (Mie-Inversion) entwickelt und in Software umgesetzt werden. Als wesentliche Verbesserung gegenüber dem bisherigen Stand der Technik soll die Software ohne das Zutun eines geschulten Bedieners physikalisch korrekte Spektren ausgeben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

In einem ersten Schritt soll die Stabilisierung vorhandener Inversions-Algorithmen untersucht werden. Zur Beantwortung dieser Frage gibt es allgemeine Vorgehensweisen aus der Theorie inverser Probleme, die hier angewandt werden sollen. Weiterhin soll eine Erweiterung der Mie-Theorie auf andere Partikelformen untersucht werden. Das herkömmliche Verfahren der Mie-Inversion setzt sphärische Symmetrie voraus, die im vorliegenden Problem nicht für alle Aerosol-Bestandteile gegeben ist. Zuletzt sollen bekannte Störeinflüsse gesondert in Inversionsalgorithmen betrachtet werden.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Notwendig für das Projekt ist die Entwicklung eines verbesserten Auswertalgorithmus. In erster Linie soll dieser aus Messungen mittels Mie-Inversion automatisch ohne Zutun eines geschulten Anwenders stabil Größenverteilungen von Aerosolpartikeln berechnen. Dies soll in einem zweiten Schritt die Identifikation von Zweikomponentenaerosolen ermöglichen.

Die bisherige Arbeit umfasste eine Bestandsaufnahme. Dazu zählte neben einer allgemeinen Literaturrecherche eine Einarbeitung in eine vom Projektpartner Fraunhofer IPM erstellte Mie-Inversions-Software. Diese Software liegt als Matlab-Quellcode vor. Mit Hilfe übergebener Messwerte konnte ein Beispiel-Lauf der Software durchgeführt werden. Weiterhin wurde ein Dokument erstellt, das die verwendeten mathematischen Methoden beschreibt, Details der Implementierung enthält und den Zusammenhang zur Literatur herstellt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Als nächster Schritt sind zunächst Rechnungen mit der vorhandenen Software im Hinblick auf die Wahl des Regularisierungsparameters vorgesehen, damit anschließend einfache Strategien zur Stabilisierung entwickelt und implementiert werden können. Die Tests sollen anhand des vorhandenen Beispieldatensatzes durchgeführt werden. Weiterhin sind Validierungen mit anderen Mie-Inversions-Implementierungen vorgesehen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 022D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 427.668,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Dreizler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Gesamtziel des Verbundprojektes ist die Verbesserung der messtechnischen Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und der Feuchtemessung unter den anspruchsvollen Randbedingungen bei Versuchen mit Bezug zur Reaktorsicherheit. Gleichzeitig wird durch die Verbundstruktur aus Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen durch die qualifizierte interdisziplinäre Ausbildung von Doktoranden/innen ein signifikanter Beitrag zum Kompetenzerhalt in Form einer praxisnahen Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern geleistet. Die ins Auge gefasste Entwicklung innovativer Messtechnik soll dazu beitragen, die in der Reaktorsicherheitsforschung mittelfristig vorgesehenen Versuche zum radiologischen Quellterm und zu komplexen Strömungen in der 3D-Geometrie eines LWR-Sicherheitsbehälters auch in Anwesenheit einer Wasserphase mit höherem Detaillierungsgrad zu analysieren, um so die entsprechenden Modelle weiterentwickeln zu können.

Ziel des Teilvorhabens D ist die Weiterentwicklung der TDLAS-Technologie für die Anwendung in der nuklearen Sicherheitsforschung. Es wird daher ein robuster, selbstkalibrierender TDL-Feuchtesensor für die Forschungsaufgaben in der Reaktorsicherheit entwickeln.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Es wird ein selbstkalibrierendes, absorptionsspektroskopisches TDL-Spektrometer zum absoluten Nachweis von gasförmigem Wasser entwickelt. Die vorgesehenen Arbeiten zielen auf die Adaption (Linienselektion, spektrale Charakterisierung) der TDLAS zur absoluten Quantifizierung gasförmigen Wassers in einem reinen Gasphasensystem als auch in gemischtphasigen Systemen bei Koexistenz gasförmigen und flüssigen Wassers. Die Messtechnik soll einen großen Dynamikumfang besitzen und sowohl bei niedrigen als auch hohen relativen Feuchten einsetzbar sein (Design des Lasersensorkopfes). In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wird der Einfluss von Störspektren untersucht. In ersten Vergleichsmessungen an kleinskaligen Laborsystemen werden die unterschiedlichen technologischen Ansätze zur absoluten H<sub>2</sub>O-g-Bestimmung (d. h. Steam-FASP und TDLAS) qualitativ und quantitativ gegenübergestellt werden.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Nach Ausarbeitung der Zielvereinbarung und Definition der detaillierten Zielvorgaben wurde mit der Selektion geeigneter Absorptionslinien begonnen. Anhand der Vorgaben zu Druck-, Temperatur- und Konzentrationsbereichen während einer Störfallsimulation wurden Spektrum mittels Parametervariation für verschieden Szenarien berechnet. Derzeit laufende detailliertere Linienspezifikation auf Basis einer feineren Parametervariation. Parallel hierzu wurden bereits verschiedene Sensorkopf-Konzepte erstellt und generisch in Laboraufbauten untersucht. Auf dieser Basis wurde ein Design selektiert und der Detailierungsgrad der Konstruktion erhöht. Erste Beschaffungen zum Aufbau des Gesamt-Hygrometers wurden getätigt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Es ist geplant in den nächsten Wochen die Linienselektion abzuschließen um einen passenden Laser zu beschaffen. Die Konstruktion eines Sensorkopf-Prototypen wird weitergeführt um nach Fertigung der ersten Komponenten weitere Laborversuche zur Optikintegration und Kopplung durchzuführen. Es ist geplant anhand des Prototypen erste Charakterisierung zur erreichbaren Sensitivitäten sowie zur Stabilität der optischen Laserlicht-Einkopplung durchzuführen. Hierzu wird bereits das Grundspektrometer, inklusive der wichtigen Steuereinheiten und messtechnisch notwendigen Elektronik aufgebaut.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 023A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt A: Untersuchung der Wirbelbildung in Pumpenzulaufbecken und der Auswirkung von Gasmitriss auf nachfolgende Anlagenkomponenten		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2012 bis 31.05.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.12.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 781.530,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schlüter	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Bereitstellung von verbesserten bzw. neuen Berechnungsgleichungen sowie von Auslegungsempfehlungen zur Vermeidung von Gasmitriss in Pumpenzuläufen. Da sich ein Gasmitriss nicht immer konstruktiv ausschließen lässt, erfolgt darüber hinaus die Beschreibung des Gasmitrisses in Pumpenzuläufen und des hieraus resultierenden Einfluss auf Kreiselpumpe und Armaturen. Dafür sollen theoretische Modelle entwickelt, experimentell an groß- und kleindimensionierten Anlagenkomponenten validiert und ggf. mit physikalisch begründeten Ansätzen (z. B. lokal unterschiedliche Turbulenzmodelle) an reale Prozesse angepasst werden. Neben technischen Zielen werden mit dem beantragten Projekt auch aktuelle gesellschaftspolitische Ziele verfolgt, da Nachwuchskräfte für den sicheren Betrieb kerntechnischer Anlagen ausgebildet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturrecherche
- AP2: Planung und Aufbau der Versuchsanlagen
- AP3: Experimentelle Versuche im TUHH-Technikum
- AP4: Experimentelle Versuche im HZDR-Labor
- AP5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen
- AP6: Modellbildung
- AP7: Numerische Simulation der Strömungsphänomene
- AP8: Ergebnisverwertung

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- Die zur Projektbearbeitung vorgesehene Personalstelle wurde ausgeschrieben und wird ab Februar 2013 mit Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Steffen Richter besetzt.
- Eine Einladung zum Kick-Off Meeting wurde an die Projektpartner versendet.
- Es wurde eine Aufteilung der Bereiche zur Literaturrecherche vorgenommen. Diese wird den Projektpartnern auf dem Kick-Off Meeting vorgestellt.
- Diverse Investitionsgegenstände wurden bestellt und in Empfang genommen.
- In Zusammenarbeit mit externen Unternehmen wurden Vorabdimensionierungen für das Pumpenansaugbecken getroffen.
- In Zusammenarbeit mit der KSB Aktiengesellschaft (Kreiselpumpenabteilung) wurde eine Pumpe für den Versuchsaufbau an der TUHH ausgesucht.
- Eine Versuchsfläche an der TU Hamburg-Harburg wurde gefunden und wird derzeit für die Versuchsanlage vorbereitet.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Gemäß den Angaben aus dem Balkenplan des Antrags werden im nächsten Berichtszeitraum folgende Arbeiten durchgeführt:

- Literaturrecherche zu Versuchs- und Modelldaten
- Aufbau einer Modelldatenbank
- Teilweiser Aufbau der Versuchsanlage
- Koordination des eigenen Versuchsanlagenaufbaus mit denen der Projektpartner
- In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern werden Betriebsparameter für die Erarbeitung von Testmatrizen zusammengestellt.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. v., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 023B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt B: Untersuchung von Zweiphasenströmungen in einer Kreiselpumpe und in Armaturen mittels tomographischer Bildgebungsverfahren		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2012 bis 31.05.2016		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.12.2012 bis 31.12.2012
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 513.320,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hampel

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Bereitstellung von verbesserten bzw. neuen Berechnungsgleichungen sowie von Auslegungsempfehlungen zur Vermeidung von Gasmitriss in Pumpenzuläufen. Da sich ein Gasmitriss nicht immer konstruktiv ausschließen lässt, erfolgt darüber hinaus die Beschreibung des Gasmitrisses in Pumpenzuläufen und des hieraus resultierenden Einfluss auf Kreiselpumpe und Armaturen. Dafür sollen theoretische Modelle entwickelt, experimentell an groß- und kleindimensionierten Anlagenkomponenten validiert und ggf. mit physikalisch begründeten Ansätzen (z. B. lokal unterschiedliche Turbulenzmodelle) an reale Prozesse angepasst werden. Neben technischen Zielen werden mit dem beantragten Projekt auch aktuelle gesellschaftspolitische Ziele verfolgt, da Nachwuchskräfte für den sicheren Betrieb kerntechnischer Anlagen ausgebildet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturrecherche
- AP2: Planung und Aufbau der Versuchsanlagen
- AP3: Experimentelle Versuche im TUHH-Technikum
- AP4: Experimentelle Versuche im HZDR-Labor
- AP5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen
- AP6: Modellbildung
- AP7: Numerische Simulation der Strömungsphänomene
- AP8: Ergebnisverwertung

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- AP1: Im Berichtszeitraum wurde mit der Literaturrecherche zu Vergleichsdaten und Modellen begonnen
- AP2: Es erfolgte die grundlegende Planung der modularen Laborversuchanlage welche für die experimentellen Versuche im HZDR-Labor eingesetzt werden wird und es wurde ein Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema der Anlage erstellt

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP1: weitere Literaturrecherche zu Vergleichsdaten und Modellen
- AP2: Erstellung von Konstruktionszeichnungen der modularen Laborversuchanlage  
Fertigung der Laborversuchsanlage  
Erarbeitung von Testmatrizen für die Durchführung der einzelnen Versuche
- AP4: Beginn der Algorithmenentwicklung
- AP6: Beginn der Modellbildung Anhand von Literaturdaten

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 023C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt C: Analytische Untersuchungen der Wirbelbildung in Pumpeneinläufen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2012 bis 31.05.2016		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.12.2012 bis 31.12.2012
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 443.808,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Schaffrath

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Bereitstellung von verbesserten bzw. neuen Berechnungsgleichungen sowie von Auslegungsempfehlungen zur Vermeidung von Gasmitriss in Pumpenzuläufen. Da sich ein Gasmitriss nicht immer konstruktiv ausschließen lässt, erfolgt darüber hinaus die Beschreibung des Gasmitrisses in Pumpenzuläufen und des hieraus resultierenden Einfluss auf Kreiselpumpe und Armaturen. Dafür sollen theoretische Modelle entwickelt, experimentell an groß- und kleindimensionierten Anlagenkomponenten validiert und ggf. mit physikalisch begründeten Ansätzen (z. B. lokal unterschiedliche Turbulenzmodelle) an reale Prozesse angepasst werden. Neben technischen Zielen werden mit dem beantragten Projekt auch aktuelle gesellschaftspolitische Ziele verfolgt, da Nachwuchskräfte für den sicheren Betrieb kerntechnischer Anlagen ausgebildet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturrecherche
- AP2: Planung und Aufbau der Versuchsanlagen
- AP3: Experimentelle Versuche im TUHH-Technikum
- AP4: Experimentelle Versuche im HZDR-Labor
- AP5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen
- AP6: Modellbildung
- AP7: Numerische Simulation der Strömungsphänomene
- AP8: Ergebnisverwertung

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Es wurden im Berichtszeitraum keine Arbeiten bei der TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG durchgeführt. Die Arbeiten haben planmäßig am 01.01.2013 begonnen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Gemäß den Angaben aus dem Balkenplan des Antrags werden im nächsten Berichtszeitraum folgende Arbeiten durchgeführt:

- AP1: Im nächsten Berichtszeitraum wird eine Literaturrecherche zu Vergleichsdaten und Modellen durchgeführt. Wir werden dafür die bei der TÜV NORD SysTec gewonnenen Erkenntnisse zu Versuchen mit unterschiedlich gestalteten Pumpeneinläufen und zu bestehenden Skalierungskonzepten für Modellversuche zusammentragen. Vervollständigt werden diese Daten mit den für kerntechnische Anwendungen repräsentativen Förderbedingungen. Weitere Schwerpunkte der Literaturrecherche sind wirbelmindernde bzw. -brechende Maßnahmen sowie Luftmitriss. Darüber hinaus werden wir die in der Literatur veröffentlichten analytischen Modelle, Auslegungsempfehlungen und Korrelationen bzgl. ihrer Einflussparameter auf die kritische Wasserüberdeckung auswerten.
- AP2: Bei der Planung und dem Aufbau der Versuchsanlagen werden wir uns bei der Erarbeitung von Testmatrizen beteiligen. Dabei werden wir die im AP1 gesammelten Erkenntnisse in die Planung einfließen lassen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> KSB Aktiengesellschaft, Johann-Klein-Str. 9, 67227 Frankenthal (Pfalz)		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 023D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt D: Experimentelle Qualifizierung von Armaturen unter Normal- und Störfallbedingungen zur Entwicklung verifizierter Methoden		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2012 bis 31.05.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.12.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.751.350,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Gietl	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Bereitstellung von verbesserten bzw. neuen Berechnungsgleichungen sowie von Auslegungsempfehlungen zur Vermeidung von Gasmitriss in Pumpenkreisläufen und des hieraus resultierenden Einfluss auf Kreiselpumpe und Armaturen. Dafür sollen theoretische Modelle entwickelt, und experimentell an groß- und kleindimensionierten Anlagenkomponenten validiert und ggf. mit physikalisch begründeten Ansätzen (z. B. lokal unterschiedliche Turbulenzmodelle) an reale Prozesse angepasst werden.

Der Projektverbund besteht aus den Projektpartnern TUHH, HZDR, TÜV Nord SysTec GmbH & Co. KG und der KSB Aktiengesellschaft.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Literaturrecherche zu Vergleichsdaten und Modellen

AP2: Erarbeitung von Testmatrizen im Rahmen der Planung und dem Aufbau von Versuchsanlagen

AP5: Experimentelle Untersuchung an Armaturen in verschiedenen Größenordnungen von typischen Industriearmaturen zur Untersuchung von unterschiedlichen Belastungsarten auf Schieber, Ventile und Rückschlagarmaturen

AP8: Ergebnisverwertung

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

#### AP5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen

Aufbauend auf bestehende Konstruktionen von Armaturen bei der KSB Aktiengesellschaft wurde an der Entwicklung der Versuchsträger gearbeitet. Für die Schieber kleiner und großer Nennweite, das Durchgangsventil, die Rückschlagklappe und das Kleinventil mit austauschbarem Sitz wurden die Konstruktionen angepasst und die Festigkeitsberechnungen erstellt.

Auch wurde an der Erstellung der Vorprüfunterlagen der beiden Schieber gearbeitet. Erste Dokumente, wie die Werkstoffliste, der Bauprüfplan, die Materialspezifikationen und die für die Fertigung erforderlichen Prüfanweisungen, wurden bei einem Zielkunden zur Genehmigung eingereicht.

Für den großen Schieber sind Vorversuche zur Panzerung, Schweißbarkeit und Nacharbeit der Führungsleiste eingeleitet worden. Auch sind für das Kleinventil mit austauschbarem Sitz Versuche zur Dichtheit des austauschbaren Sitzes durchgeführt worden.

Die Einzelteilzeichnungen der genannten Armaturen wurden erstellt und vorab mit der Fertigung abgestimmt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Planungen für das nächste Projekthalbjahr laufen gemäß den Planungen zum Zeitpunkt der Antragsstellung. Im Rahmen des AP1 soll eine Literaturrecherche zu Vergleichsdaten und Modellen erfolgen, um die Ergebnisse aus bereits durchgeführten experimentellen Untersuchungen an Armaturen zu nutzen.

Zur Planung und dem Aufbau der Versuchsanlagen (AP2) sollen die Testmatrizen für die geplanten Versuche erarbeitet werden. Zunächst werden die Anforderungen an die Prüflinge aus Spezifikationen und Regelwerken ermittelt und die Prüflinge so gewählt, dass damit das gesamte Armaturenprogramm qualifiziert wird. Dies erfordert die Abstimmung mit potentiellen Kunden, Betreibern und den Prüfsingenieuren des Testfelds.

Parallel zu der Erstellung der Testmatrizen soll an der Entwicklung der Versuchsträger gearbeitet werden (AP5). Dies umfasst die konstruktive Umsetzung, die Auslegungsberechnung sowie die Abstimmung des Designs mit den potentiellen Kunden und der Fertigung. Neben der endgültigen Festlegung des Aufbaus der Prototypen sollen die Vorprüfunterlagen erstellt und genehmigt werden. Nach Genehmigung der Dokumente soll mit der Fertigung der ersten Prüflinge begonnen werden.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 111F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Kooperationsprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 234.175,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Malcherek	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Phänomen Kondensationsstoß kann zu wesentlich höheren Druckspitzen führen als klassische Druckstöße, verursacht durch schnelles Schließen von Armaturen. Der Kondensationsstoß kann rechnerisch nur unzureichend modelliert werden, ferner ist es bisher nicht gelungen Systemcodes an Experimenten zu validieren.

Ziel ist es fundierte Datensätze zu erhalten, um so ein konservativ abschätzendes Modell mit akzeptablem Fehler zu erhalten.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Stand des Wissens zu Kondensationsschlägen

AP2: Experimente zu Kondensationsschlägen

AP3: Entwicklung eines Kondensationsschlagmodells

AP4: Implementierung und Validierung des Modells in DYVRO mod. 3

AP5: Software-Qualifizierung für kerntechnische Anwendungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Zusammenfassung neuer Literaturstellen, Zustellung Koordinator AP1; Präsentation der UniBw Anlage auf der KTG Fachtagung in Dresden/Rossendorf
- AP2: Aufbau der Versuchsanlage, TÜV Abnahme erfolgt, Installation und Kalibration der Messtechnik, Einsatz der Versuchsanlage für Praktikum, Durchführung von Vorversuchen, Versuche mit Kondensationsstößen sowie erste Parameterstudien

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Literaturrecherche ist immer begleitendes Arbeitspaket, das nie endet;
- AP2: Weiterführung der Versuche, gemeinsam abgestimmte Versuchsreihen innerhalb des Projektverbundes; Auswertung der erfolgten Versuche

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Veröffentlichung eines Konferenzpapers in Lissabon

The UniBw water hammer test facility, S. Dirndorfer, H. Kulisch and A. Malcherek, Universität der Bundeswehr München (UniBw), Institute of Hydromechanics and Hydraulic Engineering, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg, Germany

Veröffentlichung des Konferenzbeitrages der Nureth-14 in der Zeitschrift Kerntechnik 77/2, May 2012, S. 122-127

S. Dirndorfer, M. Doerfler, H. Kulisch and A. Malcherek: Condensation induced water hammer – overview and own experiments, Universität der Bundeswehr München (UniBw), Institute of Hydromechanics and Hydraulic Engineering, Werner-Heisenberg-Weg 39, D-85577 Neubiberg, Germany



## **2.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 012D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Abtrennung langlebiger Radionuklide (Partitioning); TP: Spektroskopische Untersuchungen zur Stabilität und Koordination von Aktinidkomplexen mit ausgewählten Extraktionsliganden		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2009 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 233.046,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Panak	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen dieses Verbundprojekts werden verschiedene Aspekte zur Entwicklung von auf Flüssig-Flüssig-Extraktion basierten Abtrennprozessen für Actiniden („Partitioning“) untersucht. Ein fundiertes Verständnis der Komplexierungs- und Extraktionsmechanismen auf molekularer Basis soll wichtige Erkenntnisse bezüglich der Selektivität verschiedener Ligandensysteme liefern, welche die Basis für ein zukünftiges Ligandendesign als auch die Optimierung von Trennprozessen darstellen.

Diese Ergebnisse liefern somit einen wichtigen Beitrag für eine sichere Endlagerung nuklearer Abfälle. Des Weiteren werden grundlegende Erkenntnisse bezüglich des Komplexierungsverhaltens der trivalenten Actiniden und Lanthaniden erhalten, die auch in anderen wissenschaftlichen Bereichen von großer Bedeutung sein können. Die in diesem Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten der Universität Heidelberg erfolgten in direkter Kooperation mit dem KIT-INE und dem Forschungszentrum Jülich; siehe die entsprechenden Halbjahresberichte.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Molekularmechanistische Aufklärung der Selektivität ausgewählter Extraktionsmittel zwischen dreiwertigen Actinid- und Lanthanidionen  
 AP2: Synthese und Charakterisierung neuer Klassen hochwirksamer und prozessstabiler Extraktionsmittel für die Actiniden/Lanthanidentrennung

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### Wissenschaftliche Ergebnisse zu den Arbeitszielen A und B:

Flüssig-flüssig-Extraktionsstudien von Am(III) und dreiwertigen Lanthaniden (Ln(III)) mit Methyl-substituierten TODGA-Derivaten (siehe Abb. 1) zeigten einen starken Einfluss des Substituierungsgrads auf die Extraktionsleistung (FZ Jülich).

Die Komplexierung von Cm(III) mit TODGA, Me-TODGA und Me<sub>2</sub>-TODGA wurde mit Hilfe der TRLFS untersucht. Als Lösungsmittel wurde Ethanol (1.5 vol % H<sub>2</sub>O) gewählt, um eine gute Löslichkeit von Cm(III) und der Diglycolamidliganden zu gewährleisten. Bei der Charakterisierung der Komplexierung von Cm(III) mit TODGA wurde ab einer Ligandenkonzentration von 2.0 μM eine Emissionsbande mit einem Emissionsmaximum bei 603.3 nm und ab einer Konzentration von 7.6 μM eine Emissionsbande mit einem Maximum bei 608.4 nm gefunden. Durch Steigungsanalyse konnten diese Emissionsbanden einer Cm-TODGA 1:1 und einer Cm-TODGA 1:3 Komplexspezies zugeordnet werden. Vergleichbare Emissionsbanden wurden bei der Titration von Cm(III) mit Me-TODGA bzw. Me<sub>2</sub>-TODGA gefunden, jedoch sinkt der Anteil der 1:1 Cm-Ligand Komplexspezies mit zunehmender Anzahl an Methylgruppen in α-Position zum Ether-Sauerstoffatom. Mit zunehmender Methylierung der Liganden wurden zudem sinkende relative FI-Faktoren der Cm-Ligand 1:3 Komplexspezies beobachtet ( $FI[Cm(TODGA)_3]^{3+} = 20.7$ ,  $FI[Cm(Me-TODGA)_3]^{3+} = 14.1$ ,  $FI[Cm(Me_2-TODGA)_3]^{3+} = 5.4$ ). Unter Einbeziehung dieser FI-Faktoren konnten folgende konditionelle Gleichgewichtskonstanten bestimmt werden:  $\log \beta_3([Cm(TODGA)_3]^{3+}) = 14.92 \pm 0.30$ ,  $\log \beta_3([Cm(Me-TODGA)_3]^{3+}) = 14.85 \pm 0.31$ ,  $\log \beta_3([Cm(Me_2-TODGA)_3]^{3+}) = 12.72 \pm 0.25$ .

Die Komplexierung von Eu(III) mit den Diglycolamidliganden wurde durch Aufnahme der  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$ ,  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$  und  ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$  Banden in Abhängigkeit von der Ligandkonzentration bestimmt. Mittels Peakentfaltung der Emissionsbanden konnte auch bei den Eu(III) Komplexen die Bildung von 1:1- und 1:3- Cm(III)-Komplexspezies nachgewiesen werden. Nach Korrektur mit den konditionellen FI Faktoren wurden folgende Gleichgewichtskonstanten bestimmt:  $\log \beta_3([\text{Eu}(\text{TODGA})_3]^{3+}) = 15.69 \pm 0.22$ ,  $\log \beta_3([\text{Eu}(\text{Me-TODGA})_3]^{3+}) = 15.45 \pm 0.20$ ,  $\log \beta_3([\text{Eu}(\text{Me}_2\text{-TODGA})_3]^{3+}) = 15.47 \pm 0.24$ .

Zusätzlich wurden die Fluoreszenzlebensdauern der 1:3 Metall-Ligandkomplexspezies ermittelt. Für die Cm(III) Komplexe wurden Lebensdauern zwischen  $517 \pm 10 \mu\text{s}$  und  $585 \pm 12 \mu\text{s}$  gefunden, während für die Eu(III) Komplexe Lebensdauern zwischen  $1973 \pm 31 \mu\text{s}$  und  $2151 \pm 39 \mu\text{s}$  erhalten wurden. Diese langen Lebensdauern sprechen für eine vollständige Komplexierung der Metallionen mit den jeweiligen Liganden unter vollständiger Verdrängung der Solvensmoleküle in der inneren Koordinationssphäre.

Für die 1:1 Cm(III)-Ligand Komplexspezies  $[\text{Cm}(\text{TODGA})_1]^{3+}$  und  $[\text{Cm}(\text{Me-TODGA})_1]^{3+}$  konnten ebenfalls Fluoreszenzlebensdauern erhalten werden:  $\tau[\text{Cm}(\text{TODGA})_1]^{3+} = 188 \pm 10 \mu\text{s}$ ,  $\tau[\text{Cm}(\text{TODGA})_1]^{3+} = 241 \pm 8 \mu\text{s}$ . In Zweiphasenexperimenten wurden nach Extraktion aus salpetersaurer wässriger Lösung in Kerosin anhand der Emissionsspektren und Lebensdaueremessungen die gleichen 1:3 Cm(III)- und Eu(III)-Komplexspezies nachgewiesen wie sie in den Titrationsexperimenten gefunden wurden. Der theoretisch bestimmte Trennfaktor ist in hervorragender Übereinstimmung mit den experimentell gefundenen Daten. Die Ergebnisse sollen in Kürze in einer gemeinsamen Publikation mit dem FZ Jülich veröffentlicht werden.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Mit dem im Arbeitskreis Prof. Dr. P. Roesky (KIT-AC) entwickelten Ligand 6-(1H-tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridin ( $\text{HN}_4\text{bipy}$ ) sollen thermodynamischen Daten der Komplexierung aus der Temperaturabhängigkeit der Stabilitätskonstanten im Temperaturbereich von 10-60 °C ermittelt werden.

Des Weiteren soll mit 6-(1H-3-Methyltriazol-5-yl)-2,2'-bipyridin ein neuer, im Arbeitskreis Prof. Dr. P. Roesky entwickelter Ligand des 2,2'-bipyridin-Typs auf die Komplexierungseigenschaften mit Cm(III) und Eu(III) untersucht werden. Die thermodynamischen Daten der Komplexierung sollen mittels TRLFS bestimmt werden. Auch bei diesem Liganden sollen die Extraktionseigenschaften in Flüssig-flüssig Extraktionsexperimenten untersucht werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

##### Publikationen:

B. B. Beele, U. Müllich, F. Schwörer, A. Geist, P. J. Panak, Systematic Modifications of BTP-type Ligands and Effects on the Separation of Trivalent Lanthanides and Actinides, *Proc. Chem.* **2012**, 7, 146 – 151.

B. B. Beele, E. Rüdiger, F. Schwörer, U. Müllich, A. Geist, P. J. Panak, TRLFS Study on the Complexation of novel BTP Type Ligands with Cm(III), *Dalton Trans.* **2012**, in preparation.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) with 2,6-bis(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)pyridine and 2-bromohexanoic acid studied by Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy, *Radiochim. Acta*, accepted.

C. Adam, P. Kaden, B. B. Beele, U. Müllich, S. Trumm, A. Geist, P. J. Panak, M. A. Denecke, Evidence of covalence in N-donor complex of Americium(III), *Angew. Chem., Int. Ed.*, submitted.

A. Wilden, G. Modolo, S. Lange, F. Sadowski, B. B. Beele, A. Skerencak, P. J. Panak, M. Iqbal, W. Verboom, A. Geist, Evaluation of Modified Diglycolamides for the mutual separation of An(III) and Ln(III) by Solvent Extraction and Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy, *Solvent Extr. Ion Exch.*, in preparation.

##### Vorträge:

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) with 2,6-bis(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)pyridine (C5-BPP) studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy, NRC-8, EuCheMS International Conference on Nuclear and Radiochemistry, 16.-21.09.2012, Como, Italien.

B. B. Beele, U. Müllich, F. Schwörer, A. Geist, P. J. Panak, Systematic Modifications of BTP-type Ligands and Effects on the Separation of Trivalent Lanthanides and Actinides, ATALANTE 2012 – Nuclear Chemistry for Sustainable Fuel Cycles, 02.-07.09.2012, Montpellier, Frankreich.

##### Poster:

B. B. Beele, U. Müllich, F. Schwörer, P. J. Panak, Characterization of BTP-Type Ligands with TRLFS and Liquid-liquid Extraction, Workshop AG Chemie und Energie Energietransformationen - Die Rolle der Chemie, 15.11.2012, Karlsruhe.

P. J. Panak, C. M. Ruff, U. Müllich, A. Geist, A novel path in partitioning: Water-soluble BTP ligands for the innovative SANEX process, NRC-8, EuCheMS International Conference on Nuclear and Radiochemistry, 16.-21.09.2012, Como, Italien.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 013A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 28.02.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 736.590,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Junghans	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zur hochpräzisen Messung der neutronen-induzierten Spaltung werden Spaltkammerdetektoren mit hoher Zeitauflösung entwickelt und die transmutationsrelevanten Spaltquerschnitte z. B. von  $^{242}\text{Pu}$  gemessen. Das know-how zur Produktion dünner, homogener Aktinidenschichten wird vom Projektpartner am Institut für Kernchemie der Universität Mainz an das Forschungszentrum Dresden-Rossendorf vermittelt. Messungen am  $^{238}\text{U}$  und  $^{235}\text{U}$  dienen zur Normierung des Neutronenflusses, die entsprechenden Aufbauten werden mit dem Projektpartner an der PTB Braunschweig kalibriert.

Transmutationsrelevante inelastische Neutronenstreuquerschnitte und totale Neutronenstreuquerschnitte von Ta, und Mo Isotopen werden untersucht. Die Gammastärke-funktion in Kernen soll systematisch untersucht werden durch photoneninduzierte Prozesse am ELBE Beschleuniger sowie ergänzend durch Neutroneneinfangreaktionen an Reaktoren und soll in kernphysikalische Reaktionsmodelle integriert werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Entwicklung effektiver Anordnungen für den hoch-präzisen Nachweis der neutronen-induzierten Spaltung, Beschaffung von Komponenten (Targetmaterial), Messung der inelastischen Streuung und des totalen Neutronenwirkungsquerschnitts an Ta, Mo-Isotopen, Aufbau der  $^{238}\text{U}$  Spaltkammern, Qualitätskontrolle dünner U-Schichten durch  $\alpha$ -Spektrometrie, Transmutationsrelevante Experimente zur Photodisintegration und Photonenstreuung und Neutroneneinfang im Massenbereich  $A=80$  und  $A=136$ , Testmessung mit quasi-monoenergetischen Neutronen aus der DD Reaktion, Aufbau der  $^{235}\text{U}$  Spaltkammer; Vergleichsmessungen der Nachweiswahrscheinlichkeit mit der  $^{235}, ^{238}\text{U}$  Spaltkammern bei PTB und nELBE, Aufbau der  $^{242}\text{Pu}$  Spaltkammer und Messung der neutroneninduzierten Spaltung, Systematik der  $\gamma$ -Stärkefunktion und Implementation in Teilchentransportsimulationen und Kernreaktions-Codes.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde am Zentrum für Hochleistungstrahlungsquellen die neue Neutronenflugzeithalle fertig gestellt sowie das Photoneutronentarget weiter aufgebaut. Die Einrichtung des Messcontainers hat begonnen. Der Aufbau der Elektronenstrahlführungen hat sich leider verzögert, die Inbetriebnahme der Neutronenflugzeitanlage ist für Ende Juni im Strahlzeitplan vorgesehen. Korrelierte Flugzeit- und Gammasppektren aus dem Neutroneneinfang im Bereich von keV-Neutronen an  $^{77}\text{Se}$  wurden am Institut für Referenzmaterialien und Messungen, Geel im Oktober und November 2012 gemessen. Die Daten werden gegenwärtig am HZDR analysiert.

Zur Vorbereitung der Spaltquerschnittsmessungen wurde der Energieverlust von Spaltfragmenten in Zählgasen detailliert mit GEANT4 untersucht. Ein Programm für die digitale Datenaufnahme mit schnellen Digitizern wurde geschrieben und parallelisiert, die Auslesehardware wurde von einer „embedded PC“ auf eine HochleistungsPC-Plattform transferiert. Das Pu-Material wurde zum Projektpartner nach Mainz versandt. Nach Ablauf des Mainzer Teilprojekts wird Alessio Vascon aus HZDR Mitteln eingestellt, um die Arbeiten zu den Aktinidenproben fertig zu stellen. Schichten aus Natururan sind bereits zur PTB gesendet worden.

Der letzte  $\text{LaBr}_3$ -Szintillationsdetektor ist am HZDR eingetroffen und getestet worden.

Eine Publikation über die Nachweiseigenschaften von LAB basierten Flüssigszintillatoren in Bezug auf schnelle Neutronen und Photonen ist Nucl. Inst. Meth. A erschienen.

Das Strahlprofil, Energiespektrum, Zeitstruktur und Intensität von Bremsstrahlungspuls und Neutronenverteilung wurde mit einer  $^{235}\text{U}$  Spaltkammer untersucht und eine Veröffentlichung ist bei Nucl. Inst. Meth. A eingereicht. Außerdem wurde die Photoneutronenquelle nELBE in einer „Special Issue on Nuclear Reaction Data“ präsentiert.

Das TRAKULA Projekt sowie die Photoneutronenquelle nELBE wurden auf dem 10. Projektstatusgespräch zu BMWi- und BMBF-geförderten FuE-Projekten der Endlagerforschung und der Nuklearen Sicherheitsforschung am 13.11.-14.11.2012 in Karlsruhe sowie auf dem workshop THEORY-2: Scientific Workshop on Nuclear Fission dynamics and the Emission of Prompt Neutrons and Gamma Rays, in Biarritz, Frankreich

28.-30.11.2012 (durch Toni Kögler), vorgestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Erstellung des Messaufbaus zur neutroneninduzierten Spaltung (Entwicklung von Spaltkammern, Beschaffung und Aufbau der Messelektronik) und Produktion dünner Aktinidenschichten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere der Uni Mainz und der PTB Braunschweig. Aufbau eines Experiments zur inelastischen Streuung mit  $\text{LaBr}_3$  Szintillatoren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

P. Schillebeeckx et al.: Determination of Resonance Parameters and their Covariances from Neutron induced Reaction Cross Section Data, Nuclear Data Sheets 113 (2012) 3054

T. Kögler et al.: Light yield and n- $\gamma$  pulse-shape discrimination of liquid scintillators based on linear alkyl benzene, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A701(2013)285–293

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 013B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 216.315,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Zuber	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Projekts sollen kernphysikalische Untersuchungen durchgeführt werden, die durch ihre Fragestellung und die Art ihrer Durchführung besonders geeignet sind, zum Kompetenzerhalt in der Kernenergie- und der Strahlenforschung beizutragen. Die Vermessung kleinster spezifischer Aktivitäten und extrem langlebiger Isotope ist sowohl von großer Bedeutung für den Kernrückbau als auch für das Studium fundamentaler Fragen in der Kern- und Elementarteilchenphysik. Diese Messungen können nur unter Tage durchgeführt werden. Das Felsenkeller Labor des VKTA Dresden, welches auch der TU Dresden zur Verfügung steht, bietet eine besondere Möglichkeit zu einer sehr untergrundarmen Gamma-Spektroskopie. In diesem Zusammenhang ist die Einrichtung eines unterirdischen Messplatzes für geringe Radioaktivität und seine Nutzung im Zusammenhang mit der Transmutationsforschung als auch Bestimmungen von Wirkungsquerschnitten mit Neutronen vorgesehen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Aufbau einer Low Background Alpha-Kammer und die Erforschung der möglichen Produktion dünner Targets. Neutronenaktivierungen diverser Proben von Cd, Zn, Te, Ge und Nd.
- Aufbau eines Low Background Betadetektors.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bei Testmessungen am HZDR sind unerwartete Effekte aufgetreten, die zu einer Drift der Peaklage in der Pulshöhenverteilung von Kalibrierstandards führen. Die Ursachen dafür konnten noch nicht eindeutig bestimmt werden. Um bei Langzeitmessungen Umgebungsparameter zu überwachen, wurde eine automatische Auslese von Kammertemperatur und Druck vorbereitet. Die entsprechende Software konnte aber noch nicht in die DAQ eingebettet werden.

Im Labor der Technischen Universität Dresden wurde sowohl technisch als auch administrativ (Sicherheit etc.) alles für den Umzug der Gitterionisationskammer vom HZDR zur Universität und einen langfristigen Betrieb vorbereitet.

Die geplante Betaspektroskopie ist aufgebaut. Kalibrier- und Untergrundmessungen wurden durchgeführt und gerade analysiert. Mit Hilfe der Konversionselektronen des  $^{137}\text{Cs}$  gab es erste Hinweise auf die Detektorantwort. Diese ist nötig, um später zusammen mit einer Simulation die resultierenden Spektren zu entfalten.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Kammer wird nun in das vorgesehene Labor umgezogen. Es sollte die DAQ entsprechend der Auslese von Temperatur und Luftdruck angepasst werden. Im Anschluss müssen die Ursachen für die Drift der Peaklage gefunden werden. Dies geht einher mit einer genauen Kalibrierung der Kammer bezüglich der Energie und Effizienz. Lässt sich dann ein stabiler Betrieb der Kammer für langfristige Messungen garantieren, können die  $^{144}\text{Nd}$  Targets aus Mainz vermessen werden. Diese müssen im Anschluss noch am Reaktor in Mainz hinsichtlich der Anzahl der Atome charakterisiert werden.

Das Rauschproblem der Betaspektroskopie konnte mangels Personal (Herr Stasch als Diplomat hat seine Arbeit abgeschlossen und ist in die freie Wirtschaft gegangen) noch nicht gelöst werden. Nach einer Lösung wird gesucht, erfordert jedoch eine etwas erfahrenere Person zur Problemlösung. Wenn dies geschehen ist, soll nochmals ein Untergrundspektrum genommen werden und mit einer aktivierten Zinn Probe ein Betaspektrum aufgenommen werden. Neutronenaktivierungen sind für Februar-März 2013 geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag: "Low Background Alpha Spectroscopy with a Frisch Grid Ionisation Chamber "  
von Felix Krüger beim CELLAR Meeting in Lingolsheim (France)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität zu Köln, Albertus-Magnus-Platz, 50931 Köln		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 013D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Gamma-Imaging mit hochsegmentierten Germaniumdetektoren		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 383.063,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Reiter	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Institut für Kernphysik der Universität zu Köln entwickelt und baut im Verbundprojekt eine Compton-Kamera. Die Compton-Kamera soll auf einer Kombination eines positionsauflösenden Siliziumstreifendetektors mit einem hochsegmentierten großvolumigen Germaniumdetektor und einer hochintegrierten digitalen elektronischen Messdatenerfassung basieren. Diese Compton-Kamera bietet sowohl für den Online-Nachweis von Gammastrahlung in photonen- oder neutroneninduzierten Reaktionen als auch bei der Offline-Messung von geringen Aktivitäten relevanter Radionuklide im Untergrundlabor entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Detektorsystemen. Des Weiteren lässt sich eine solche Compton-Kamera ideal für das Überwachen und Aufspüren schwacher radioaktiver Quellen und die Charakterisierung von radioaktivem Abfall vor und nach der Transmutation einsetzen. Dieses Teilprojektes soll in enger Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl E12 der Technischen Universität München bearbeitet werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Design und Konstruktionsphase des Detektoraufbaus zur Compton-Kamera.  
Bestellung: Ge-Detektor, Kryostaten, Si-Detektoren. Vorbereitung und Test von Messtand, Elektronik und Datenaufnahmesystem, Vorstudien und Optimierung der Pulsformanalysealgorithmen. Aufbau, Test und Optimierung des HPGe-Detektors im Kryostaten Aufbau des Si-Detektors inkl. digitales Auslesesystem für 96 Kanäle, Integration und Test der Detektoren in Compton-Kamera Messungen mit Compton-Kamera (12 Monate), Entwicklung von optimierten PSA-Algorithmen. Erste Messungen mit Photonenstrahlen (Online) und im Untergrundlabor (Offline) in Dresden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In den letzten sechs Monaten wurden das Untersuchungsprogramm und das Arbeitspaket zügig vorangetrieben. Die Entwicklung von optimierten PSA-Algorithmen wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt. Gemessene Impulse von einzelnen Photonen wurden mit simulierten Impulsen für die Bestimmung der Wechselwirkungspunkte im Detektor verglichen. Die Bachelorarbeit umfasste dabei neben den PSA-Algorithmen eine Reihe von weiteren Softwareentwicklungen. Da zum ersten Mal Impulse oder sogenannte ‚Traces‘ vermessen wurden, war eine Software zur Übergabe der Daten aus den PIXI Modulen an die weitere Datenverarbeitungssoftware notwendig. Diese grundlegenden Schritte erfordern einen sehr optimierten und effizienten Algorithmus. Vor dem eigentlichen Vergleich von gemessenen Impulsen mit den berechneten Ergebnissen müssen die experimentellen Ergebnisse aufgearbeitet werden. Dies umfasste eine Erweiterung der Analysesoftware: Die Bestimmung der Nulllinie oder der Baseline war ein erster wichtiger Schritt um Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Ebenso musste die gemessene Information, die in 10 ns-Einheiten digitalisiert wurde, als Funktion der Zeit abgeglichen werden. Dazu musste ein Zeitnullpunkt für die unterschiedlichen Pulse des HPGe Detektors für jeden einzelnen Impuls der vorliegenden 37 Kanäle bestimmt werden. Für eine Bestimmung der Ortsinformation mit kollimierten Quellen werden viele Ereignisse berücksichtigt und ein geeignetes Mittelungsverfahren der gewonnenen Traces wurde bereitgestellt. Ein sehr wichtiger technischer Schritt war die Berechnung der ortsempfindlichen Impulsbibliothek die mit Hilfe des bereits am Institut entwickelten Programmpaketes ADL3 zur Verfügung

gestellt werden konnte.

Veränderung der Signale ist bei sich änderndem Radius deutlich in den Messdaten wiederzufinden. Dennoch sind bei einigen Traces auch größere Abweichungen von der Simulation zu erkennen. Die wohl stärksten Abweichungen sind bei den Messungen mit einem Radius größer als 3 cm zu sehen, bei denen die Simulation für die Segmente 21 (D3) und 9 (B3) negative Signale vorhersagt, wobei in der Messung jedoch kein oder nur ein positives Signal sichtbar ist. Ähnliches gilt für Segment 14 (C2) und 16 (C4). Die Simulationsdaten beschreiben ein deutliches ( $< -35$  keV) negatives Signal, während die Messdaten weiterhin eine positive Amplitude zeigen ( $> 15$  keV). Des Weiteren fallen des häufigeren abfallende Baselines auf, die ein Zeichen für Crosstalk sein könnten.

Diese ersten Ergebnisse legten dann nahe, dass die Berücksichtigung von weiteren Eigenschaften des Detektors bei den Rechnungen und eine Verbesserung der experimentellen Eigenschaften den Vergleich zwischen beiden Datensätzen verbessern könnten.

Zu den nicht berücksichtigten Effekten gehört das elektronische Übersprechen oder Crosstalk, der Ladungsträgerereignisfang oder Trapping, aber auch die Auswirkungen von bisher nicht berücksichtigten Verunreinigungskonzentrationen innerhalb des Germanium-Kristalls. Diese Eigenschaften könnten einen negativen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Hinzu kommt, dass die gemessenen Traces nur aus einem viel zu großen Gebiet gemittelt werden konnten. Hierdurch lässt sich wahrscheinlich erklären, dass in den gemessenen Traces die Änderungen der Impulsform z. B. Knicke nicht sehr ausgeprägt sind. Mit dem verwendeten Kollimator konnte aufgrund seiner geometrischen Eigenschaften das Wechselwirkungsgebiet in der x-y-Ebene nur auf einen Bereich ca. 7 mm Durchmesser eingegrenzt werden. Bei den Messungen in 5 mm Abständen ist erkennbar, dass es bei den simulierten Traces bei einem radialen Abstand in diesem Bereich schon deutliche Abweichungen in der Impulsform zu erwarten sind. Die Mittelung der Traces kann deshalb zum Verlust der Impulsform-Information führen.

Eine weitere Optimierung der Comptonkamera umfasste deshalb eine sorgfältige Analyse des Übersprechens oder Crosstalks und eine Überprüfung der vom Hersteller gelieferten Vorverstärker. Die gemessenen Crosstalk-Anteile sind in Form einer 36x36 Matrix aufgetragen und bewegen sich auf dem 10<sup>-3</sup> Niveau. Diese Crosstalk-Anteile zwischen den 36 Segmenten entsprechen den Berechnungen, die im Rahmen eines linearen elektronischen Modells zur Beschreibung in ähnlichen, hochsegmentierten AGATA-Detektoren angestellt wurden. Hingegen hat die Untersuchung der vom Hersteller gelieferten Vorverstärker ergeben, dass die gemessenen Anstiegszeiten von 150 ns deutlich langsamer sind als vergleichbare Anstiegszeiten bei den AGATA-Vorverstärkern, die bei 35 ns liegen.

Zurzeit werden systematische Messungen mit der Compton-Kamera in ihrer endgültigen Konfiguration durchgeführt. Ziel der Messungen ist ein systematisches Verständnis der beobachteten Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Impulsen, um somit die Ortsbestimmung der Kamera zu optimieren. In Zukunft wird der Vergleich der gemessenen Pulse mit der berechneten Data-Library die sogenannte Pulse-Shape-Analysis durchgeführt, um eine hochauflösende Ortsbestimmung im HPGe-Detektorvolumen zu erzielen.

Die Koinzidenzmessungen und die Vorarbeiten zur Ortsbestimmung mit der Compton-Kamera wurden im Rahmen der Kölner Bachelorarbeit von Rouven Hirsch durchgeführt. Herr Hirsch wird seine Ergebnisse auf der Frühjahrstagung der deutschen physikalischen Gesellschaft in Dresden am 5.3.2013 dem Fachpublikum vorstellen können.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Als nächster Schritt wird die Bestimmung der Wechselwirkungsorte mit PSA-Software der AGATA-Kollaboration durchgeführt. Die Charakterisierung des HPGe Detektors und seiner Elektronik wird abgeschlossen. Eine optimierte und mit gemessenen Daten verifizierte Datenbibliothek wird erstellt. Die Lokalisierung von  $\gamma$ -Quellen mit Hilfe von HPGe-DSSD-Koinzidenzmessungen wird durchgeführt.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Compton-Kamera basierend auf einem hochsegmentierten HPGe-Detektor und einem DSSSD, Rouven Hirsch<sup>1</sup>, Lars Lewandowski<sup>1</sup>, Tim Steinbach<sup>1</sup>, Benedikt Birkenbach<sup>1</sup>, Jürgen Eberth<sup>1</sup>, Roman Gernhäuser<sup>2</sup>, Walter Henning<sup>2</sup>, Herbert Hess<sup>1</sup>, Ludwig Maier<sup>2</sup>, Peter Reiter<sup>1</sup>, Michael Schlarb<sup>2</sup> und Max Winkel<sup>2</sup>, IIKP, Universität zu Köln, Köln, Deutschland

<sup>2</sup>Physik-Department E12, Technische Universität München, Garching, Deutschland

Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, ISSN 0420-0195

Rouven Hirsch, Impulsformanalyse eines 36-fach segmentierten HPGe-Detektors, Bachelorarbeit, Universität zu Köln, 14. November 2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 013E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Herstellung und Nutzung von Aktinidentargets		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 28.02.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 141.419,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Eberhardt	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des hier vorgeschlagenen Projekts sollen in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) und der Technischen Universität Dresden (TUD) effiziente Detektoren für den präzisen Nachweis der neutronen-induzierten Spaltung von Uran- und Plutoniumisotopen entwickelt werden. An der Johannes Gutenberg-Universität (JOGU) in Mainz sollen dazu mittels Elektrodeposition isotoopenreine dünne Schichten (Targets) mit  $^{235,238}\text{U}$  bzw.  $^{239,242}\text{Pu}$  hergestellt werden, die ein zentrales Bauteil für schnelle Ionisationskammern (Spaltkammern) darstellen, wie sie am FZD und der TUD im Rahmen des Verbundantrags aufgebaut und getestet werden sollen.

Von der JOGU gelieferte Präparate mit Neodym (Nd) werden zudem vom Projektpartner am FZD für Messungen zum  $\alpha$ -Zerfall des extrem langlebigen  $^{144}\text{Nd}$  ( $T_{1/2} = 2.3 \times 10^{15}$  a) eingesetzt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Für die Spaltkammern werden Targets mit einem Durchmesser von bis zu 7 cm, d. h. mit einer Fläche von ca.  $40 \text{ cm}^2$  benötigt. In einem ersten Schritt sollen daher die Parameter für die effiziente, großflächige elektrochemische Abscheidung von Gadolinium (Gd) und Neodym (Nd) systematisch untersucht werden. Dafür muss eine entsprechende Elektrolysezelle entwickelt und aufgebaut werden. Erst wenn das Verfahren mit Gd und Nd als Modellelementen ausgearbeitet worden und ein geeignetes Trägermaterial (Backing) gefunden worden ist, sollen Uran (U-) und Plutonium (Pu-) Targets mit dieser Methode hergestellt werden. Nachdem gezeigt wurde, dass  $^{238}\text{U}$  auf dem entsprechenden Backing mit hoher Ausbeute und homogen abgeschieden werden kann, soll  $^{235}\text{U}$  eingesetzt werden, um die Spaltkammern zu kalibrieren. Nach weiteren Tests mit  $^{239}\text{Pu}$ , sollen abschließend  $^{242}\text{Pu}$ -Targets hergestellt, in die Spaltkammern eingebaut und der neutroneninduzierte Spaltquerschnitt gemessen werden.

Zur Ausbeutebestimmung wird  $\alpha$ - bzw.  $\gamma$ -Spektroskopie und Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) verwendet, die Homogenität der Schicht kann mittels Radiographie kontrolliert werden. Im Falle von stabilen Targetmaterialien können hierzu benötigte radioaktive Tracer jederzeit am TRIGA-Reaktor des Instituts für Kernchemie hergestellt werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zum Test der an der TU Dresden entwickelten und aufgebauten Ionisationskammer für Messungen zum  $\alpha$ -Zerfall des extrem langlebigen  $^{144}\text{Nd}$  ( $T_{1/2} = 2.3 \times 10^{15}$  a) wurden 5 Präparate hergestellt, bei denen Sm, angereichert zu 96.5 % an  $^{147}\text{Sm}$  ( $T_{1/2} = 1.1 \times 10^{11}$  a), abgeschieden wurde. Als Substrat wurden extrem glatte Si-Wafer eingesetzt, die mit Ti besputtert wurden (Si/Ti-Wafer). Die Abscheidung erfolgte aus DMF bei Stromdichten  $< 1$  mA/cm<sup>2</sup>. Die Ausbeutebestimmung erfolgte mittels  $\gamma$ -Spektroskopie über das als Tracer zugesetzte  $^{153}\text{Sm}$ . Zusätzlich wurden fünf Blanko-Präparate für Untergrundmessungen hergestellt, bei denen jeweils eine Abscheidung ohne Zusatz von Sm-Material durchgeführt wurde. Damit sollten sich alle Effekte untersuchen lassen, die durch natürliche radioaktive Strahler verursacht werden und die Messung des  $^{144}\text{Nd}$  stören könnten. Die Präparate wurden im August an den Projektpartner TU Dresden übersandt.

Parallel dazu wurde das neue Abscheideverfahren mit Si/Ti-Wafern als Substrat auf Uran übertragen und neue Präparate mit  $^{238}\text{U}$  für Messungen beim Projektpartner PTB hergestellt. Drei großformatige Präparate mit einer aktiven Fläche von ca. 43 cm<sup>2</sup> (74 cm Durchmesser) - entsprechend der Standardgeometrie der Messkammern bei den Projektpartnern PTB und HZDR. Die Ausbeuten lagen auch im Falle des U bei  $> 98$  % bei einer Massenbelegung von 400  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Die Ausbeute wurde indirekt durch Neutronenaktivierung des Überstandes über die Reaktion  $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{Np}$  bestimmt. Die Homogenität der Schicht wurde mittels Autoradiographie überprüft.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Charakterisierung der Ionisationskammer der TU Dresden und Messung der Sm-Präparate können die entsprechenden Nd-Präparate hergestellt werden. Rechnungen mit dem Programmpaket GEANT zur Spektrensimulation haben ergeben, dass im Falle der Messung des langlebigen  $^{144}\text{Nd}$  kein  $^{147}\text{Nd}$  als Traceraktivität zur Bestimmung der Abscheideausbeute zugesetzt werden darf, da, bedingt durch die dann zu erwartende  $\beta$ - $\beta$ -pile-up rate, die Messung im Energiebereich  $\leq 1$  MeV gestört wird. Somit lässt sich die Ausbeute nicht vor der eigentlichen Messung in der Ionisationskammer bestimmen (wie beim Sm möglich). Geplant ist daher, die Proben nach der Messung in der thermischen Säule des TRIGA-Reaktors zu aktivieren und über das dann entstehende  $^{147}\text{Nd}$  durch Vergleich mit einem Standard die Zahl der Nd-Atome in der jeweiligen Probe zu bestimmen. Entsprechende Vorversuche sind geplant. Nach erfolgter Messung der U-Präparate beim Projektpartner an der PTB sollen zunächst  $^{235}\text{U}$ - und dann die  $^{242}\text{Pu}$ -Präparate hergestellt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Toward large-area targets for "TRAKULA": A. Vascon, Ch.E. Düllmann, K. Eberhardt, B. Kindler, B. Lommel, J. Runke: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A655(2011) 72-79

Elucidation of constant current density molecular plating: A. Vascon, S. Santi, A.A. Isse, T. Reich, J. Drebert, H. Christ, Ch.E. Düllmann, K. Eberhardt, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A696 (2012) 180-191

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 013F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Ultrasensitive Nachweismethoden für Radionuklide		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 30.09.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 30.09.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 290.226,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Gernhäuser	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Dies Teilprojekt hat zum Ziel, unterschiedliche Nachweismethoden für die Radioisotope, die in Reaktoren erzeugt werden, bereit zu stellen und weiter zu entwickeln.

Für ein sehr breites Anwendungsspektrum hat das Projekt die Entwicklung eines hochauflösenden, bildgebenden HPGe-Detektors in Kombination mit ortsempfindlichen Si-Halbleiterdetektoren zum Ziel. Diese ortsaufauflösende Compton-Kamera wird für die Lokalisierung von radioaktiven Substanzen eingesetzt und gleichzeitig wird das System als sensitiver Gamma-Monitor die isotopenspezifische Zusammensetzung der radioaktiven Materialien bestimmen. Für besonders langlebige Spaltfragmente wie z. B.:  $^{99}\text{Tc}(0,2\text{Ma})$ ,  $^{126}\text{Sn}(0,2\text{Ma})$ ,  $^{129}\text{I}(16\text{Ma})$  und  $^{135}\text{Cs}(2\text{Ma})$  (Halbwertszeiten in Klammern) sind wegen ihrer geringen Aktivität ganz andere Nachweismethoden erforderlich.

In unserer Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS)-Anlage mit dem gasgefüllten Magneten GAMS können sie mit hoher Sensitivität nachgewiesen werden. Die weitere Zielrichtung betrifft die schweren Nuklide der minoren Aktiden. Auch hier soll der Nachweis für die langlebigen Nuklide entwickelt werden. Nach einer spezifischen chemischen Abtrennung soll mit einem Flugzeitaufbau eine Identifizierung über die Massenzahl in der AMS Anlage erfolgen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Entwicklung des Detektorsystems  
Design, Konstruktion und Aufbau der Compton-Kamera mit Ausleseelektronik;  
Integration der PSA-Algorithmen und Testmessungen der Compton-Kamera ;  
Erste Messungen mit Photonenstrahlen und im Untergrundlabor in Dresden;
- AP2: Simulationen verschiedener Detektorkonfigurationen  
Monte Carlo Vorstudien für verschiedene hochsegmentierte Ge-Detektorgeometrien;  
Entwicklung von optimierten PSA-Algorithmen;
- AP3: Nachweis langlebiger Aktiniden  
Inbetriebnahme von zwei neuen Wien-Filtern; Aufbau der TOF- $\Delta E$ - $E_{\text{rest}}$  Messung und Test des Aufbaus für diverse Aktinidenisotope;
- AP4: Nachweis langlebiger Spaltfragmente  
Quantitativer  $^{93}\text{Zr}$  oder  $^{99}\text{Tc}$  Nachweis, optimale Isobaren-Unterdrückung.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

**AP1:** Mit der neuartigen Compton-Kamera wurden im Berichtszeitraum noch zahlreiche Tests und Optimierungen speziell im Bereich der Software vorgenommen. Die Umstellung der Steuerung und Datenaufnahme auf das Betriebssystem Linux macht es nun möglich die Daten eventbasiert in kompakte Files zu schreiben und die „Quasi Online Analyse“ (über Puffer Files) wesentlich zu beschleunigen. Mit Abschluss der Arbeiten zu Elektronik und Datenaufnahme ist es nun möglich mit der erwarteten Effizienz, Energieauflösung und Winkelakzeptanz der Kamera zu arbeiten. Der gesamte Aufbau wurde von uns und unseren Kollaborationspartnern in Köln im Berichtszeitraum in umfangreichen Testexperimenten mit einer  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle erprobt. Ein vereinfachter bildgebender Algorithmus ist „quasi online“ implementiert und erlaubt es die Quellenform mit einer Punktauflösung von  $\Delta x \sim 3 \text{ mm}$  (FWHM) zu rekonstruieren. Die extensive Nutzung führte dabei zu wesentlichen Verbesserungen an den Benutzer Schnittstellen.

**AP2:** Neue Algorithmen zur Pulsformanalyse, die bis zu 5 Wechselwirkungen im HPGe-Detektor rekonstruieren können wurden implementiert und werden gerade noch im Rahmen einer Bachelor - Arbeit online und offline erprobt.

**AP3:**  $^{239}\text{Pu}$  Ereignisse aus einer mit  $^{239}\text{Pu}$  Atomen angereicherten  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  Probe, wurden mit Hilfe einer Flugzeitmessung zweifelsfrei nachgewiesen. Nach vollständiger Charakterisierung des Detektionssystems und des Untergrundes ist man zukünftig auch in der Lage, weitere langlebige Aktinide ( $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , etc.) zu identifizieren. Derzeitig sind weitere Eichproben in Vorbereitung, um die Nachweiseffizienz des Aufbaus zu bestimmen.

**AP4:** Wesentliche Verbesserungen an der Ionenquelle wurden vorgenommen, um die Extraktionseffizienz der Zr Ionen zu verbessern. Testläufe mit dieser modifizierten Quelle zeigten bereits eine 4 Mal höhere Extraktionseffizienz für  $\text{ZrH}^+$  verglichen mit der ursprünglichen Konstruktion. Mit einer Mischung aus  $\text{ZrO}_2$  und Kupfer, wobei Zr dann als  $\text{ZrO}^+$  extrahiert wird, konnte die Extraktionseffizienz um einen weiteren Faktor 2 erhöht werden. Damit kann in weiteren geplanten Messungen die Nachweis Obergrenze im Vergleich zu der bereits erreichten Sensitivität von  $^{93}\text{Zr}/\text{Zr} \approx 6 \cdot 10^{-9}$  deutlich erniedrigt werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1+AP2: Test des Gesamtsystems, Tests im Untergrundlabor.

AP3+AP4: Bestimmung der Nachweiseffizienz für  $^{239}\text{Pu}$ , Verifizierung der verbesserten Nachweissensitivität für  $^{93}\text{Zr}$ .

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

P. Ludwig: Search for Superheavy Elements in Nature with Accelerator Mass Spectrometry, Diplomarbeit TU München, 2010

B. Weiler: Development of a Compton Camera Using Highly Segmented Semiconductor Detectors, Diplomarbeit TU München, 2011

T. Faestermann et al.: Search for Primordial Heavy and Superheavy Elements; Int. Conf. on 'Advances in Radioactive Isotope Science' Leuven, Belgium, June 2011

M.Schlarb et al., EPJ - A Volume 47, 131 (2011), DOI: 10.1140/epja/i2011-11131-3

M.Schlarb et al., EPJ - A Volume 47, 132, (2011) DOI: 10.1140/epja/i2011-11132-2

K. Hain: Accelerator Mass Spectrometry Relevant for Nuclear Waste Transmutation, Masterarbeit TU München, 2011

J. Lachner et al.: Attempt to detect primordial  $^{244}\text{Pu}$ ; Phys. Rev. C 85 (2012) 015801

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 014A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2010 bis 31.05.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 305.378,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Gloe	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt ist auf die Weiterentwicklung der Koordinationschemie ausgewählter Metallionen des *d*- und *f*-Blocks mittels neuer multifunktionaler supramolekularer Komplexbildnermoleküle sowie auf die Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse im nuklearen Bereich und im Umweltschutz gerichtet. Im Mittelpunkt steht dabei die Erweiterung des Kenntnisstandes zur Komplexbildung von ausgewählten Übergangsmetallionen (Fe, Co, Ni, Cu, Zn), Aktinid- bzw. Lanthanidionen (U, Np, Am, Cm sowie Eu) mit multifunktionalen N, O, S-Donorliganden, die Charakterisierung des Transportverhaltens sowie die Strukturklärung relevanter Komplexe.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die konzipierten Studien im Rahmen des Teilprojektes I des Verbundvorhabens beziehen sich auf die Synthese und Charakterisierung von neuen multifunktionalen N, O, S-Ligandsystemen und der Charakterisierung ihrer Wechselwirkungen mit Uran, Neptunium, Americium und Curium in unterschiedlichen Oxidationsstufen sowie im Vergleich mit ausgewählten *3d*- und *4f*-Elementen. Im Mittelpunkt stehen dabei Untersuchungen zur Komplexbildung in Lösung sowie die Gewinnung von Aussagen zu strukturellen Aspekten und zum Extraktionsverhalten.

Arbeitspakete:

- Synthese sowie Reinigung unterschiedlicher Liganden vom Imin-,  $\beta$ -Diketon- bzw. Amidtyp
- Charakterisierung der Ligandstrukturen durch Spektroskopie und Röntgenstrukturanalyse
- Studien zur Komplexbildung relevanter Zielliganden mit ausgewählten *3d*-, *4f*- und *5f*-Metallionen in Lösung mittels UV/Vis- und NMR-Spektroskopie sowie Potentiometrie
- Darstellung von kristallinen Metallkomplexen unter Variation der experimentellen Bedingungen sowie deren Charakterisierung durch Elementaranalyse, IR-Spektroskopie und ESI-Massenspektrometrie
- Ermittlung der charakteristischen Komplexstrukturen durch NMR-Spektroskopie sowie Röntgenkristallstrukturanalyse
- Extraktionsuntersuchungen im wässrig-organischen Zweiphasensystem
- DFT-Rechnungen zur Struktur von Liganden und entsprechenden Metallkomplexen in der Gasphase
- Ableitung von Struktur-Wirkungsbeziehungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Für die neu synthetisierten N,O-Donorliganden erfolgten weiterführende Studien zur Charakterisierung ihrer Komplexbildungseigenschaften in Lösung und zu den auftretenden Strukturmotiven im Festkörper:

- Multinukleare NMR-Studien ( $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) zur Komplexstruktur von La(III) und U(VI) mit 2-Picolylmethantricarboxamid
- Untersuchung der Einflussparameter (Metallkation, Anion, Lösungsmittel, Konzentrationsverhältnis Metallsalz:Ligand) auf die Bildung supramolekularer Metallogele aus *3d*-Metallsalzen und Methantricarboxamiden, ihre Strukturcharakterisierung durch SEM und AFM sowie rheologische Messungen

- Detaillierte Flüssig-Flüssig-Extraktionsexperimente zur Extraktion von Ag(I), Yb(III) sowie U(VI) mit ausgewählten Liganden in Abhängigkeit von pH-Wert, Zusatz von Coliganden (n-Caprylsäure) bzw. 3d-Metallionen [Cu(II), Zn(II)] und Ligandkonzentration.

Ein interessantes Ergebnis der Untersuchungen ist die Beobachtung, dass bei Zusatz von Zn(II) die Extraktion von Yb(III) mit Diiminen signifikant ansteigt, während die Verteilung von U(VI) nicht beeinflusst wird. In Kristallisationsexperimenten konnte eine Reihe von heterobinuklearen Komplexen für die Metallpaare Nd(III)/Cu(II), La(III)/Cu(II) sowie U(VI)/Cu(II) und Diimine erhalten und strukturell charakterisiert werden. Im Gegensatz dazu bilden sich bei der Reaktion von U(VI) mit Bis(arylhyaazon)-Liganden binukleare peroxoverbrückte Komplexe. In Extraktionsversuchen zeigen einzelne Vertreter dieses Typs ausgeprägte Extraktionseigenschaften gegenüber Yb(III) und U(VI). Cu(II)-Salze erlauben in einem breiten experimentellen Bereich die Bildung supramolekularer Gele. Die höchste Stabilität der erhaltenen Gele (Cu, Ni, Ag) wurde für AgNO<sub>3</sub> und 4-Picolyl-methantricarboxamid beobachtet.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- <sup>1</sup>H-, <sup>13</sup>C- sowie <sup>15</sup>N-NMR-Untersuchungen zu den Wechselwirkungen ausgewählter Ligandtypen mit Am(III)
- Untersuchungen zur Flüssig-Flüssig-Extraktion von Am(III) mit ausgewählten Ligandtypen sowie Ableitung von Struktur-Wirkungsbeziehungen
- Laserfluoreszenzspektroskopische Untersuchungen zu den Wechselwirkungen von Cm(III) mit ausgewählten Ligandtypen
- Flüssig-Flüssig-Extraktionsuntersuchungen zur Coextraktion von Zn(II) und Cu(II) mit Yb(III) bzw. Eu(III) in Extraktionssystemen mit 2-hydroxy-3-methoxyphenyl- bzw. 2-hydroxy-3-ethoxyphenyl-substituierten Diiminen
- Versuche zur Einkristallzüchtung heterobinuklearer Metallkomplexe von Ln(III) und Zn(II) mit Diiminen
- Magnetische Messungen an heterobinuklearen Metallkomplexen
- Kristallisationsversuche von La(III)- und U(VI)-Komplexen mit Methandicarboxamiden
- Durchführung von Einzel- und Mehrionenexperimenten (La, Gd, Tb, Er) zur Extraktion mit ausgewählten Ligandssystemen

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Gloe, K. Gloe, M. Wenzel, L. F. Lindoy, F. Li: „Supramolecular chemistry in solvent extraction: towards highly selective extractants and a better understanding of phase transfer phenomena”, in Solvent Extraction and Ion Exchange: A Series of Advances, Vol. 21, B. A. Moyer, Ed., CRC Press, Boca Raton, 2013, in press

J. Meyer: „Carboxamide: Komplexbildung und supramolekulare Gele“, Bachelorarbeit, TU Dresden 2012;

K. Gloe: „Coordination behaviour of multifunctional Schiff-base ligands: from discrete molecules to helicates, Kolloquium, University of Queensland, Brisbane, 27.08.2012

J. März, J. Meyer, A. Heine, K. Gloe, K. Gloe: „Novel methane-tricarboxamides: synthesis, structure and metal binding”, 40. International Conference on Coordination Chemistry, Valencia, 09.-13.09.2012;

J. März: „Komplexbildung von d- und f-Elementen durch Carboxamide“, 10. Mitteldeutsches Anorganiker-Nachwuchs-Symposium 2012, Universität Jena, 23.09.2012

J. März: „Fluorescent RE(III) complexes of tripodal amides: TRLFS and multinuclear NMR spectroscopic studies”, International Workshop on Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy, HZDR Dresden-Rossendorf, 05.-07.11.2012

N. Kelly, A. Heine, F. Taube, K. Gloe, K. Gloe: „UV/Vis studies of 2-hydroxy-3-methoxyphenyl and 2-hydroxy-3-ethoxyphenyl diimines with f-Elements“, International Workshop on Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy, HZDR Dresden-Rossendorf, 05.-07.11.2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 014B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2010 bis 31.05.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 467.663,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Bernhard	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtvorhaben des Verbundprojektes dient der Weiterentwicklung der Koordinationschemie ausgewählter Metallionen des d- und f-Blocks mittels neuer supramolekularer Komplexbildnermoleküle für eine zielgerichtete Nutzung im nuklearen Bereich und im Umweltschutz. Im Mittelpunkt steht dabei die Erweiterung des Kenntnisstandes zur Aktinid- und Lanthanid-Koordinationschemie (z. B. U, Np, Am, Cm, Eu) mit neuen multifunktionalen N, O, S Donorliganden in Lösung verbunden mit der Charakterisierung auftretender Strukturen und der Beschreibung des Extraktionsverhaltens. Mittels makrozyklischer, multifunktionaler Chelatliganden (Calixarene, elementselektiv) soll das Transportverhalten von langlebigen Radionukliden (z. B.  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ) mit dem Ziel der Immobilisierung der sich bildenden Chelatkomplexe gesteuert werden sowie das Sorptions- und Komplexbildungsverhalten von radiotoxischen, kurzlebigen Radionukliden (z. B.  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ) unter naturnahen Bedingungen in potentiellen Wirts- oder Deckgesteinsformationen untersucht und beschrieben werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Teilprojekt I:

Synthese, Komplexbildung, Struktur und Trennpotential neuer multifunktionaler Komplexbildner mit N, O; S-Donorfunktionen für Aktinid- und Lanthanidionen. Das HZDR, Institut für Radiochemie (Dresden) ist beteiligt mit:

- Studien zur Komplexbildung ausgewählter Zielliganden und deren Grundstrukturen (z. B. Schiffsche Basen,  $\beta$ -Diketone) mit U(IV;VI) in Lösung mittels TRLFS und UVVis-Spektroskopie, Bestimmung der Bildungskonstanten sowie Strukturaufklärung der sich bildenden Komplexe mittels EXAFS-Messungen
- Darstellung kristalliner Komplexe mit Uran(VI, IV) sowie Np(V) und Bestimmung der Komplexstrukturen mittels Röntgenkristallstrukturanalysen und spektroskopischer Methoden
- Studien zur Komplexbildung ausgewählter Zielliganden und deren Grundstrukturen mit Np(V), Am(III), Cm(III) bzw. Eu(III) unter Einsatz der TRLFS, der laserinduzierter Photoakustik und UV-Vis-Spektroskopie sowie Bestimmung ihrer Komplexbildungskonstanten
- DFT Rechnungen zur Struktur von Aktinidkomplexen im Lösungsmittelkäfig und in der Gasphase

Teilprojekt II:

Steuerung des Transportverhaltens von Radionukliden mittels neuer makrozyklischer, multifunktionaler Chelatliganden. Das HZDR, Institut für Radiochemie (Leipzig) ist beteiligt mit:

- Herstellung der Radionuklide im Kernreaktor oder am Zyklotron
- Quantifizierung des spezifischen Komplexbildungsvermögens ausgewählter Chelatliganden gegenüber Radionukliden (binäres System)
- Herstellung / Reinigung relevanter Festphasen (z. B. Granit, Ton, synth. Polymere)
- Adsorptions- und Desorptionsuntersuchungen an potentiellen Wirts- und Deckgesteinen sowie an synthetischen Polymeren (binäre Systeme)
- Untersuchungen zum Adsorptionsverhalten der Chelatligandkomplexe mit Radionukliden (ternäres System)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### Teilprojekt I:

In diesem Berichtszeitraum lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf den quantitativen Auswertungen der spektroskopischen Daten mit Hilfe spezieller Analyseprogramme (Jobplot, Faktoranalyse, Hypspec) zur Bestimmung der Anzahl der sich in Lösung befindlichen Komplexspezies, der entsprechenden Bildungskonstanten und der Einzelkomponentenspektren. Hierbei zeigte sich aber, dass sich bisher nur die erhaltenen UV-Vis Daten für eine quantitative Auswertung eignen. Die berechneten Bildungskonstanten für Uranylkomplexe mit ausgewählten 1,3- $\beta$ -Diketonen in methanolischer Lösung liegen, in Abhängigkeit von der Struktur des Liganden, im Bereich von 4.7 bis 5.5 für 1:1 Komplexe und 9.6 bis 10.5 für die entsprechenden 1:2 Komplexe. Für die Uranylkomplexe der untersuchten Schiffischen Basen konnten mit Hilfe der Analyseverfahren Komplexbildungskonstanten im leicht sauren bis leicht basischen Bereich bestimmt werden, die aber einer größeren Schwankungsbreite unterliegen. Die Ursache für letzteres konnte noch nicht geklärt werden. Die Größe der Bildungskonstanten liegt für die 1:2 Komplexe von U(VI) mit NBA bei 13. Die sich bildenden 1:4 Uranylkomplexe mit HBAP bzw. HPIC besitzen Bildungskonstanten im Bereich von 19. Erweiterte TRLFS - Untersuchungen zur Komplexbildung von Eu(III) mit Schiffischen Basen wurden durchgeführt und befinden sich noch in der Auswertung. Die experimentelle Vorbereitung der Strukturuntersuchungen mittels EXAFS wurde abgeschlossen, wobei die eigentlichen Messungen erst im Februar 2013 durchgeführt werden können. Mit den geplanten DFT-Kalkulationen wurde begonnen.

#### Teilprojekt II:

Verschiedene wasserunlösliche Calix[4]arene (Herstellung: Uni Leipzig) wurden hinsichtlich ihres Extraktionsvermögens von  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  und  $^{65}\text{Zn}$  untersucht. Bis auf  $^{65}\text{Zn}$  wurden alle Radiotracer am Zyklotron der Forschungsstelle Leipzig hergestellt und gereinigt. Bei einem pH-Wert von 9 und einer Extraktionszeit von einer Stunde zeigt das p-tert-Butyl-25,27-Dicarboxymethoxy-calix[4]aren ein Extraktionsvermögen von  $100 \pm 5\%$  für  $^{85}\text{Sr}$ . 25,27-Bis(salicyliden)-diaminoethoxy-26,28-dihydroxycalix[4]aren zeigt ein Extraktionsvermögen von  $75 \pm 4\%$  für  $^{56}\text{Co}$ ,  $99 \pm 3\%$  für  $^{64}\text{Cu}$  und  $90 \pm 5\%$  für  $^{65}\text{Zn}$ . Die Extraktionsreaktion von  $^{85}\text{Sr}$  ist ab einem pH-Wert kleiner 4 vollständig reversibel, für  $^{64}\text{Cu}$  zeigt sich eine vollständige Reversibilität höchstens ab einem pH-Wert kleiner 2. Die Reaktion von  $^{56}\text{Co}$  ist über den pH-Bereich von 8 bis 3 semi-reversibel ( $\approx 50\%$ ) und jene von  $^{65}\text{Zn}$  ist irreversibel. Alle Extraktionsausbeuten sind bei gleichmolarem Verhältnis von Konkurrenzionen (u. a. Ca, Co, Cu, Fe, Na, Phosphat, Sulfat, Hydrogencarbonat, Weinsäure, Harnstoff und Zitronensäure als Inhaltsstoffe von Grundwasser) weitestgehend unbeeinflusst. Für die Reaktion von  $^{56}\text{Co}$  zeigt sich eine Erniedrigung der Extraktionsausbeute um etwa 10 % bei der Zugabe von anderen Übergangsmetallen. Die jeweils entstandenen Metall-Calixaren-Komplexe wurden mit IR- und UV/Vis-Spektroskopie untersucht. Das Metall-Ligand-Verhältnis kann mit einfachen Verteilungskurven nicht genau ermittelt werden. Zur Validierung der Methode wurden Extraktionsexperimente mit natürlichen Wasserproben durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass aus den künstlich kontaminierten Wasserproben ähnliche Extraktionsausbeuten wie in den Voruntersuchungen erzielt werden konnten.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

#### Teilprojekt I:

- Abschluss der Eu- und Cm Komplexbildungen, EXAFS-Untersuchungen sowie DFT Kalkulationen
- NMR – Untersuchungen von Metallkomplexen mit Diketonen bzw. Schiffischen Basen

#### Teilprojekt II:

- Festphasenfixierung der Calixarene und deren Sorptionsvermögen von Radionukliden (Batch-Versuche)
- Sorptionsvermögen festphasenfixierter Calixarene unter Konkurrenzeinfluss

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Beiträge zur International Conference on Nuclear and Radiochemistry (NRC 8), Como/Italien, Sept. 2012

- A. Mansel, K. Franke: Production and purification of  $^{56}\text{Co}$  at the Leipzig cyclotron
- K. Lindner, A. Günther: Spectroscopic Studies of Complexation Behaviour of U(VI) by Schiff Bases
- M. Poetsch, A. Mansel, R. Schnorr, S. Haupt, B. Kersting: Selective liquid-liquid extraction of Sr-85 with modified calixarenes

Masterarbeit M. Poetsch: Wechselwirkungsstudien von Radionukliden mit makrozyklischen, multifunktionalen Chelatliganden.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 014C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2010 bis 30.09.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 260.548,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kersting	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptaufgabe dieses Projektes ist es, mittels makrozyklischer, multifunktionaler Chelatliganden das Transportverhalten von Radionukliden zu steuern, mit dem Ziel der Immobilisierung der sich bildenden Chelatligandkomplexe. Dazu soll das Verteilungsverhalten von Radionukliden und der Chelatkomplexe sowohl thermodynamisch, als auch kinetisch beschrieben werden. Es sind relevante georadiochemische Untersuchungen im räumlichen und zeitlichen Ausbreitungsverhalten des ternären Systems: Radionuklide / Chelatliganden / Wirtsgestein im Rahmen des Projektvorhabens durchzuführen.

Im Rahmen des Projektes sollen ionenselektive Chelatliganden teilweise neu synthetisiert werden. Diese sollen auf ihre Eignung als Komplexierungs- und Transportreagenzien für verschiedene Radionuklide im Labor untersucht werden. Zum Einsatz soll eine Klasse von Verbindungen kommen, die ionenselektive Chelatgruppen besitzen und verschiedene Gastmoleküle oder -ionen aufnehmen können. Bei den zu untersuchenden Verbindungen handelt es sich um Komplexe der zweiten Generation auf Calixaren-Basis, die sich durch ein kooperatives oder antikooperatives Bindungsverhalten auszeichnen, und deren Wirksamkeit auf allosterischen Effekten beruht. Gleichzeitig kann über gezielt eingebrachte funktionelle Gruppen Einfluss auf die Stabilität, Löslichkeitseigenschaften und Einsatzbreite der neuartigen Chelatliganden genommen werden. Für die Verwirklichung dieser Ziele müssen sowohl synthetische Arbeiten zur Darstellung der gewählten Chelatliganden und entsprechender Metallkomplexe als auch unterschiedliche Charakterisierungsmethoden durchgeführt werden. Als Ausgangsverbindungen sollen die gut untersuchten Calixarene herangezogen werden. Durch die Anzahl und die Positionierung zusätzlicher Chelatfunktionen am makrozyklischen Grundgerüst soll die Bindungsselektivität und das Extraktionsverhalten eingestellt werden.

Besondere Aufmerksamkeit ist auf das geochemische Verteilungsverhalten der synthetisierten Liganden bzw. Radionuklid-Komplexe gerichtet. Da das Rückhaltevermögen von geologischen Barrieren für Radionuklide stark vom geochemischen Milieu abhängig ist und sich eine Änderung desselben auf das Sorptions-, Komplexierungs- und Kolloidbildungsverhalten der Spezies auswirkt, werden die oben genannten Untersuchungen in Abhängigkeit von den geochemischen Parametern eines natürlichen Systems durchgeführt.

Dieses Projekt wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Radiochemie am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf durchgeführt. Eine enge Zusammenarbeit besteht mit der Reactive Transport Division des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf in Leipzig.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Darstellung und Charakterisierung der Chelatliganden
- Komplexierungsvermögen der Chelatliganden gegenüber Radionukliden
- Adsorptionsverhalten der Chelatligandkomplexe mit Radionukliden
- Festphasenfixierung von Chelatliganden
- Bestimmung von Komplexbildungskonstanten der Radionuklid-/Aktinid-Komplexe
- Bestimmung des Extraktionsverhaltens der Radionuklid-/Aktinid-Komplexe; Flüssig-Flüssigphasen-Experimente
- Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Weiterentwicklung und Optimierung verwendeter Synthesestrategien zur Darstellung von lower- bzw. upper- rim substituierten multifunktionalen Calix[4]arenen; es gelingt in vielen Fällen Bindungsstellen verschiedener chemischer Affinität einzubringen und die Konformation der Zielmoleküle zu diktieren
- eine Vielzahl neuer multifunktionaler Calix[4]aren-Derivate wurde umfangreich spektroskopisch, spektrometrisch und mikroanalytisch charakterisiert, zudem konnten an zahlreiche Verbindung Röntgenkristallstrukturanalysen durchgeführt und so letztlich die Konformation der Calix[4]arene bewiesen werden
- Fixierung von mono-, di-, tri- and tetrasubstituierten Methoxycarboxyl-calix[4]arenen auf CPG-Silikat-Festphasen; CP-MAS-NMR- und Raman-Spektren zeigen die kovalente Bindung der Calix[4]arene-Einheiten auf dem Substrat. DTA Untersuchungen zeigen thermische Stabilität bis ca. 300 °C, Elementaranalysen zeigen eine Beladungen des Substrates von bis zu 0,5 mmol/g; Entwicklung einer experimentellen Routine für Fest-Flüssig-Extraktionen (Batch-Experimente), in ersten Experimenten zeigt sich eine vergleichsweise hohe Extraktionsleistung bei zweiwertigen Metallkationen
- Cu(II)- und Uranyl-Komplexe von 5,11,17,23-Tetrakis[N-(3,5-di-tert-butylsalicyliden)]-25,26,27,28-tetrakis[(ethoxycarbonyl)-methoxy]calix[4]aren; erwartungsgemäß Bildung stabiler Zweikernkomplexe, es konnten keine allosterischen Wechselwirkungen beobachtet werden
- Cu(II)/Na(I)-Komplex von 25-(Bis-tert-butyl salicyliden-aminoethoxy)-27-hydroxy-26,28-krone-5-calix[4]aren; beide Funktionalitäten zeigen wie gewünscht eine unterschiedliche chemische Affinität; der Kronenether zeigt zudem eine Selektivität für Na(I) innerhalb der Alkali-Kationen; die Salicyliden-Bindungstelle zeigt keine auffällige Selektivität bei den zweiwertigen 3d-Elementen Co(II), Ni(II), Cu(II) und Zn(II), dreiwertige f-Elemente bilden keine isolierbaren Komplexe; allosterische Wechselwirkungen wurden nicht beobachtet
- Zn(II)- und Cd(II)-Komplexe von Di(4-(tert-butyl)-2,6-bis((ethylimino)methyl)phenol)-verbrückten Doppelcalix[4]arenen; Umfangreiche spektroskopische Untersuchungen und Röntgenkristallstrukturanalyse zeigt die Bindung der Metall-Kationen an den zentralen Salicyliden-Fragmenten; die dargestellten Komplexe zeigen ein auffällig bessere Löslichkeit als der freie Ligand; in Titrationsexperimenten (photometrisch) konnten Komplexzusammensetzungen (M:L) von 1:1, 2:1 sowie 5:1 beobachtet werden, isolierbare Komplexe haben 1:1-Zusammensetzung; Fluoreszenzspektroskopische Untersuchungen zeigen einen starken solvatochromen CHEF-Effekt der Komplexe
- Flüssig-Flüssig-Extraktionsexperimente mit 25,27-Bis(carboxymethoxy)-26,28-dihydroxy-calix[4]aren; Kompetitive Extraktion von Uranyl mit ausgewählten Lanthanoiden, in einer Reihe Y(III), La(III), Ce(IV) und Th(IV) zeigt sich eine hohe Selektivität gegenüber des zweiwertigen Uranyl-Kationen
- Wasserlösliche multifunktionelle Calix[4]aren-Derivate ließen sich nicht darstellen

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Extraktionsuntersuchungen (mit HZDR Forschungsstelle Leipzig)
- umfangreiche strukturanalytische Untersuchungen der Liganden und Metallkomplexe
- Bestimmung von Komplexbildungskonstanten mittels NMR- und UV/Vis-Spektroskopie sowie aus Extraktionsexperimenten

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Ausgewählte Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekttreffens am 20. November 2012 am HZDR vorgestellt  
 Posterpräsentation, International Workshop on Advanced Techniques for Actinide Spectroscopy (ATAS 2012):  
 M. Poetsch, A. Mansel, R. Schnorr, S. Haupt, B. Kersting: Selective Extraction of  $85\text{Sr}^{2+}$  with modified Calix[4]arenes in a liquid-liquid system

Posterpräsentation, International Workshop on Advanced Techniques for Actinide Spectroscopy (ATAS 2012):  
 S. Ullmann, R. Schnorr, S. Haupt: Multifunctional complexation agents for d- and f-elements

R. Schnorr, S. Haupt, M. Poetsch, A. Mansel, J. Lippmann-Pipke, B. Kersting: Synthesis, spectroscopic and structural characterization of Bis(carbonylmethoxy)-calix[4]arenes and their Extraction with  $85\text{Sr}$  under Conditions near to Nature in a Synthetic Groundwater, in preparation

S. Haupt, R. Schnorr, S. Ullman, B. Kersting: Calix[4]arenes as Scaffolds for Salicylidene and Robson-type ligands: Synthesis, Characterization and Complexation Properties, in preparation

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 019A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.01.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 572.947,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Stumpf	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es einen Beitrag zur sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls zu leisten. In diesem Kontext wollen wir ein auf atomarer Skala basierendes Prozessverständnis der Wechselwirkung von Actiniden und Spaltprodukten mit endlagerrelevanten Mineralen bzw. Mineraloberflächen erlangen, um so Retentionsmechanismen auf langen Zeitskalen zu verstehen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Innerhalb des Gesamtprojekts sind folgende Arbeitspakete vorgesehen:

- a) Dreiwertige Actinide Pu, Am, Cm (Phosphate, Carbonate, Eisen(hydr)oxide)
- b) Vierwertige Actiniden Th, U, Np, Pu (Silicate, Sulfate, Carbonate, Phosphate, Sulfide, Eisen(hydr)oxide, LDH-Phasen)
- c) Radium und Spaltprodukte Se(IV), Se(VI), Tc (Einbau in und Wechselwirkung mit Sulfaten, Sulfiden, LDH Phasen, Carbonaten)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Arbeiten zum Teilprojekt werden im Wesentlichen von drei Personen an drei unterschiedlichen Orten durchgeführt.

- 1) Herr Sascha Hofmann hat seine Doktorarbeit am 1. Juni 2012 am KIT-INE angefangen.
- 2) Frau Rodríguez Galán hat ihre Doktorandenstelle am 15. Juli angetreten und wurde an die Universität Oviedo, Spanien delegiert.
- 3) Frau Dr. Rojo Sanz hat ihre Postdoktorandenstelle am 1. August angetreten und wurde ans PSI, Schweiz delegiert.

Durch die verspäteten Eintrittsdaten der Mitarbeiterinnen verzögerten sich die Arbeiten um ca. 6 Monate.

Zu 1)

- Hochauflösende AFM Messungen an Calciteinkristallen in Gegenwart von Nitrat zeigen einen deutlichen Einfluss des Anions auf die Oberflächenstruktur (in Zusammenarbeit mit der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).
- Eu(III) TRLFS Messungen an Calcitpulver und Kristallen, Synthese und TRLFS Messungen an Eu(III) dotierten  $\text{NaNO}_3$  Einkristallen. Hier verdichtet sich der Hinweis, dass das Europiumion in eine Nitratstruktur auf der Calcitoberfläche eingebaut wird.

Zu 2)

- Kristallisation von  $(\text{Sr,Ba})\text{SO}_4$  solid-solutions in Zusammenarbeit mit Felix Brandt (FZJ-IEK6). Charakterisierung dieser Verbindungen mit Hilfe von XRD und SEM.
- Entwicklung eines thermodynamischen Modells zur Vorhersage der Gleichgewichtsendglieder einer solid-solution.
- Synthese und Charakterisierung von Se(VI) dotierten Ettringitkristallen.
- Vorversuche zum Einbau von Se(VI) in Calcit durch Mitfällungsreaktionen.

Zu 3)

- Synthese verschiedener Zementphasen: C-S-H, Tobermorit, AFt, AFm- $\text{Cl}_2$ , AFm- $\text{SO}_4$  und deren Charakterisierung.
- Erste Sorptionsversuche von Se(IV) an verschiedenen Zementphasen (C-S-H, Tobermorit, AFt, AFm- $\text{Cl}_2$ ) und an  $\text{TiO}_2$  unter hochalkalischen Bedingungen. Resultat: Se(IV) Sorptionskinetik. Vergleich mit Se(IV) Sorptionskinetik an  $\text{TiO}_2$ .
- Optimierung der Methodik zur Reduktion von Se(IV) unter hochalkalischen Bedingungen.
- Vergleich elektrochemischer Methoden und reduzierender Reagenzien (Hydrazine).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Zu1)

- Oberflächensensitive Röntgenbeugungsmessungen an Calciteinkristallen in Gegenwart von Nitrat und Y/Am(III) (in Zusammenarbeit mit der Advanced Photon Source des Argonne Nat. Lab., USA)
- Cm(III) Messungen an Calcit mit TRLFS, weiterführende AFM Untersuchungen zu Oberflächen(umbau)effekten (in Zusammenarbeit mit der EPFL).

Zu 2)

- Oberflächen Charakterisierung und Quantifizierung der  $(\text{Sr,Ba})\text{SO}_4$  solid-solutions.
- Molekulare Simulationen zum Einbauprozess von  $\text{SeO}_4^{2-}$  in Calcit.
- Vorbereitung der Beiträge für die Goldschmidt Konferenz.

Zu 3)

- Abschluss Charakterisierung synthetisierter Zementphasen.
- Abschluss Sorptionsversuche mit Se(IV) an verschiedenen Zementphasen.
- Reduktion von Se(IV) unter hochalkalischen Bedingungen und Charakterisierung der reduzierten Se Spezies mittels UV-Vis.
- Erste Sorptionsversuche von Se(-II) an verschiedenen Zementphasen.
- Vorbereitung Proben für EXAFS Untersuchungen: Se(IV), Se(-II) sorbiert an Zementphasen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 019B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.01.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 263.424,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Neumann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des ImmoRad-Vorhabens ist es einen Beitrag zur sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls zu leisten. In diesem Kontext wollen wir ein auf atomarer Skala basierendes Prozessverständnis der Wechselwirkung von Actiniden und Spaltprodukten mit endlagerrelevanten Mineralen bzw. Mineraloberflächen erlangen, um so Retentionsmechanismen auf langen Zeitskalen zu verstehen. Konkret sollen die strukturellen, physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften von endlagerrelevanten Verbindungen experimentell charakterisiert werden. Diese Arbeiten sind zwingend notwendig, um dann thermodynamische Modellrechnungen durchführen zu können, die wiederum die unverzichtbare Grundlage für eine Vorhersage des Langzeitretentionsverhaltens für Radionuklide bilden.

Das Ziel dieses Teilprojektes ist es die Rolle von Eisensulfiden bei der Immobilisierung des Radionuklids Selen zu charakterisieren. Im Speziellen soll die Stabilität von Se-dotierten Eisensulfiden unter variablen Eh/pH-Bedingungen untersucht werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm umfasst die Synthese der Selen-dotierten Eisensulfide in Abhängigkeit unterschiedlicher Bildungsmechanismen (spontane Präzipitation, Kristallwachstum). Die Konzentration und Speziation von Se in den Eisensulfiden wird mit Synchrotronmethoden untersucht. In einer elektrochemischen Zelle werden die Sulfide variablen Eh/pH-Bedingungen ausgesetzt, die realistischen Szenarien bei der Migration aus anoxischen Porenwässern des Opalinustons in oxische Grundwässer widerspiegeln.

Aus dem Vergleich der Konzentration und Speziation von Selen in den Sulfiden vor und nach dem Experiment und in neugebildeten oxidierten Eisenphasen (Oxide/Hydroxide) können Erkenntnisse über die Stabilität in den Eisensulfiden gewonnen werden. Insgesamt werden die Untersuchungen ein besseres Verständnis über das Retentionsvermögen von Eisenphasen gegenüber radiogenem Selen im Bereich von Endlagern ermöglichen.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Im zweiten Halbjahr 2012 konnten die ersten experimentellen Arbeiten durchgeführt werden. Schwierigkeiten gab es zu Beginn der Arbeiten, da die vorhandene Glovebox, in der die unter kontrollierten Eh- und pH-Bedingungen Präzipitate hergestellt wurden, zu hohe Sauerstoffgehalte aufwies. Nachdem dieses Problem behoben war, konnten erste Präparate von Eisensulfiden und Eisenoxiden erfolgreich hergestellt werden. Die Qualität der Produkte wurde mit röntgendiffraktometrischen Analysen kontrolliert.

Weiterhin wurden die Konzepte der Doktorarbeiten verfeinert. Das Projekt wurde auf dem Seilen2012-Workshop am 8. und 9. Oktober 2012 in einem Posterbeitrag vorgestellt (N. Börsig, S. Potsch, A. Diener & T. Neumann: Incorporation and stability of Se doted iron minerals).

Für die nächste Goldschmidt-Konferenz (25. bis 30.08.2013) in Florenz wurde von dem Leiter dieses Teilprojektes Prof. Dr. Thomas Neumann zusammen mit Dr. Andreas Scheinost eine Session mit dem Titel „Interaction of Oxyanions with Mineral Phases: Sorption, Redox Transformation, and Structural Incorporation“ vorgeschlagen und akzeptiert. Während der Konferenzsession werden die Mitarbeiter des ImmoRad-Projektes ihre bereits erzielten Forschungsergebnisse präsentieren und mit den Konferenzteilnehmern diskutiert.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan. Im ersten Halbjahr soll ein Antrag bei der Synchrotronquelle ANKA des KIT gestellt werden, um erste Strukturuntersuchungen mittels Röntgenabsorption durchzuführen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 019C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.01.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 243.568,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Bosbach	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es einen Beitrag zur sicheren Endlagerung von hochradioaktivem Abfall zu leisten. Ein auf atomarer Skala basierendes Prozessverständnis der Wechselwirkung von Actiniden und Spaltprodukten mit endlagerrelevanten Mineralen bzw. Mineraloberflächen soll erarbeitet werden. Schwerpunktmäßig wird dabei untersucht, in wie weit vierwertige Actinide und zweiwertiges Radium durch Mischkristallbildung ihr Mobilitätsverhalten verändern. Durch die Verknüpfung der experimentell gewonnenen Daten mit atomistischen Modellrechnungen sollen dann thermodynamische Modelle entwickelt werden, mit denen das Verhalten dieser Radionuklide für sehr lange Zeiträume vorhergesagt werden können.

Folgende Teilziele wurden definiert:

- Quantenmechanische Berechnungen zur Substitution von zwei  $\text{Ca}^{2+}$  Ionen durch  $\text{Na}^+$  und  $\text{Eu}^{3+}$  in Carbonat- als auch in Phosphatverbindungen.
- Synthese, Charakterisierung und thermodynamische Beschreibung von phosphat- und silikathaltigen Mischkristallreihen mit tetravalenten Actiniden und dem homologen tetravalenten Element Zr.
- Synthese, Charakterisierung und thermodynamische Beschreibung von Sr/Ba/Ra-Sulfat Mischkristallreihen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturstudie zu den angesprochenen Mischkristallreihen  
 AP2: Synthese der Mischkristallreihen  
 AP3, AP4, AP5: Charakterisierung, Strukturaufklärung und kalorimetrische Messungen  
 AP6: Modellierungen  
 AP7: Ergebnisdokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: Zr(IV) haltige LDHs wurden selektiv bis zu einem Molenbruch ( $Zr/Zr+Al$ ) von 0,5 synthetisiert. Eine Erhöhung des Molenbruchs (bis 0,9) führte zur Bildung von Brucit als Nebenphase. Erste Th/U-Silikat Mischkristall-Systeme wurden synthetisiert. Durch Co-Präzipitation wurden Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristalle synthetisiert.
- AP3, 4, 5: Die synthetisierten LDHs wurden mittels XRD, SEM/EDX, FTIR und TGA analysiert. Die XRD-Parameter für die LDH-Phasen (Molenbruch bis 0,5) folgen dem Vergard-Gesetz und bestätigen somit das Vorliegen einer Mischkristallreihe. Die Phasenreinheit der Th/U-Silikat Mischkristall-Systeme wurde mittels XRD überprüft und einige Proben zeigen unerwünschte Nebenprodukte. Phasenreinheit und Nahordnung der Endglieder (ThSiO<sub>4</sub> und USiO<sub>4</sub>) konnte mittels EXAFS Messungen bestätigt werden. Baryte und Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Keimkristalle wurden hergestellt, aufbereitet und mittels REM-EDX charakterisiert.
- AP6: Der Einbau von Zr-IV in die LDH Struktur wurde thermodynamisch modelliert. Geringe Zr-IV Mengen erhöhen die molare freie Bildungsenthalpie und damit die Löslichkeit erheblich. DFT Berechnungen wurden für das ternäre Ba-Sr-Ra/SO<sub>4</sub> System einschließlich Paardeffekte (Sr-Sr und Ra-Ra) durchgeführt. Detaillierte thermodynamische Berechnungen zur Versuchsplanung der Ba-Sr-Ra-SO<sub>4</sub> Sorptionsversuche wurden durchgeführt.
- AP7: Noch nicht begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen
- AP2: Hydrothermale Synthesen von U/Th als Phosphat/Arsenat Mischkristallsysteme sind geplant. Reproduktion und Synthese weiterer Th/U-Silikat Mischkristall-Systeme sind in Vorbereitung.  
Weitere Synthesen von Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristallen aus der Schmelze mittels Flux-Methode sollen durchgeführt werden und die erhaltenen Kristalle für anschließende Sorptionsversuche mit Ra eingesetzt werden.
- AP3, 4, 5: Die synthetisierten Zr-haltigen LDH Verbindungen sollen mit EXAFS untersucht werden um Daten der kristallinen Nahordnung zu erhalten, die zur Klärung des Einbaumechanismus beitragen. Kalorimetrische Messungen sind geplant um die Löslichkeit dieser Phasen im Temperaturbereich von 25 bis 70 °C abzubilden. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Prof. Winkler (Frankfurt a.M.) wurden für die Th/U Silikat-Systeme kalorimetrische Messungen (Tieftemperatur) begonnen.
- AP6: Für das ternäre Ba-Sr-Ra/SO<sub>4</sub> System sollen mittels Monte Carlo Simulationen Ba-Ra und Ba-Sr Wechselwirkungen ermittelt werden um die Mischungsenthalpien zu bestimmen.
- AP7: Noch nicht begonnen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 019D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.01.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 400.943,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Scheinost	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im vorliegenden Verbundprojekt wird ein auf atomarer Skala basierendes Prozessverständnis der Wechselwirkung von Actiniden und Spaltprodukten mit endlagerrelevanten Mineralen bzw. Mineraloberflächen erlangt, um so Retentionsmechanismen auf langen Zeitskalen zu verstehen und einen Beitrag zur sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls zu leisten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- A) Mögliche Inkorporation von Pu(III) in Magnetit und ein Fe-Carbonat (Siderit oder Chukanovit), basierend auf der langfristigen Equilibrierung (2 Jahre) von Pu(III) und Pu(V) mit diesen Mineralen, im Vergleich zu frisch gefällten Pu(III)/Fe(II)/Fe(III)/Carbonat Kopräzipitaten. Die Struktur und Oxidationsstufe der mit der Festphase assoziierten Pu-Spezies wird spektroskopisch (XAFS) untersucht, und die Lösungsbedingungen (Eh, pH, gelöste Ionen) werden erfasst, um Stabilitätskonstanten der Pu(III)-Sorptionskomplexe und Festphasen zu bestimmen. Zwei entsprechende Proben, die seit Anfang 2010 equilibriert werden, ermöglichen auch Zeitskalen jenseits von 2 Jahren.
- B) Reduktive Reaktion von Np(V) mit Mackinawit (FeS) und Magnetit. Die Reaktionsprodukte werden mit Np(IV)/Fe(II)/S(-II) und Np(IV)/Fe(II)/Fe(III)/O(-II) Kopräzipitaten verglichen. Durch die Reaktion mit Mackinawit kann auch die bisher vorwiegend bei tieferen Redoxstufen beobachtete Sulfidkoordination von Np(IV) verifiziert werden. Untersuchung der möglichen Inkorporation von Np(IV) durch die Fe(II)-Carbonate Siderit oder Chukanovit, sowohl im Langzeit-Sorptionsexperiment (2 Jahre) als auch an Actinid/Fe(II)/Karbonat Kopräzipitaten. Wie oben werden die Struktur und Oxidationsstufe der mit der Festphase assoziierten Np-Spezies spektroskopisch (XAFS, eventuell auch XPS) untersucht, und die Lösungsbedingungen (Eh, pH, gelöste Ionen) werden sorgfältig erfasst, um Stabilitätskonstanten der Sorptionskomplexe und Festphasen zu bestimmen.
- C) Das IRE wird die von PSI-LEG hergestellten „solid solutions“ zwischen Se(IV/VI) und LDH und Tc(VII) und LDH sowie die von KIT-IMG hergestellten „solid solutions“ zwischen Se und Eisensulfiden mittels der eigenen XAFS-Beamline ROBL auf Oxidationsstufen und Nahordnung untersuchen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bearbeitung des Programmpaketes A-1 (Kopräzipitation):

Auswertung der 2 mit Pu kopräzipitierten Magnetite (höhere und niedrigere Pu Beladung): Phasenidentifizierung als Magnetit (XRD), Pu liegt als Pu(III) vor (XANES), Einbau von Pu(III) auf Oh im Magnetit-Kristallgitter, wobei die Koordinationsumgebung stark deformiert wird (EXAFS).

Alterung der 2 mit Pu kopräzipitierten Magnetite mittels Zugabe von Fe(II) durchgeführt.

Messergebnisse: Phasenidentifizierung als Magnetit (XRD), Pu liegt als Pu(III) vor (XANES), EXAFS zeigt einen graduellen Übergang von eingebautem Pu zu sorbiertem Pu.

Bei allen 4 Proben ist die Pu-Gleichgewichts-Lösungs-Konzentration unterhalb der Nachweisgrenze der verwendeten LSC-Methode ( $10^{-9}$  M).

Auflösungsexperimente wurden sowohl für die 4 Magnetit als auch die 4 Ferrihydrite durchgeführt.

TEM-Untersuchungen aller bisherigen Kopräzipitationsproben wurden durchgeführt, ebenso XPS-Messungen.

Bearbeitung des Programmpaketes A-2 (Sorptions):

Auswertung der Langzeit-Sorptions-Alterungsserien Pu(III)-Magnetit und Pu(V)-Magnetit nach 2 Jahren: Pu liegt weiterhin als Pu(III) vor (XANES), die Nahordnung entspricht weiterhin dem bisher beobachteten tridentaten Sorptionskomplex (EXAFS), daher keine Änderung der Oberflächen-Speziation mit der Alterung.

XPS-Messungen erfolglos, da zu geringe Pu-Konzentration für diese Technik.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Bearbeitung des Programmpaketes A-1 (Pu-Kopräzipitation):  
Erarbeitung einer Publikation der Pu-Kopräzipitationsdaten
- Bearbeitung des Programmpaketes A-2 (Pu-Sorption):  
Erarbeitung einer Publikation der Pu-Sorptionsdaten
- Bearbeitung des Programmpaketes B (Np-Kopräzipitation/Sorption):  
Derzeit wird eine neue Np-Glovebox in Betrieb genommen. Im ersten Halbjahr 2013 werden sowohl die Np-Kopräzipitations- als auch die Np-Sorptionsexperimente begonnen.
- Bearbeitung des Programmpaketes C-1 (Se-LDH-XAS-Messungen für PSI-LES):  
Geplant für die 2. Jahreshälfte 2013

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 019E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.01.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 243.372,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Winkler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es, einen Beitrag zur sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls zu leisten. In diesem Kontext soll ein auf atomarer Skala basierendes Prozeßverständnis der Wechselwirkung von Actiniden und Spaltprodukten mit endlagerrelevanten Mineralen bzw. Mineraloberflächen erlangt werden, um so Retentionsmechanismen auf langen Zeitskalen zu verstehen. Das Frankfurter Teilprojekt trägt zum Gesamtziel bei in dem (a) thermodynamische Modellrechnungen auf Basis von DFT-Rechnungen durchgeführt werden sollen, (b) thermodynamische Größen von Mischkristallen mit Mikrokalorimetrie experimentell bestimmt werden sollen, und (c) die experimentelle Bestimmung von Gitterschwingungen mit Mikro-Ramanspektroskopie genutzt werden soll, um die atomistischen Modellrechnungen zu validieren

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Zum Themenbereich A (Dreiwertige Actinide: Einbau von Pu, Am, und Cm in Phosphate, Carbonate und Eisen(hydr)oxide) sollen in dem hier beantragten Teilprojekt theoretischen Untersuchungen zum Einbau von Cm(III) in Calcit durchgeführt werden.

Zum Themenbereich B (Vierwertige Actinide: Einbau von Th, U, Np, und Pu in Silikate, Sulfate, Carbonate, Phosphate, Sulfide, Eisen(hydr)oxide, und LDH-Phasen) sollen in dem hier beschriebenen Teilprojekt thermodynamische Größen durch mikrokalorimetrische Bestimmungen der Wärmekapazität und Raman-aktive Gitterschwingungen durch Mikro-Ramanspektroskopie experimentell bestimmt werden.

Die zum Themenbereich C (Radium und Spaltprodukte: Einbau von Se(IV), Se(VI), und Tc in Sulfate, Sulfide, LDH Phasen, und Carbonate) geplanten Arbeiten sind wiederum theoretisch und sollen die im Institut für Mineralogie und Geochemie des KIT durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Stabilität von Selen-dotierten Fe-Sulfiden ergänzen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Herr Bauer ist seit dem 1.10.2012 im Rahmen des Projekts als Postdoktorand beschäftigt, somit konnte ab diesem Zeitpunkt mit den experimentellen Arbeiten begonnen werden.

Im Rahmen des Themenbereichs A (Dreiwertige Actinide) wurde der Meilenstein „Einreichung einer Publikation Cm-Einbau in Calcit“ aufgrund der Verzögerung bei Projektbeginn nicht zum geplanten Zeitpunkt erreicht. Für die geplanten Modellrechnungen wurde auch sehr viel mehr Computerkapazität als veranschlagt benötigt und die zusätzliche Rechenzeit in Jülich stand erst ab November 2012 zur Verfügung. Das Manuskript liegt nun in einer vorläufigen Fassung vor und wird im nächsten Berichtszeitraum eingereicht.

Zum Themenbereich B (Vierwertige Actinide) wurde in Zusammenarbeit mit dem FZJ-IEK6 begonnen, die dort hergestellten Uran- und Thorium-haltigen Phasen mit Mikroramanspektroskopie bei Atmosphärendruck sowie bei hohen Drücken in Diamantstempelzellen zu untersuchen. Die im FZJ-IEK6 synthetisierten Proben sind Coffinite ( $\text{USiO}_4$ ), Thorit ( $\text{ThSiO}_4$ ) sowie Mischkristalle dieser beiden Phasen und weiteren Studtite ( $\text{UO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) sowie Metastudtite ( $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Die Bestimmung der Wärmekapazitäten der Proben mit dem Mikrokalorimeter wurde begonnen.

In Zusammenarbeit mit dem STFC Rutherford Appelton Laboratory (Didcot, UK) wurden DFPT-Untersuchungen an  $\text{BaSO}_4$  und  $\text{RaSO}_4$  mit Barit-Struktur durchgeführt. Diese Studien gehören zum Themenbereich C (Radium und Spaltprodukte). Erste Ergebnisse zeigen, dass die Standardentropie von  $\text{RaSO}_4$  etwa  $5 \text{ J/K/mol}$  höher ist als die von  $\text{BaSO}_4$ . Der Meilenstein „Publikation DFT-Rechnungen zu Se-haltige Phasen“ wird innerhalb der nächsten zwei Monate erreicht.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten werden wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Im Februar 2013 werden mit dem im FZJ-IEK6 synthetisierten Uran- und Thorium-haltigen Verbindungen (siehe Pkt. 3) strukturelle Untersuchungen bei hohen Drücken durchgeführt werden. Diese Messungen werden an der Extreme Conditions Beamline an der PETRA III Synchrotronstrahlungsquelle des DESY, Hamburg durchgeführt werden. Die bereits begonnenen Untersuchungen der Wärmekapazitäten dieser Verbindungen werden fortgesetzt und abgeschlossen werden. Die ersten Proben von LDH-Phasen, synthetisiert am FZJ-IEK6, sollen mit kalorimetrischen Messungen in den nächsten Wochen charakterisiert werden. Die Untersuchung der Proben aus UO-DG (Carbonate, Sulfate) wird begonnen werden, sobald diese Proben vorliegen. Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen der Mischkristallreihe  $\text{BaSO}_4 - \text{SrSO}_4$  werden in Zusammenarbeit mit dem FZJ weitergeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

F. Heberling, V. Vinograd, R. Polly, S. Heck, J. Rothe, J. Gale, D. Bosbach, H. Geckeis, B. Winkler: A thermodynamic entrapment model for the quantitative description of the structural incorporation of Selenium(IV) into calcite, in Vorbereitung

V.L. Vinograd, F. Brandt, K. Rozov, M. Klinkenberg, K. Refson, B. Winkler, D. Bosbach: Solid-aqueous equilibrium in the  $\text{BaSO}_4\text{-RaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  system: first-principles calculations and a thermodynamic assessment, in Vorbereitung

S. Labs, J. D. Bauer, B. Winkler, L. Bayarjargal, H. Curtius, D. Bosbach: High-pressure behaviour of studtite,  $\text{UO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , and metastudtite,  $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - a Raman investigation, Abstract submitted for EMR-S 2013 Spring Meeting

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 020A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 550.191,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Denecke	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Durch Bündelung der Forschungsaktivitäten und Expertisen der Verbundpartner wird im Hinblick auf die Optimierung von technisch realisierbaren Extraktionsverfahren zur Abtrennung der Actiniden von den in ihrem chemischen Verhalten ähnlichen Lanthaniden ein fundiertes Verständnis des Extraktionsmechanismus auf molekularer Basis gewonnen. Dazu werden systematische synthetische Ansätze verfolgt und innovative spektroskopische und röntgenographische Techniken eingesetzt, um Informationen über die Metall-Ligand-Bindungsverhältnisse zu erhalten. Thermodynamische und kinetische Daten sowie vergleichende Studien der Actiniden- und Lanthaniden-Komplexe ermöglichen es, die Triebkräfte der Selektivität effizienter komplexbildender Liganden zu verstehen. Diese Information kann gezielt angewendet werden, um verbesserte Extraktionsmittel zu entwickeln. In Arbeiten zur Konditionierung für die Endlagerung wird untersucht, inwieweit die von den Trennprozessen generierten Actinidenprodukte für eine Weiterverarbeitung geeignet sind.

Diese Information wird zur Synthese maßgeschneiderter Extraktionsmittel und zur Entwicklung optimierter Prozessbedingungen verwendet. Im Rahmen dieser Arbeiten wird Kompetenz auf dem Gebiet der Actiniden- und Radiochemie sowie der sicheren Nuklearen Entsorgung geschaffen und erhalten.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket A: Synthese und Charakterisierung neuer Extraktionsliganden für die Actiniden/Lanthanidentrennung – „Synthese und Screening-Tests“

Arbeitspaket B: Aufklärung der Selektivität ausgewählter Extraktionsmittel zwischen dreiwertigen Actinid- und Lanthanidionen

Arbeitspaket C: Studien in Hinblick auf eine Einbindung in Konditionierungsprozesse – „Prozessstudien“

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *Arbeitspaket A:*

Vorarbeiten an BTP-Komplexen mit  $^{243}\text{Am}(\text{III})$  und  $^{242}\text{Pu}(\text{III})$  zeigten, dass  $^{15}\text{N}$ -Signale aller koordinierender  $^{15}\text{N}$ -Spins nur durch Isotopenmarkierung erhältlich sind. Im Fall des  $^{242}\text{Pu}$ -Komplexes bleibt dies noch für die Triazinringe zu zeigen. Um eine effiziente Analyse dieser und weiterer Actinid-Komplexe zu gewährleisten wird die Synthese eines vollständig  $^{15}\text{N}$ -isotopenmarkierten  $n\text{Pr}$ -BTPs angestrebt. Besonders die Markierung des Pyridinstickstoffs ist eine besondere Herausforderung. Die Synthesearbeiten sind Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam).

#### *Arbeitspaket B:*

Um eine vollständige Datenbasis zur Analyse der  $n\text{Pr}$ -BTP Komplexe in Actiniden und Lanthaniden zu gewinnen, wurden im letzten Berichtszeitraum besonders NMR-spektroskopische Untersuchungen an den schweren Lanthaniden vorgenommen. Diese sind aufgrund der magnetischen Eigenschaften der Metallionen besonders schwer NMR spektroskopisch zugänglich. Schnelle Relaxation der zu beobachtenden Spins

sowie vollständiges Bleichen von Signalen innerhalb bekannter Radien um die verschiedenen Metallionen machen Detektion und Zuordnung schwer bis unmöglich. Arbeiten im letzten Berichtszeitraum zielten sowohl auf die Entwicklung geeigneter Methoden, wie auf die mathematische Zuordnung durch Extrapolation in der Lanthanidenreihe. Auch diese Arbeiten sind Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam).

Zur Erweiterung des Kenntnistanandes wurden Arbeiten zu weiteren Ligandentypen durchgeführt, die bekannt dafür sind, die Extraktion von Am(III) von Eu(III) mit Trennfaktoren  $>100$  durchzuführen. Komplexe von CyMe<sub>4</sub>-BTBP und CyMe<sub>4</sub>-BTPhen wurden gemeinsam mit Kooperationspartnern der Uni Manchester, UK und UNI HD synthetisiert und spektroskopisch untersucht. Über einen weiten Konzentrationsbereich wurden neben der Speziation der Komplexe mittels Laserspektroskopie auch thermodynamische und kinetische Daten gewonnen. Von beiden Liganden wurden sowohl die <sup>243</sup>Am(III), als auch die <sup>242</sup>Pu(III)-Komplexe hergestellt und NMR-spektroskopisch charakterisiert. Eine Publikation der Ergebnisse wird angestrebt.

Das Spiegelsystem für die INE-Beamline, um den höheren harmonischen Strahl vom Primärstrahl zu entfernen, ist im Berichtszeitraum nicht bestellt worden. Es fehlt noch die zweite Hälfte der notwendigen Investitionsmittel. Die Bemühungen seitens KIT-INE um eine Drittmittelfinanzierung sind bisher nicht erfolgreich gewesen. Zurzeit wird eine andere (kostengünstigere) Lösung angestrebt.

*Arbeitspaket C:* –

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

*Arbeitspaket A:*

Die Arbeiten zur Etablierung einer Syntheseroute zur Darstellung vollständig <sup>15</sup>N-isotopenmarkierter BTP-Liganden wird fortgesetzt (Doktorarbeit C. Adam).

*Arbeitspaket B:*

NMR-spektroskopische Untersuchungen sind insbesondere für einen <sup>242</sup>Pu(III)-Komplex mit nPr-BTP geplant. Zudem soll in enger Zusammenarbeit mit Theoretikern am KIT-INE, der Uni Helsinki, FIN, und UC London, UK, die Basis für eine quantenchemische Erklärung der beobachteten <sup>15</sup>N-Verschiebungen auf den koordinierenden Stickstoff in <sup>243</sup>Am(nPr-BTP)<sub>3</sub>-Komplexen erarbeitet werden.

In Zusammenarbeit mit Uni Strasbourg, F (Isabel Billard) sollen erste Arbeiten zur Komplexierung von <sup>99</sup>Tc mit ionischen Flüssigkeiten vorgenommen werden. Es wurden bereits Modellsysteme synthetisiert, die als Datenbasis für den bisher nur selten untersuchten <sup>99</sup>Tc-Kern als NMR-Sonde dienen sollen. Erste Versuche sollen gegen Ende des kommenden Berichtszeitraums durchgeführt werden.

Zusammen mit Nachwuchswissenschaftlern der Uni Dresden sollen Versuche zur Komplexierung von <sup>243</sup>Am mit Partitioning-relevanten Ligandsystemen durchgeführt werden. Ein geplanter Aufenthalt einer Doktorandin soll die zwei BMBF geförderten Projekte zur f-Element-Komplexierung vernetzen und dient direkt dem Kompetenzerhalt im Nuklearbereich in Deutschland. Die Versuche sind für Mitte März projektiert.

*Arbeitspaket C:* –

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

C. Adam, P. Kaden, B.B. Beele, U. Müllich, S. Trumm, A. Geist, P.J. Panak, M.A. Denecke, Evidence for covalence in a N-donor complex of Americium(III), *Angew. Chemie* (submitted).

Adam C., Kaden P., Geist A., Panak P.J., Denecke M.A., NMR-investigations on paramagnetic and anionic effects in nPrBTP complexes of trivalent Lanthanides and Americium, *Euromar 2012*, Dublin, Irland, 01.-06.07.2012.

Kaden P., Adam C., Geist A., Panak P.J., Denecke M.A., Evaluation of different strategies to discriminate covalent and dipolar metal-ligand interactions in trivalent Lanthanide and Actinide BTP-complexes by NMR investigations, *Euromar 2012*, Dublin, Irland, 01.-06.07.2012.

Ada C., Kaden P., Geist A., Denecke M.A., Panak P.J., Evaluation of different strategies to discriminate covalent and dipolar metal-ligand interactions in trivalent Lanthanide and Actinide BTP-complexes by NMR investigations, *ATALANTE 2012*, Montpellier, Frankreich, 02.-07.09.2012.

Kaden P., Adam C., Beele B.B., Müllich U., Geist A., Panak P.J., Denecke M.A., NMR-investigations on paramagnetic effects in (nPrBTP)<sub>3</sub>-complexes of Lanthanides(III) and Americium(III), *ATALANTE 2012*, Montpellier, Frankreich, 02.-07.09.2012 (Vortrag).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 020B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 838.422,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Roesky	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des beantragten Projekts „Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen (f-Kom)“ ist es, ein fundamentales Verständnis hinsichtlich der Abtrennung von langlebigen Radionukliden aus nuklearem Abfall zu erlangen. Das beantragte Projekt beinhaltet eine starke Komponente der Aus- und Weiterbildung junger Wissenschaftler in Forschungsthemen zur nuklearen Entsorgung sowie ihre Vernetzung in der europäischen Forschungslandschaft.

Um zu einem grundlegenden Verständnis des Abtrennprozesses für Actiniden durch Flüssig-Flüssig-Extraktion auf molekularer Basis zu gelangen, werden systematische synthetische Ansätze verfolgt und innovative spektroskopische und röntgenographische Techniken eingesetzt, die die Charakterisierung der elektronischen und molekularen Strukturen der extrahierten Komplexe ermöglichen und damit Information über die Metall-Ligand-Bindungsverhältnisse liefern. Zusätzlich werden thermodynamische und kinetische Daten bestimmt. Vergleichende Studien der Actiniden- und Lanthaniden-Komplexe ermöglichen es, die Triebkräfte der Selektivität effizienter komplexbildender Liganden zu verstehen. Diese Information kann gezielt angewendet werden, um verbesserte Extraktionsmittel zu entwickeln.

Die im Berichtszeitraum erzielten Ergebnisse wurden in direkter Kooperation mit der Uni HD (P. Panak) und dem KIT-INE (H. Geckeis, M. Denecke, A. Geist) erhalten; siehe die entsprechenden Halbjahresberichte.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Der Meilensteine der Arbeitskreise Roesky und Breher (KIT-CS) wurden wie folgt definiert:

- Synthese von N-Donor-Liganden
- Beschaffung und Installation des Diffraktometers (Messplatz) und der Microfocus-Röntgenquelle

Die Untersuchungen erfolgten in den Bereichen:

- WP1: „Synthese und Screening-Tests“
- WP2: „Synthese und spektroskopische Untersuchungen“
- WP4: „Nachwuchsförderung“

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Beim Verbundpartner KIT-INE wurden zur Abtrennung langlebiger Radionuklide alkylierte 2,6-Di(1,2,4-triazin-3-yl)pyridine (BTP) entwickelt. Diese sind leistungsfähige Stickstoff-Donor-Extraktionsliganden mit hoher Selektivität. Im Bereich der N-Donorliganden wurde das im Ligandensystem 6-Tetrazol-5-yl-2,2'-bipyridin (HN4bpy) (**1**) synthetisiert und erfolgreich in der f-Elementchemie eingesetzt. Ziel des Vorhabens ist es, den leistungsfähigen Stickstoff-Donor-Extraktionsliganden BTP systematisch zu variieren. Hierzu wurde einer der sechsgliedrigen Ringe des BTP-Liganden durch einen stickstoffreichen fünfgliedrigen Ring formal ersetzt. Der Ligand **1** konnte erfolgreich an das Metall Samarium koordiniert werden. Die Umsetzung erfolgte durch Reaktion von **1** mit Samariumnitrat. Dabei konnten Komplexe der Zusammensetzung  $[\text{Sm}(\text{N4bipy})_2(\text{HCOO})(\text{H}_2\text{O})_2]$  isoliert werden. Diese Verbindungen wurden vollständig charakterisiert und die Struktur im Festkörper mit Hilfe der Einkristallröntgenstrukturanalyse aufgeklärt (WP2). In direkter Kooperation mit Uni HD (P. Panak) wurde die Eignung von **1** in der Extraktion von Lanthanoiden im Vergleich zu dreiwertigen Actiniden mittels TRLFS untersucht (WP3). Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend. Weitere Untersuchungen werden folgen.

Im zweiten Unterbereich des WP1 sollen die Vorteile der N-Donorliganden mit denen der Organodithiophosphorsäure kombiniert werden. Dazu wurde die Synthese von 1,1-Bis([2,2'-bipyridin]-6-yl)-N,N-diethylphosphanamin begonnen. Hier konnte allerdings bisher nur eine von vier Stufen erfolgreich synthetisiert werden.

Ein weiteres Ziel besteht darin, das im Vorgängerprojekt untersuchte Ligandensystem  $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{Py}\}_3]$  (**2**) zur Verbesserung der Extraktionseigenschaften systematisch zu variieren. Eine Variationsmöglichkeit besteht in der Substitution der Pyridineinheiten durch stickstoffreiche fünf- und sechsgliedrige Ringe (z. B. Triazol), deren nicht koordinierende N-Donoratome für eine Protonierung im aciden Extraktionsmedium zugänglich sind. Hierzu wurden zunächst die benötigten Vorläufer 2-Pyrazin- und 1H-1,2,4-Triazol-3-aldehyd dargestellt. Die Umsetzung des Trihydrazids mit 4-Imidazolaldehyd führte zu der bereits aus der Literatur bekannten Verbindung  $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{Im}\}_3]$  (**3**). Chandrasekhar et al. beschrieben die erfolgreiche Synthese von 1:1-Übergangsmetallkomplexen mit **3**, konnten den Liganden an sich jedoch aufgrund schlechter Löslichkeiten nicht charakterisieren, was uns NMR-spektroskopisch gelang. Umsetzungen von **3** mit den Trifluormethansulfonatsalzen der Lanthanoide werden in Kürze folgen.

Der zu **2** analoge Ligand mit einer CH-Einheit im Brückenkopf, d. h.  $[\text{HC}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{Py}\}_3]$  (**4**), wurde erfolgreich in der Koordinationschemie der Lanthanoide eingesetzt. Im Rahmen des WP2 wurde **4** mit den Salzen  $\text{Ln}(\text{OTf})_3$  (mit  $\text{Ln} = \text{Pr}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}$  und  $\text{Ho}$ ) umgesetzt. Die bisher erhaltenen Komplexe wurden eingehend durch spektroskopische Methoden untersucht und charakterisiert. Durch Röntgenstrukturanalyse an Einkristallen konnte die strukturelle Integrität der 1:1-Komplexe im Festkörper nachgewiesen werden. Ein Vergleich der bisher erhaltenen Festkörperstrukturen der Verbindungen des Typs  $[\text{Ln}(\mathbf{4})(\text{OTf})_3]$  ( $\text{Ln} = \text{Y}, \text{Eu}$ ) mit den analogen Komplexverbindungen von **2** zeigt, dass die isostrukturellen Verbindungen nahezu keinen Unterschied in den Ln-N Bindungslängen aufweisen. Lediglich die Winkel, die die apikale Einheit einschließen, sind bei den Komplexen von **4** kleiner als bei denen von **2**.

Zur Untersuchung von Extraktionsliganden, die neben den N-Donor- auch S-Donorstellen aufweisen, wurde eine Kombination aus einem bereits bekannten N-Donorliganden und einer Thio- bzw. Dithiophosphorsäure angestrebt. Das angestrebte Hybridligandensystem basiert auf Tris(pyrazolyl)methan- (Tpm) und Phosphan-Einheiten ( $\text{PSR}_2$ ), d. h.  $\text{Tpm}^{(\text{PSR}_2)}$ . Ausgehend von Tris(pyrazolyl)methanid und Dialkylchlorophosphanen ( $\text{PR}_2\text{Cl}$  mit  $\text{R} = n\text{-Bu}, i\text{-Pr}$ ) konnte bereits die Zwischenstufe  $\text{Tpm}^{(\text{PR}_2)}$  synthetisiert und charakterisiert werden. Die Festkörperstruktur von  $\text{Tpm}^{(\text{Pr-Pr}_2)}$  (**5**) wurde mittels Einkristallröntgenstrukturanalyse bestimmt. Der neue Ligand  $\text{Tpm}^{(\text{Pr-Bu}_2)}$  (**6**) konnte in ersten Versuchen mit  $\text{YCl}_3$  und  $\text{Sm}(\text{OTf})_3$  umgesetzt werden. Der zweifelsfreie Nachweis der stöchiometrischen Zusammensetzungen sowie der Molekülstrukturen steht allerdings noch aus.

Im Bereich der Nachwuchsförderung (WP4) reiste Frau Girnt und Frau Hohnstein zum ATAS-Workshop nach Dresden und präsentierte dort jeweils ein Poster. Herr Kratsch nahm an der ICOMC 2012: XXV International Conference on Organometallic Chemistry; Lissabon, 2012 teil und präsentierte ebenfalls ein Poster.

Die Beschaffung und Installation des Diffraktometers (Messplatz) und der Microfocus-Röntgenquelle wurden wie geplant im ersten Halbjahr des Projekts abgeschlossen. Erste Untersuchungen wurden bereits erfolgreich mit diesen Geräten durchgeführt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die neu synthetisierten Liganden sollen auf ihre Eignung als selektives Extraktionsmittel zur Abtrennung dreiwertiger Actinidionen getestet werden. Dazu ist evtl. eine entsprechende Modifizierung zur Erhöhung der Lipophilie erforderlich. Basierend auf den erzielten Ergebnissen sollen neue Liganden entwickelt werden.

Die dargestellten stickstoffreichen Aldehyde sollen zu Derivaten von **2** umgesetzt und deren Lanthanoidkomplexverbindungen untersucht werden. Des Weiteren sollen Koordinationseigenschaften der neuen Hybridliganden des Typs  $\text{Tpm}^{(\text{PR}_2)}$  und  $\text{Tpm}^{(\text{PSR}_2)}$  untersucht werden. Dabei steht die Charakterisierung der Komplexe insbesondere per Einkristallröntgenstrukturanalyse im Vordergrund.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

P. W. Roesky: *Main Group Molecules in 4f Metal Chemistry, Abstract of Papers, XXV<sup>th</sup> International Conference on Organometallic Chemistry, Lisbon, 2012, OC24.4.*

Jochen Kratsch, Paul Benndorf, Jelena Wiecko, Larissa Hartenstein, Peter W. Roesky: *Chiral Amidinate Complexes of the Rare-Earth Metals as Catalysts for the Enantioselective Hydroamination. Abstract of Papers, XXV<sup>th</sup> International Conference on Organometallic Chemistry, Lisbon, 2012, PB141.*

A. Bremer, C. M. Ruff, D. Girnt, U. Müllich, J. Rothe, P. W. Roesky, P. J. Panak, A. Karpov, T. J. J. Müller, M. A. Denecke, A. Geist: *2,6-Bis-(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)-pyridine as Ligand for the Efficient Actinide(III) / Lanthanide(III) Separation. International Workshop on Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy (ATAS), Dresden, 2012.*

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 020C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 442.080,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Meyer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des beantragten Projekts „Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen (f-Kom)“ ist es, ein fundamentales Verständnis hinsichtlich der Abtrennung von langlebigen Radionukliden aus nuklearem Abfall zu erlangen. Das beantragte Projekt beinhaltet eine starke Komponente der Aus- und Weiterbildung junger Wissenschaftler in Forschungsthemen zur nuklearen Entsorgung sowie ihre Vernetzung in der europäischen Forschungslandschaft. Neben der Synthese neuer Liganden und Selektivitäts-„Screening-Tests“, Charakterisierung von Ln/An-Ligandkomplexen sowie Extraktionsversuche unter prozessrelevanten Bedingungen von N-Donorliganden sollen vier weitere Aspekte realisiert werden: Intensivierung der Zusammenarbeit mit europäischen Forschungsinstitutionen, Weiterverarbeitung der abgetrennten Actinoidenprodukte zu geeigneten Vorstufen für deren Immobilisierung, Erweiterung der Forschungsaktivitäten bzgl. zusätzlicher Ligandentypen als Extraktionsmittel und die Anwendung modernster spektroskopischer Methoden zur Charakterisierung der Actinoiden- und Lanthanoidenkomplexe hinsichtlich ihrer Koordinationsstruktur und elektronischer Struktur.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Aktivitäten zur Synthese neuer N- und S-Donor-Extraktionsmittel und deren Charakterisierung mit „state-of-the-art“ experimentellen Methoden (z. B. NMR, XRD, HRXES, TRLFS) sowie mit theoretischen Ansätze teilen sich in vier Arbeitspakete AP) auf:

- AP1: Synthese und Charakterisierung neuer Extraktionsliganden für die Actinoiden/Lanthanoidentrennung – „Synthese und Screening-Tests“
- AP2: Aufklärung der Selektivität ausgewählter Extraktionsmittel zwischen dreiwertigen Actinoid- und Lanthanoidionen durch Synthese und Charakterisierung von Metallkomplexen mit den neuen Liganden und ausgedehnte spektroskopische Untersuchungen in Lösung – „Synthese und Spektroskopische Untersuchungen“
- AP3: Studien in Hinblick auf eine Einbindung in Konditionierungsprozesse – „Prozessstudien“
- AP4: Besondere Förderung talentierter Nachwuchswissenschaftler – „Nachwuchsförderung“

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des BMBF-Projektes wurden bisher in der AG Meyer vornehmlich alkyl-substituierte N,O-Liganden mit verschiedenen Ankersystemen synthetisiert, deren sterische Abschirmung, elektronische Struktur und Löslichkeitsverhalten durch unterschiedliche *ortho*- und *para*-Substituenten determiniert wurde. Des Weiteren konnte die Synthese von N,N-Liganden realisiert werden. Im Anschluss daran wurden diese N,O- und N,N-Liganden zu Komplexierungsversuchen niedervalenter Uranspezies herangezogen.

Ausgehend von dem N-geankerten N,O-Liganden ist ein carbonatverbrückter Uran(IV)-Komplex  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-CO}_3)]$  durch CO<sub>2</sub>-Insertion an einem dinuklearen  $\mu$ -oxoverbrückten U<sup>IV</sup>-Komplex  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-O})]$  zugänglich. Analoge chalcogenidverbrückte Komplexe  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-E})]$  (E = S, Se) konnten erhalten werden, wenn z. B. S<sub>8</sub> oder elementares Selen als Chalcogenidquellen verwendet wurden. Diese Komplexe  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-E})]$  mit E = O, S, Se wurde nun mit CO<sub>2</sub>, CS<sub>2</sub> und COS umgesetzt und so gelang es Serie von gemischten Uran (IV)-Carbonatkomplexen U–CO<sub>2</sub>E–U, U–CS<sub>2</sub>E–U sowie U–OC(S)Se–U zu isolieren und charakterisieren. Zusammen mit den auch zugänglichen Carbonat- und Trithiocarbonatkomplexen  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-CO}_3)]$  und  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-CS}_3)]$  stand nun eine ganze Reihe an chalcogenocarbonatverbrückten Uran(IV)-Komplexen zur Verfügung, an denen strukturelle und spektroskopische Vergleichsstudien durchgeführt werden konnte. Es wurde des Weiteren gefunden, dass weder der freie Carbonatligand durch Hydrolyse freigesetzt, noch der U<sup>III</sup>-Komplex  $[\{((^{\text{Ad,Me}}\text{ArO})_3\text{N})\text{U}\}]$  unter Einsatz starker Reduktionsmittel zurück gewonnen werden konnten (*J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 16877–16881). Im Gegensatz dazu gelang dies, wenn *ortho*-neopentyl-substituierte, tacn-basierte N,O-Ligand in dem Komplex  $[\{((^{\text{Neop,Me}}\text{ArO})_3\text{tacn})\text{U}\}]$  eingesetzt wurde. Dieser Komplex reagiert mit zwei Molekülen CO<sub>2</sub> unter Abspaltung von CO zu dem verbrückten Carbonatkomplex  $[\{((^{\text{Neop,Me}}\text{ArO})_3\text{tacn})\text{U}\}_2(\mu\text{-CO}_3)]$ . Durch starke Reduktionsmittel konnte der Uran(III)-Ausgangskomplex sowie K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> NMR-spektroskopisch nachgewiesen werden (*Chem. Commun.* **2012**, *48*, 8634–8636).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Fortführung beinhaltet Synthese/Charakterisierung/Weiterentwicklung (neuartiger) Ligandensysteme sowie deren Weiterleitung an die Kooperationspartner zur näheren Charakterisierung/Evaluierung. Des Weiteren konzentrieren sich Forschungsarbeiten auf die Synthese und Charakterisierung von U<sup>III-VI</sup>-Komplexen ausgehend von tacn- oder N-basierter N,O-, N,N- bzw. N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>- sowie pyridin-substituierter Liganden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Der Vortrag mit dem Titel „From Nuclear Fuels to CO<sub>2</sub> Activation at Uranium Complexes – Chemistry Between Phobia & Enthusiasm“ wurde von Prof. Karsten Meyer zu GDCh-, Plenar- und Festvorträgen, in Anorganisch-Chemischen-Kolloquien, während einer Gastprofessur sowie einer „Summer School“ gegeben:

- Area D Summer School, Juli 2012
- Gastprofessur, Toulouse, F, September 2012
- Anorganisch-Chemisches-Kolloquium, Grenoble, F, September 2012
- Festvortrag 70. Geburtstag Prof. Wieghardt, Mühlheim a. d. Ruhr, D, Oktober 2012
- Anorganisch-Chemisches-Kolloquium, Kopenhagen, Dk, Oktober 2012
- Plenarvortrag, Symposium der Danish Chemical Society, Kopenhagen, Dk, Oktober 2012
- GDCh-Vortrag, WWU Münster, Münster, D, Dezember 2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2, 69117 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 020D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 353.376,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Panak	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen dieses Verbundprojekts werden grundlegende Untersuchungen zur selektiven Komplexierung von Lanthaniden/Actiniden durchgeführt, mit dem Ziel ein fundamentales Verständnis hinsichtlich der Abtrennung von langlebigen Radionukliden aus nuklearen Abfällen zu erlangen. Die Aufklärung von Komplexierungs- und Extraktionsmechanismen auf molekularer Basis soll dabei wichtige Erkenntnisse bezüglich der Selektivität verschiedener Ligandensysteme liefern, welche die Basis für ein zukünftiges Ligandendesign als auch die Optimierung von Trennprozessen darstellen.

Diese Ergebnisse liefern somit einen wichtigen Beitrag für eine sichere Endlagerung nuklearer Abfälle. Aufgrund des fundamentalen Charakters dieser Untersuchungen werden darüber hinaus grundlegende Erkenntnisse bezüglich des Komplexierungsverhaltens der trivalenten Actiniden und Lanthaniden erhalten, die auch in anderen wissenschaftlichen Bereichen von großer Bedeutung sein können.

Die in diesem Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten der Universität Heidelberg erfolgten in direkter Kooperation mit dem KIT-INE, dem KIT-AC, dem Forschungszentrum Jülich und der Universität Erlangen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

WP1: Synthese und Charakterisierung neuer Extraktionsliganden für die Actiniden / Lanthanidentrennung – „*Synthese und Screening-Tests*“

WP2: Aufklärung der Selektivität ausgewählter Extraktionsmittel zwischen dreiwertigen Actinid- und Lanthanidionen durch Synthese und Charakterisierung von Metallkomplexen mit den neuen Liganden und ausgedehnte spektroskopische Untersuchungen in Lösung – „*Synthese und Spektroskopische Untersuchungen*“

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wissenschaftliche Ergebnisse zu den Arbeitszielen WP 1 und WP 2:

Als Weiterentwicklung zu dem in Flüssig-flüssig-Extraktionstests sehr erfolgreichen CyMe<sub>4</sub>-BTBP wurde mit 2,9-Bis(5,5,8,8-tetramethyl-5,6,7,8-tetrahydrobenzo[e][1,2,4]triazin-3-yl)-1,10-phenanthrolin (CyMe<sub>4</sub>-BTPhen) eine Variation dieses Moleküls hergestellt, in dem keine Rotation um die C-C-Bindungsachse zwischen den Bipyridinringen möglich ist. Die durch diese Präorganisation erhoffte Verbesserung der Komplexierungseigenschaften wurde mittels zeitaufgelöster Laserfluoreszenzspektroskopie (TRLFS) untersucht.

Die Komplexierungsuntersuchungen von Cm(III) mit CyMe<sub>4</sub>-BTPhen wurden in Methanol (3.3 mol % H<sub>2</sub>O/HClO<sub>4</sub>) durchgeführt. Für die Komplexierungsreaktion wurde eine langsame Kinetik beobachtet. Um eine mögliche Sorption von Cm(III) an die Glaswand der Küvette zu unterbinden, wurden die Experimente bei einer Säurestärke von [HClO<sub>4</sub>] = 10 mM durchgeführt. Hierbei wurden zwei Cm-Komplexspezies mit Emissionsmaxima bei 609.7 nm bzw. 618.6 nm gefunden. Anhand der Verschiebungen der Emissionsmaxima konnten die Emissionsbanden einem Cm(III)-CyMe<sub>4</sub>-BTPhen 1:1- und einem 1:2-Komplex zugeordnet werden. Der [Cm(CyMe<sub>4</sub>-BTPhen)<sub>2</sub>]<sup>3+</sup> Komplex wies einen sehr hohen FI Faktor von 86 auf, und folglich wurde die Fluoreszenzintensität zur Analyse der Spektren verwendet. Aus der Speziesverteilung konnte die konditionale Gleichgewichtskonstante zu  $\log \beta_2 [\text{Cm}(\text{CyMe}_4\text{-BTPhen})_2]^{3+} = 10.2$  bestimmt werden.

Die Komplexierung von Eu(III) mit CyMe<sub>4</sub>-BTPPhen zeigte ebenfalls eine langsame Komplexierungskinetik. Im Gegensatz zu den Untersuchungen mit Cm(III) wurde hierbei lediglich der Eu(III)-CyMe<sub>4</sub>-BTPPhen 1:2-Komplex gefunden. Die folgende konditionelle Stabilitätskonstante konnte für die Bildung des Eu(III)-CyMe<sub>4</sub>-BTPPhen 1:2-Komplexes bestimmt werden:  $\log \beta_2 [\text{Eu}(\text{CyMe}_4\text{-BTPPhen})_2]^{3+} = 11.2$ . Die hier ermittelte Stabilitätskonstante ist im Vergleich zu der des Cm(III) zu hoch und steht im Widerspruch zu den Ergebnissen der Extraktionsuntersuchungen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass selbst bei  $[\text{HClO}_4] = 10 \text{ mM}$  noch Sorptionseffekte auftreten. Da die Cm(III) Konzentration bei den Titrationsexperimenten sehr gering ( $< 5 \cdot 10^{-8} \text{ M}$ ) und somit zwei Größenordnungen niedriger als bei den entsprechenden Eu(III)-Untersuchungen war, haben mögliche Nebenreaktionen wie z. B. Sorptionseffekte deutlich größere Auswirkungen auf die Speziation, was zu Fehlern in der Komplexierungskonstante führen kann.

Des Weiteren wurde die Komplexierung von Cm(III) mit dem im Arbeitskreis von Prof. Dr. P. Roesky (KIT-AC) entwickelten Ligand 6-(1H-tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridin (HN<sub>4</sub>bipy) mittels TRLFS untersucht. Bei der Charakterisierung der Komplexierung von Cm(III) mit HN<sub>4</sub>bipy in Ethanol wurde die Solvensspezies ( $\lambda_{\text{max}} = 600.9 \text{ nm}$ ) sowie ab einer Ligandenkonzentration von  $21.3 \mu\text{mol L}^{-1}$  eine Komplexspezies mit einem Emissionsmaximum bei  $608.7 \text{ nm}$  nachgewiesen. Durch Steigungsanalyse konnte die Emissionsbande einem Cm-Ligand 1:3 Komplex zugeordnet werden. Aus der Speziesverteilung wurde die konditionale Gleichgewichtskonstante bestimmt:  $\log \beta_3 = 13.7$ . In Anwesenheit des lipophilen Anions 2-Bromdecansäure ( $0.1 \text{ M}$ ) wurde ebenfalls die Emissionsbande der Solvensspezies ( $\lambda_{\text{max}} = 600.9 \text{ nm}$ ) und ab einer Ligandenkonzentration von  $46.7 \mu\text{mol L}^{-1}$  die Emissionsbande einer Komplexspezies gefunden ( $\lambda_{\text{max}} = 608.9 \text{ nm}$ ). Diese Emissionsbande konnte ebenfalls durch Steigungsanalyse einem Cm-Ligand 1:3-Komplex zugeordnet werden. Der  $\log \beta_3$  Wert wurde zu  $[\text{Cm}(\text{HN}_4\text{bipy})_3] = 12.9$  bestimmt. Dieser Wert ist somit um 0.8 Größenordnungen niedriger als in reinem Ethanol, was eine schwache Konkurrenzreaktion mit dem lipophilen Anion bestätigt.

Flüssig-flüssig Extraktionsexperimente aus salpetersaurer Lösung wurden mit HN<sub>4</sub>bipy in Kerosin vorgenommen. Sowohl in den reinen organischen Lösungsmitteln als auch durch das Hinzufügen einer lipophilen Anionenquelle (2-Bromdecansäure) konnte keine Extraktion von Eu(III) oder Am(III) in die organische Phase beobachtet werden. Als Ursache für das schlechte Extraktionsverhalten von HN<sub>4</sub>bipy wird die schlechte Löslichkeit des gebildeten Komplexes in dem verwendeten Lösungsmittel angesehen. Eine Publikation der Ergebnisse in Kooperation mit KIT-AC ist in Vorbereitung.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Da bei den Titrationsexperimenten von Cm(III) mit CyMe<sub>4</sub>-BTPPhen auch bei  $[\text{HClO}_4] = 10 \text{ mM}$  noch Sorptionseffekte auftraten, soll die Untersuchung der Komplexierung von Cm(III) bei einer weiter erhöhten Säurekonzentration von  $[\text{HClO}_4] = 88 \text{ mM}$  vorgenommen werden. Des Weiteren sollen die pK<sub>S</sub>-Werte des CyMe<sub>4</sub>-BTPPhen Liganden durch UV/Vis Spektroskopie bestimmt und die log K Werte entsprechend korrigiert werden.

Ein elementarer Teil der TRLFS-Studien ist der Vergleich der Komplexierungseigenschaften verschiedener Extraktionsmittel. Da aus Gründen der Löslichkeit nicht alle Liganden im gleichen Lösungsmittel untersucht werden können, ist es wichtig, den Einfluss verschiedener Faktoren wie beispielsweise den Wassergehalt oder die Wahl des Alkohols in den üblicherweise verwendeten Alkohol-Wasser-Lösungsmittelgemischen zu kennen. Erste Studien mit <sup>147</sup>Pr-BTP haben gezeigt, dass die Wahl des Lösungsmittelgemisches die Stabilitätskonstanten eines Komplexes um mehrere Größenordnungen verändern kann. Diese Untersuchungen werden fortgesetzt um genaue Kenntnisse über den Einfluss des Lösungsmittels zu erhalten.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Publikationen:

B. B. Beele, U. Müllich, F. Schwörer, A. Geist, P. J. Panak, Systematic Modifications of BTP-type Ligands and Effects on the Separation of Trivalent Lanthanides and Actinides, *Proc. Chem.* 2012, 7, 146 – 151

B. B. Beele, E. Rüdiger, F. Schwörer, U. Müllich, A. Geist, P. J. Panak, TRLFS Study on the Complexation of novel BTP Type Ligands with Cm(III), *Dalton Trans.* 2012, in preparatio.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) with 2,6-bis(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)pyridine and 2-bromohexanoic acid studied by Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy, *Radiochim. Acta*, accepted

C. Adam, P. Kaden, B. B. Beele, U. Müllich, S. Trumm, A. Geist, P. J. Panak, M. A. Denecke, Evidence of covalence in N-donor complex of Americium(III), *Angew. Chem., Int. Ed.*, submitted

A. Wilden, G. Modolo, S. Lange, F. Sadowski, B. B. Beele, A. Skerencak, P. J. Panak, M. Iqbal, W. Verboom, A. Geist, Evaluation of Modified Diglycolamides for the mutual separation of An(III) and Ln(III) by Solvent Extraction and Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy, *Solvent Extr. Ion Exch.*, in preparation

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 020E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2012 bis 30.06.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 529.746,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Modolo	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des beantragten Projekts „Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen (f-Kom)“ ist es, ein fundamentales Verständnis hinsichtlich der Abtrennung von langlebigen Radionukliden aus nuklearem Abfall zu erlangen. Das beantragte Projekt beinhaltet eine starke Komponente der Aus- und Weiterbildung junger Wissenschaftler in Forschungsthemen zur nuklearen Entsorgung sowie ihre Vernetzung in der europäischen Forschungslandschaft. Dies wird entscheidend zu einem sicheren Umgang mit radioaktiven Abfällen und zum Erhalt der hierzu notwendigen Kompetenz beitragen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die beteiligten Verbundpartner (die Universitäten Heidelberg (Uni HD) und Erlangen (Uni ER), das Karlsruher Institut für Technologie (KIT-INE, KIT-CS) sowie das Institut für Energie- und Klimaforschung am Forschungszentrum Jülich (FZJ-IEK-6)) ihre Expertise und Aktivitäten in Synthese, Spektroskopie, Technologie und Theorie bündeln, um zu einem tieferen Verständnis der auf Flüssig-Flüssig-Extraktion basierten Abtrennprozesse für Actiniden auf molekularer Größenskala zu gelangen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Synthese und Charakterisierung neuer Extraktionsliganden für die Actiniden/ Lanthanidentrennung – „Synthese und Screening-Tests“
- AP2: Aufklärung der Selektivität ausgewählter Extraktionsmittel zwischen dreiwertigen Actinid- und Lanthanidionen durch Synthese und Charakterisierung von Metallkomplexen mit den neuen Liganden und ausgedehnte spektroskopische Untersuchungen in Lösung – „Synthese und Spektroskopische Untersuchungen“
- AP3: Studien in Hinblick auf eine Einbindung in Konditionierungsprozesse „Prozessstudien“
- AP4: Besondere Förderung talentierter Nachwuchswissenschaftler – „Nachwuchsförderung“

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Es wurden methyl-substituierte Diglycolamidliganden zur Extraktion von dreiwertigen Lanthaniden und Actiniden aus Spaltproduktlösungen untersucht. Dabei wurde gefunden, dass die Verteilungsverhältnisse vom Substitutionsgrad des Liganden abhängen. Der Extraktionsmechanismus wurde mit Hilfe von Steigungsanalysen durch Extraktion und, in Kooperation mit der Arbeitsgruppe Panak (Uni HD), mittels zeitaufgelöster Laserfluoreszenzspektroskopie (TRLFS) sowie durch die Bestimmung der konditionalen Komplexbildungskonstanten, aufgeklärt.

In Zusammenarbeit mit Isabelle Billard am CNRS Straßburg wurden weitere Versuche zur Bestimmung des Extraktionsmechanismus bei der Extraktion von Am(III) und Eu(III) in ionischer Flüssigkeit durchgeführt. Dabei zeigte sich eine langsame Extraktionskinetik.

Zur weiteren Aufklärung des Extraktionsmechanismus mit Dithiophosphinsäuren in FS-13 wurde ein weiterer Forschungsaufenthalt in Karlsruhe realisiert. Dabei wurde vor allem die Komplexierung von Eu(III) untersucht. Dabei konnten deutliche Unterschiede der Komplexierung von Eu(III) im Vergleich zu Cm(III) beobachtet werden, die die hohe Selektivität des verwendeten Liganden erklären könnten.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Weitere ein- und zweiphasige TRLFS Untersuchungen zu den Dithiophosphinsäurekomplexen in FS-13 sind geplant, um die Untersuchungen zu vervollständigen und abzuschließen.

Die Arbeiten in Kooperation mit Isabelle Billard am CNRS Straßburg zur Aufklärung des Extraktionsmechanismus von Am(III) und Eu(III) in ionischen Flüssigkeiten werden fortgesetzt. Des Weiteren wird in Kooperation mit Michel Meyer am CNRS Dijon die Komplexierung von  $Zr^{4+}$  mit verschiedenen Polyaminocarbonsäuren untersucht.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

G. Modolo, A. Wilden, A. Geist, et al. *Radiochim. Acta*, 2012, Vol. 100, Issue 8-9, p. 715-725

K. Bell, A. Geist, F. McLachlan, et al. *Proc. Chem.*, 2012, Vol. 7, pp. 152-159

F. Lewis, L. Harwood, M. Hudson, et al. *Proc. Chem.*, 2012, Vol. 7, pp. 231-238

K. Bell, C. Carpentier, M. Carrott, et al. *Proc. Chem.*, 2012, Vol. 7, pp. 392-397

A. Wilden, G. Modolo, M. Sypula, et al. *Proc. Chem.*, 2012, Vol. 7, pp. 418-424

D. Magnusson, A. Geist, R. Malmbeck, et al. *Proc. Chem.*, 2012, Vol. 7, pp. 245-250

G. Modolo, A. Wilden, H. Daniels, et al. *Radiochim. Acta*, DOI: 10.1524/ract.2013.2016

D. Magnusson, A. Geist, A. Wilden, et al. *Solvent Extr. Ion Exch.*, 2013, Vol. 31, Issue 1, p. 1-11

M. Sypula, A. Wilden, C. Schreinemachers, et al. *Solvent Extr. Ion Exch.*, 2012, Vol. 30, Issue 7, p. 748-764

A. Wilden, G. Modolo, M. Sypula, et al. ATALANTE 2012 – Nuclear Chemistry For Sustainable Fuel Cycles, 02-07 September 2012, Montpellier, France, Vortrag

D. Magnusson, A. Geist, A. Wilden, et al. ATALANTE 2012 – Nuclear Chemistry For Sustainable Fuel Cycles, 02-07 September 2012, Montpellier, France, Poster

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 919.706,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Neumeier	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des Projektes ist es, einen Beitrag zur Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle zu leisten. Die Forschungsaktivitäten der Forschungszentren Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung (FZJ-IEK6), Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE), dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Ressourcenökologie (HZDR-IRO) und der Universitäten Aachen, Institut für Kristallografie (RWTH-IFK), Institut für Gesteinshüttenkunde (RWTH-GHI), Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (LUH-IRS), Frankfurt, Institut für Geowissenschaften (GUF-IFG) und der Brenk Systemplanung GmbH (BS) sollen im Rahmen des Verbundprojektes „Conditioning“ gebündelt werden, um ein Verständnis des Langzeitverhaltens von Radionukliden in keramischen Endlagerungsmatrizes unter endlagerrelevanten Bedingungen abzuleiten. Dies soll durch die Entwicklung thermodynamischer Modelle auf der Basis von experimentellen Daten und atomistischen Modellrechnungen erreicht werden. Eine Quantifizierung der chemischen Prozesse und insbesondere die Extrapolation auf endlagerrelevante Zeiträume und Szenarien sind nur mit Hilfe belastbarer thermodynamischer Modelle möglich.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Synthese der Immobilisierungsmatrizes
- AP2: Strukturelle Charakterisierung
- AP3: Strahlenschäden
- AP4: Thermodynamik und physikalische Eigenschaften
- AP5: Korrosionsbeständigkeit unter Endlagerbedingungen
- AP6: Abschlussbericht, Publikationen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Synthesen einer  $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{PO}_4$  Mischkristallreihe ( $x = 0; 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 0,8; 0,9; 1$ ) über die Hydrothermalsynthese haben begonnen. Die Synthesen der Pyrochlore werden zurzeit vorbereitet. Die Materialien für Messungen am RWTH-GHI wurden festgelegt. Zunächst werden ca. 100g  $\text{LaPO}_4$  benötigt, die am FZJ-IEK6 synthetisiert werden sollen
- AP2: Erste XRD-Messungen an Phosphatpulvern wurden durchgeführt. Die ersten Pellets für Raman-Messungen wurden gepresst. Entsprechend des Meilensteins „Speziationsinstrumentierung“ wurde das Röntgeneinkristalldiffraktometer beschafft
- AP3: noch nicht begonnen
- AP4: Parameteroptimierung der Pelletherstellung wurde begonnen. Erste mechanische Eigenschaften (Vicker's Härte, Bruchzähigkeit) der Phosphate wurden bestimmt
- AP5: Durchflussversuche zur Bestimmung der Auflösungsraten bis 90 °C befinden sich im Aufbau
- AP6: -

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Synthesen der Phosphate werden fortgesetzt und die einer Zirkonat/Hafnat-Mischkristallreihe begonnen. Eventuell werden Syntheserouten optimiert. Die ersten Materialien für RWTH-GHI werden geliefert. Die Materialien für KIT/INE und GUF-IFG werden festgelegt und begonnen
- AP2: Die Mischkristallreihen werden mit XRD, REM/EDX und Raman charakterisiert  
Das Röntgeneinkristalldiffraktometer wird in Betrieb genommen
- AP3: Bestrahlungsversuche werden vorbereitet
- AP4: Die Bestimmung der thermischen und mechanischen Eigenschaften der Matrizes wird fortgesetzt
- AP5: Statische und dynamische Auflösungsexperimente werden an den Mischkristallreihen (zunächst) an den Phosphaten durchgeführt
- AP6: Ein Abstract (Vortrag) bei der E-MRS, Strassbourg im Mai 2013 wird im Januar eingereicht

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 394.874,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Scheinost	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im vorliegenden Verbundprojekt wird ein auf atomarer Skala basierendes Prozessverständnis der strukturellen Stabilität strahlenresistenter Keramiken (Phosphate mit Monazitstruktur und Zirconate mit Pyrochlorstruktur) erlangt, um so Retentionsmechanismen auf langen Zeitskalen zu verstehen und einen Beitrag zur sicheren Endlagerung hochradioaktiven Abfalls zu leisten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP2: Strukturelle Charakterisierung

An der IRE-eigenen ROBL-Beamline werden alle röntgenabsorptionsspektroskopischen Strukturuntersuchungen (XANES und EXAFS) durchgeführt. Der Vorteil dieser Methoden ist ihre Elementselektivität. Dadurch kann sowohl die Oxidationsstufe als auch die Nahordnung ausgewählter Elemente selektiv beprobt werden. XANES und EXAFS werden daher im Rahmen des Verbundprojektes eingesetzt, (1) den Einbau von Actiniden in Keramiken, (2) den Effekt von Strahlenschäden (AP3) auf die Struktur, (3) im Rahmen der Auflösungsexperimente (AP5) Leaching-, Resorptions- und Repräzipitationsprozesse zu untersuchen.

Das ROBL-Team wird dafür seine mehr als 10-jährige Expertise bei Probenvorbereitung, beim Probentransport einschließlich aller dafür notwendigen Genehmigungen und bei der Messung zur Verfügung stellen. Proben mit einer Aktivität bis zu 185 MBq können gemessen werden. Dies ist ausreichend selbst für reines  $^{241}\text{Am}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ , das verwendet wurde, um interne Strahlenschäden bis zu  $10^{19}$   $\alpha$ -decayevents/g bzw. 0.80 dpa zu untersuchen. Die EXAFS-Auswertung wird nicht nur mit Standardmethoden (FEFF / shellfitting) durchgeführt, sondern auch mit einer Reihe neuester Methoden (Monte-Carlo, Landweber iteration, ITFA).

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):  
Noch keine.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):  
Literaturstudium und je nach Bedarf der Verbundpartner erste XAS-Untersuchungen an Lanthanidensystemen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 322.755,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Stumpf	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des Projektes ist es, einen Beitrag zur Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle zu leisten. Es sollen neue Möglichkeiten aufgezeigt werden, die die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle verbessern und ein hohes Sicherheitsniveau auf diesem Gebiet gewährleisten können. Darüber hinaus wird ein Kompetenzverbund entstehen, der in der Lage sein wird, internationale Entwicklungen zu innovativen Entsorgungsstrategien mit dem Schwerpunkt auf „Conditioning“ beurteilen und bewerten zu können.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Innerhalb des Gesamtprojekts sind folgende Arbeitspakete vorgesehen:

AP1: Synthese der Immobilisierungsmatrices

AP2: Strukturelle Charakterisierung

AP3: Strahlenschäden

AP5: Korrosionsbeständigkeit unter Endlagerbedingungen

AP6: Abschlussbericht, Publikationen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Nach der Bewilligung des Antrags wurde nach geeigneten Wissenschaftlern Ausschau gehalten. Die in Frage kommende Dame wird im Februar promovieren und ab dem 1. Mai die Projektstelle antreten.

Durch dieses verspätete Eintrittsdatum verzögern sich die Arbeiten um 6 Monate. Bisher liegen noch keine wissenschaftlichen Ergebnisse vor.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Einarbeiten in die Literatur.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langle- biger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 336.612,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Telle	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt dient der Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Ziele sind dabei sowohl die Erweiterung des derzeitigen Wissenstandes als auch der Kompetenzerhalt sowie die Nachwuchsförderung. Durch das Bündeln und Vernetzen der Expertisen und Forschungsaktivitäten der Verbundpartner sollen neue Möglichkeiten zur Verbesserung der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle aufgezeigt werden. Die zu erwartenden wissenschaftlichen Ergebnisse werden den grundlegenden Kenntnisstand auf dem Gebiet „Immobilisierung von Actiniden in keramischen Materialien“ deutlich erweitern und zur Bewertung innovativer Entsorgungsstrategien mit dem Schwerpunkt auf „Conditioning“ beitragen.

Ziel der Arbeiten ist es, das Verhalten der Radionuklide während und nach der Immobilisierung in keramischen Materialien grundlegend und systematisch zu untersuchen. Das Teilprojekt des RWTH-GHI behandelt dabei die Thermodynamik und physikalischen Eigenschaften von nicht radioaktiven Surrogaten der Actiniden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Folgende Arbeitspakete werden von Seite des RWTH-GHI im Rahmen des Verbundprojektes durchgeführt:

AP4: Thermodynamik und physikalische Eigenschaften

- 4.1: Druckloser Sinterprozess
- 4.2: Sintern mit Dotierungsstoffen
- 4.3: Optimierte Temperatur-Zeit-Zyklen
- 4.4: Erstellung von Sinterkarten
- 4.5: Rate-controlled sintering
- 4.6: Gefügecharakterisierung
- 4.7: Aggregatsynthese
- 4.8: Mechanische Prüfung
- 4.9: Stäbe für Einkristallzucht

AP6: Abschlussbericht, Publikationen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- AP4.1: Druckloser Sinterprozess: Literaturrecherche, Materialbeschaffung zur Durchführung von Dilatometer- und Ofenversuchen an Presslingen zur Analyse der Verdichtungskinetik
- AP4.2: Sintern mit Dotierungsstoffen: Literaturrecherche zur Zugabe von Additiven zur Unterstützung und Förderung von Korngrenzen- und Volumendiffusion

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP4.1: Druckloser Sinterprozess: Abschließen der Versuche
- AP4.2: Sintern mit Dotierungsstoffen: Durchführung von Versuchen mit Zugabe von Additiven zur Unterstützung und Förderung von Korngrenzen- und Volumendiffusion
- AP4.3: Optimierte Temperatur-Zeit-Zyklen: Durchführung von Versuchen zur Vermeidung bzw. Umgehen des 1. Sinterstadiums mit Verdampfung und Kondensation bzw. Oberflächendiffusion mit dem Ziel einen optimalen Verdichtungsverlauf unter Vermeidung eingeschlossener Porosität zu erreichen
- AP4.4: Erstellung von Sinterkarten im Anschluss an Untersuchungen der Sinterkinetik mit und ohne Zugabe von Dotierungsstoffen, parallel zur Erstellung von optimierten Temperatur-Zeit-Zyklen als auch nach Versuchen zu ratenkontrolliertem Sintern und im Anschluss an die Gefügecharakterisierung
- AP4.5: Rate-controlled sintering: Durchführung von Versuchen, um eine gezielte Entgasung der Poren beim Übergang von offener zur geschlossenen Porosität durch ratenkontrolliertes Sintern zu bewirken
- AP4.6: Gefügecharakterisierung: Charakterisierung aller Sinterproben hinsichtlich Korngröße, Restporosität, Inhomogenitäten
- AP4.7: Aggregatsynthese: Prüfung der Herstellung dicht gesinterter Aggregate aus den Pulvern
- AP4.8: Mechanische Prüfung: Ermittlung der bruchmechanischen Kennwerte der Proben für Aussagen über die mechanische Beständigkeit der Endlagermatrix
- AP4.9: Stäbe für Einkristallzucht: Herstellung von Keramikstäben für RWTH-IFK
- AP6: Abschlussbericht, Publikationen: Auswertung, Bewertung, Dokumentation

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langle- biger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 223.380,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Roth	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Projektes ist die Weiterentwicklung des Kenntnisstandes auf dem Gebiet der Entsorgung radioaktiver Abfälle. So sollen neue Möglichkeiten für die Verbesserung der sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle aufgezeigt werden.

Durch Kooperation der Forschungszentren Jülich, Karlsruhe und Dresden sowie der Arbeitsgruppen der Universitäten Aachen, Hannover und Frankfurt sollen neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der Immobilisierung von Actiniden in keramischen Materialien gewonnen werden. Hierzu zählen Untersuchungen an synthetischen Phosphaten mit Monazitstruktur und Zirkonaten mit Pyrochlorstruktur hinsichtlich der Mechanismen der reversiblen Phasentransformation kristallin ↔ amorph sowie der chemischen und thermodynamischen Stabilität der Phasen.

Am Institut für Kristallographie der RWTH Aachen sollen im Rahmen des Projektes vordergründig Einkristalle der Lanthanoidmonazite hergestellt und untersucht werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Synthese der Immobilisierungsmatrices
- AP2: Strukturelle Charakterisierung
- AP3: Strahlenschäden
- AP4: Thermodynamik und physikalische Eigenschaften
- AP5: Korrosionsbeständigkeit unter Endlagerbedingungen
- AP6: Abschlussbericht, Publikationen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die wissenschaftliche Mitarbeiterstelle konnte erst zum 1.1.2013 besetzt werden.

Im Zuge des AP1 und AP2 wurden Pulverproben der Monazitzusammensetzung  $\text{SmPO}_4$  erfolgreich synthetisiert, wobei bis zu 20 % des Sm durch  $\text{Ca}^{\text{II}}$  und  $\text{Ce}^{\text{IV}}$  substituiert wurde. Sowohl  $\text{SmPO}_4$  als auch  $\text{Sm}_{0,8}\text{Ca}_{0,1}\text{Ce}_{0,1}\text{PO}_4$  zeigen in Versuchen unter Hochtemperaturbedingungen ein lineares thermisches Ausdehnungsverhalten (AP4).

Gekoppelte Substitutionen von Sm und P durch  $\text{Ce}^{\text{IV}}$  und Si ließen sich nur zum Teil realisieren, wobei die Substitution deutlich geringer ausfällt als berechnet. Dadurch weicht die Stöchiometrie der Endzusammensetzung deutlich von der idealen ab. Auch Ansätze bei höheren Synthesetemperaturen liefern dasselbe Ergebnis. Weiterhin treten verschiedene Fremdphasen auf, von denen eine bisher nicht identifiziert werden konnte.

In einem weiteren Ansatz wurden die reinen Endglieder  $\text{LaPO}_4$ ,  $\text{PrPO}_4$ ,  $\text{NdPO}_4$  und  $\text{EuPO}_4$  in Pulverform synthetisiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im weiteren Verlauf sollen Mischkristallreihen zwischen jeweils zwei Endgliedern ( $\text{LaPO}_4$ ,  $\text{PrPO}_4$ ,  $\text{NdPO}_4$  und  $\text{EuPO}_4$ ) zunächst in Pulverform hergestellt und schließlich zur Einkristallzucht mittels Flux genutzt werden. Sowohl die Pulver als auch die Einkristalle sollen anschließend temperaturabhängig untersucht werden. Dafür sind sowohl Röntgenographische Strukturanalysen als auch Differenzkalorimetrische Messungen geplant. Weiterhin soll der Einbau kleinerer Lanthanoide (wie Tb) geprüft werden (AP4). Außerdem sollen die Proben mittels Neutronenbeschuss auf ihre Strahlenbeständigkeit untersucht werden (AP3).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 238.092,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Winkler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es, ein Verständnis des Langzeitverhaltens von Radionukliden in keramischen Endlagermatrices unter endlagerrelevanten Bedingungen abzuleiten. Im Frankfurter Teilprojekt sollen strukturelle und physikalische Charakterisierungen von Keramiken und Kristallen vorgenommen werden. Dazu sollen verschiedene experimentelle Techniken zum Einsatz kommen: (a) Bestimmung von elastischen Eigenschaften bei Temperaturen bis 1600 K durch resonante Ultraschallspektroskopie (RUS), (b) Messung thermodynamischer Größen durch Mikrokalorimetrie, (c) Bestimmung der thermischen Ausdehnung durch Dilatometrie im Temperaturbereich von 100 K bis 1700 K, (d) in situ RUS Messungen während der Bestrahlung mit relativistischen Schwerionen an der GSI (Darmstadt), (e) strukturelle Charakterisierungen mit Röntgen- und Neutronendiffraktionsmessungen an Grossforschungseinrichtungen (PETRA III, ESRF, APS, LANSCE). Die Experimente sollen durch atomistische Modellrechnungen auf DFT-Basis ergänzt werden, um ein besseres Verständnis der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zu erhalten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Themenbereich 2 (Strukturelle Charakterisierung) sollen durch Neutronen- und Synchrotrondiffraktionsexperimente sowie Messung von Paarverteilungsfunktionen bei schlechtkristallinen Verbindungen durchgeführt werden. Diese Experimente werden durch theoretische Modellrechnungen (DFT) sowie Messungen von elastischen Eigenschaften und der thermischen Ausdehnung ergänzt.

Im Themenbereich 3 (Strahlenschäden) sollen die Änderungen der elastischen Eigenschaften der untersuchten Proben durch Strahlenschäden untersucht werden. Dazu werden Ultraschallmessungen (RUS) während der Bestrahlung mit Schwerionen durchgeführt. Thermodynamische Eigenschaften der bestrahlten und ausgeheilten Proben werden durch Messungen mit einem Mikrokalorimeter bestimmt.

Im Themenbereich 4 (Thermodynamik und physikalische Eigenschaften) ist die Bestimmung thermodynamischer Größen durch Mikrokalorimetrie geplant.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Nach Projektbeginn zum 1.10.2012 wurde ein Verfahren zur Besetzung der Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters erfolgreich durchgeführt. Ein Satz Keramik-Proben ( $\text{La}_{0.5}\text{Eu}_{0.5}\text{PO}_4$ ,  $\text{La}_{0.65}\text{Eu}_{0.35}\text{PO}_4$ ,  $\text{La}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Zr}_2\text{Nd}_2\text{O}_7$ ) wurden durch den Projektpartner im Forschungszentrum Jülich bereitgestellt. Diese wurden nachbearbeitet und mit Ultraschallmessungen charakterisiert. Es ist nun sichergestellt, dass die elastischen Parameter bestimmt werden können. Weiterhin wurden DFT basierte Rechnungen an Monaziten begonnen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Weiterarbeiten werden wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Ab dem 01.02.2013 wird Frau Dr. Anja Thust als Mitarbeiterin im Projekt mitarbeiten. Die geplanten Messungen am Los Alamos Neutron Scattering Centre werden voraussichtlich nicht durchgeführt werden können, da das Diffraktometer seit der Freisetzung von Technetium im September 2012 nicht mehr genutzt wird.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 021G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2012 bis 30.09.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 231.108,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Walther	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Als Matrizen für Endlagerung radioaktiver Abfälle kommen zurzeit hauptsächlich Borosilikatgläser zum Einsatz. Seit Jahrzehnten werden allerdings Alternativen diskutiert, zum Beispiel keramische Materialien, die aufgrund ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften als erfolversprechend gelten. Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden sowohl Keramiken (hauptsächlich für kationische Radionuklide) als auch Alternativen für Anionenrückhaltung genauer untersucht werden. Das IRS wird in Zusammenarbeit mit dem IEK6 Apatit und Hydrotalcit auf ihre Eignung zum Einbau von Iod, Cs und Tc aus separierten Abfallströmen untersuchen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Synthese der Immobilisierungsmatrizes
- AP2: Strukturelle Charakterisierung
- AP3: Strahlenschäden
- AP4: Thermodynamik und physikalische Eigenschaften
- AP5: Korrosionsbeständigkeit unter Endlagerbedingungen
- AP6: Abschlussbericht, Publikationen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Noch keine Ergebnisse. Beantragter Förderbeginn LUH erst 1.1.2013.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Ab 1.1.2013 wird eine Literaturstudie über bisherigen Kenntnisstand des Einbaus von Iod in endlagerrelevante Matrices erstellt. Darauf aufbauend wird das zu untersuchende System genau spezifiziert und ein Arbeitsplan für die Synthese der Materialien, den Einbau des Iod und des Cs und weitergehende Versuche wie die Auslaugung aufgestellt. Innerhalb der ersten Jahreshälfte soll ein Austausch mit dem FZJ erfolgen um die gewählte Matrix zu charakterisieren.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 033</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 30.06.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 135.008,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Nolte	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

- Aufbau eines Standards für die Neutronenflussdichte zur Untersuchung der Nachweiswahrscheinlichkeit Spaltionskammern und anderen Neutronendetektoren sowie Unterstützung der von anderen Projektpartnern an der Beschleunigeranlage der PTB durchgeführten Detektoruntersuchungen.
- Untersuchung der Vergleichbarkeit verschiedener Methoden zur Messung von inelastischen Neutronenstreuquerschnitten mit dem Flugzeitspektrometer der PTB.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

#### TCAP Neutronenflussstandard

- Modellierung des Transport niederenergetischer Ionen in Ti(T)-Targets und Optimierung des TCAP-Experiments
- Beschaffung von Komponenten (Target, Detektoren), Aufbau des Experiments
- Inbetriebnahme, Vermessung der Ortsverteilung der assoziierten Neutronen und Vergleich mit der Modellierung, Vergleichsmessungen mit NE213-Referenzdetektoren
- Einsatz zur Überprüfung der Nachweiswahrscheinlichkeit der PTB Spaltionskammern und von Detektoren der anderen Projektpartnern
- Untersuchung von Detektoren in den vorhandenen Referenzneutronenfeldern der PTB, Zeitplanung abhängig von den Ergebnissen der Experimente am FZD

#### Methodische Untersuchungen zur inelastischen Neutronenstreuung

- Modellierung eines Experiments zum Nachweis der gestreuter Neutronen und der emittierten Sekundärphotonen
- Experimentelle Untersuchungen zum Aufbau des Experiments (Untergrundabschirmung,  $\gamma$ -Detektoren, Strahloptimierung)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

An der Konstruktion des TCAP Experiments wurden im Berichtszeitraum noch einige Verbesserungen vorgenommen. So wurde durch zusätzliche Bypassleitungen die Reduktion der Pumpleistung durch die engen Blenden vermindert. Außerdem wurde ein Verschluss entwickelt, mit dem sich die Alpha-Teilchen vor dem Siliziumdetektoren stoppen lassen, so dass der neutroneninduzierte Untergrund im Detektor für die Alpha-Teilchen separat untersucht werden kann. Dieser Verschluss wird magnetisch betätigt und erfordert keine problematischen Vakuumdurchführungen. Mit diesen Änderungen wurde die Konstruktion der TCAP-Streukammer für die  $T(d,n)\alpha$ -Reaktion Ende des Jahres 2012 abgeschlossen werden. Inzwischen hat die Fertigung in der Hauptwerkstatt begonnen. Sie soll im Juni dieses Jahres abgeschlossen sein. Das Ti(T)-Target auf einem Aluminiumbacking wurde von der Firma EADS-Sodern mit Sitz in Frankreich Ende Dezember 2012 geliefert.

Im Juli erfolgte ein erster Besuch von P. Sauvan von der Fernuniversität UNED in Madrid im Rahmen des ERINDA Short-Term-Visit-Programms. Dabei konnte bei den MCNPX-Simulationsrechnungen mit der neuen Version der Erweiterung MCUNED erstmals die neu eingebaute Funktion zur Simulation des Produktion und des Transports koinzidenter Teilchen angewendet werden. Eine neue Methode zur Varianzreduktion erlaubt zudem eine rechenzeiteffektivere Simulation. Bei der Erstellung weiterer Wirkungsquerschnittsbibliotheken zur Modellierung der Neutronenreferenzfelder mit dem Programmpaket NJOY aus ENDF-Datenbanken wurde ein Fehler bei der Berechnung des  $Q$ -Wertes festgestellt. Die Autoren des Programms wurden informiert. Der für Oktober vorgesehene zweite Besuch musste aus privaten Gründen des Gastes auf das erste Halbjahr 2013 verschoben werden.

Simulationsrechnungen der  $T(d,n)$ -Reaktion mit der neuen Version 2.7.0 von MCNPX und dem dazugehörigen Patch von MCUNED wurden mit dem TARGET-Code verglichen und zeigten zum Teil deutliche qualitative Abweichungen von der spektralen Verteilung deren Analyse noch im Gange ist.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Fertigung aller Einzelteile der Kammer in der Hauptwerkstatt und die Vorbereitung der externen Laserschweißarbeiten haben bereits begonnen. Der Zusammenbau der Streukammer mit dem Laserschweißverfahren wird zeitnah von der Firma Focus-Control in Braunschweig ausgeführt. Im Anschluss erfolgt die Fertigstellung sowie Tests auf Vakuumdichtigkeit und die geometrische Vermessung der Kammer wiederum in der Hauptwerkstatt der PTB. Spätestens im Juni soll die Fertigung abgeschlossen sein.

Parallel erfolgt die Herstellung und Kalibrierung einer  $^{241}\text{Am}$ - $\alpha$ -Quelle in der Arbeitsgruppe 6.11 (Aktivitätseinheit) des Fachbereichs 6.1 (Radioaktivität) zur Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit des Halbleiterdetektors. Ebenfalls im ersten Quartal 2013 soll die Charakterisierung der neuen Ti(T)-Targets an dem vorhandenen Messplatz durchgeführt werden.

Der zweite Besuch von P. Sauvan im Rahmen des ERINDA Short-Term-Visit-Programms ist im März oder April geplant. Es ist vorgesehen, die Korrektur der relativistischen Kinematik, die bereits im letzten Halbjahresbericht angekündigt wurde, fertig zu stellen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.



## **2.3 Strahlenforschung**

<b>Zuwendungsempfänger:</b> GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 001A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Dynamik der Reparaturfaktoren an lokalisierten Schäden		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2008 bis 30.09.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 972.056,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Taucher-Scholz	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Hauptziel des Vorhabens ist die Aufklärung zellulärer Reparaturwege im molekularen Detail, insbesondere bei der Prozessierung von DNA Schäden unterschiedlicher Qualität, um die zellulären Folgen von Strahlung in ihrer Grundlage zu verstehen. Verschiedene Schwerpunkte werden im Verbind mit den Arbeitsgruppen von Prof. M. Löbrich (TU Darmstadt) und Prof. G. Iliakis (Universität Essen) bearbeitet. Weiterhin besteht eine Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Herrn Prof. J. Dahm-Daphi (Universität Marburg). Wesentliches Ziel ist darüber hinaus, wissenschaftlichen Nachwuchs in der Strahlenforschung auszubilden und nachhaltig einzubinden und so zum Kompetenzerhalt beizutragen. Daher wird ein zuvor in diesem Projekt ausgebildete Doktorand als Postdoc in der Arbeitsgruppe verbleiben, um selbstständig neue Aspekte des Projektes zu bearbeiten. Die Vernetzung mit den anderen Verbundpartnern, die Veröffentlichung der erzielten Ergebnisse sowie regelmäßige Seminare über strahlenbiologische Themen dienen weiterhin diesem Ziel.

Schwerpunkt an der GSI ist die Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Wechselwirkung von Reparaturfaktoren an komplexen Schäden nach Teilchenstrahlung. Die Prozessierung dieser Schäden, speziell der DNA Schadensenden, und deren Auswirkung auf die Genauigkeit der Reparatur und die Zellantwort sollen erfasst werden. Ein exaktes Verständnis der Reparaturabläufe soll Vorhersagen bezüglich der zellulären Wirkung dicht ionisierender Strahlen möglich machen sowie Eingriffsmöglichkeiten zur Strahlenwirkung aufzeichnen. Die Abschätzung von Risiken dicht ionisierender Strahlung ist besonders für den Strahlenschutz im Zusammenhang mit dem Abbau und der Endlagerung von Kernreaktoren wichtig, aber auch in Bezug auf kosmische Strahlenbelastung. Aus biomedizinischer Sicht sollen die Erkenntnisse dazu beitragen, die Strahlentherapie in der Tumormedizin weiter zu entwickeln.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Erfassung zeitaufgelöster Proteindynamik an Ionenschäden: Optimierung und Erweiterung der Technologien zur Beobachtung von Reparaturabläufen in einzelnen (lebenden) Zellen nach Ionenbestrahlung. Untersuchung der Hierarchie der Reparaturabläufe direkt nach Bestrahlung sowie im Verlauf der Prozessierung.
- AP2: Rekrutierung und Interaktion von Komponenten verschiedener Reparaturwege an Ionenschäden, um den Ablauf der Reparatur an komplexen Schäden zu untersuchen. Untersucht werden soll der Einfluss von Chromatinstruktur und DNA Resektion auf die Zellantwort nach lokalisierter Schadensinduktion. In Hinblick auf Spätfolgen ist es wichtig zu klären, ob diese Schäden generell der Prozessierung durch einen mit Fehler behafteten Reparaturweg unterliegen. Außerdem sollen die zellulären Folgen der neu beobachteten, kernweiten H2AX Phosphorylierung untersucht werden, insbesondere mögliche Interaktionen mit Signalkaskaden, welche die Zellreaktion bei einer nachfolgenden Bestrahlung beeinflussen könnten.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: „Zeitaufgelöste Proteindynamik“:

Lebendzell-FRAP Messungen zur Mobilität des Reparaturproteins NBS1 nach Inhibition der Phosphorylierung des Bindungspartners MDC1 in Zellen, die mit Kohlenstoff oder Uran bzw Gold Ionen bestrahlt wurden, zeigten eine LET-abhängige Bindungsmodalität und bestätigten ein entworfenes mechanistisches Modell, welches mit minimaler Anzahl an Parametern die gesamten Daten über den kompletten LET Bereich beschreibt. Die Ergebnisse werden in PLOS ONE veröffentlicht.

AP2: „Reparaturwege und DNA Prozessierung“:

Ein möglicher Zusammenhang der kernweiten  $\gamma$ H2AX Reaktion mit der DNA Doppelstrangbruch (DSB) Reparatur wurde untersucht, indem die Rückbildung der Signale im Kern und am Schaden in Wildtyp und NHEJ Reparatur-defizienten Zellen gemessen wurde. Es zeigte sich, dass kernweites  $\gamma$ H2AX in allen untersuchten Zelllinien sowie nach Bestrahlung mit Ionen verschiedener Ionisationsdichte transient ist, und auch ähnlich schnell abfällt innerhalb der ersten 6 Stunden nach Strahlexposition. Dies deutet darauf hin, dass die Dephosphorylierung des  $\gamma$ H2AX Kernsignals nicht der Regulation an den Schadenstellen entspricht.

Des Weiteren wurde die Rolle der in G1 beobachteten DSB-Resektion bei der Reparatur Ionen-induzierter Schäden mit Hilfe von DSB-Reparatur Kinetiken und Überlebenskurven nach Herunterregulierung einzelner Nukleasen untersucht. Die Nuklease CtIP, deren Beteiligung an der DSB-Resektion in G1 wir bereits gezeigt haben, ist sowohl für DSB-Reparatur in G1 als auch für das Zellüberleben nach Ionenbestrahlung wichtig.

Die Messung vergleichbarer Anzahl RPA Foci in H2AX defizienten und Wildtyp-Zellen ergab, dass entgegen der Situation bei der Immun-bedingten DSB Verknüpfung, die Resektion an Ionenschäden nicht durch  $\gamma$ H2AX reguliert wird. Ebenso wurde untersucht, ob die Ausschaltung Resektions-unabhängiger DSB-Reparaturwege dazu führt, dass verstärkt Resektions-abhängige Reparatur in G1 Zellen stattfindet. LIG IV-Mutanten, bei denen der DNA-PK abhängige NHEJ Reparaturweg ausgeschaltet ist und PARP-inhibierte Zellen, bei denen der alternative PARP-abhängige NHEJ Reparaturweg inhibiert ist, zeigen beide keine Zunahme in der Resektion von DSBs, weder in S/G2 noch in G1. Diese Beobachtung spricht dafür, dass die beobachtete DSB-Resektion in G1 unabhängig von der Wahl des DSB-Reparaturwegs ist. Die verschlechterte DSB-Reparatur in CtIP-defizienten Zellen (siehe oben) spricht ebenfalls dafür, dass die Entscheidung für einen Reparaturweg unabhängig von DSB-Resektion ist.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: „Reparaturwege und DNA Prozessierung“:

In Experimenten mit Inhibitoren gegen verschiedene Kinasen soll herausgefunden werden, welche Kinase für die Aktivierung von CtIP in der G1-Phase verantwortlich ist. Des Weiteren soll die Wirkung der Herunterregulierung der Nuklease Mre11 alleine bzw. zusammen mit CtIP auf die Reparatur von Ionen-induzierten DSB in G1 untersucht werden. Eine mögliche kernweite Lokalisation der aktivierten Kinasen ATM und DNA-PK sowie deren Bindung an das Chromatin sollen in Abhängigkeit der Ionendosis und Zeit mit verschiedener Extraktionsmethoden untersucht werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Beiträge zu Tagungen:

B. Meyer et al.: Effects of the heavy ion-induced pan-nuclear H2AX phosphorylation. 15. GBS Jahrestagung, 17.-20.09.2012, München (Poster)

N. Averbek et al.: DNA end resection is required for the repair of complex lesions in human G1 cells, 15. GBS Jahrestagung, 17.-20.09.2012, München (Poster)

N. Averbek et al.: DNA end resection in the repair of complex lesions in G1 cells, 39. Jahrestagung “European Radiation Research Society”, 15. – 19.10.2012, Vietri sul Mare, Italien (Poster Preis)

Manuskripte:

F. Tobias et al.: Spatiotemporal dynamics of early repair proteins on complex DNA lesions, PLOS ONE (in Revision);

B. Meyer et al.: Clustered DNA damage induces pan-nuclear H2AX phosphorylation mediated by ATM and DNA-PK (eingereicht)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Duisburg-Essen - Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 001B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Untersuchungen über Backup Mechanismen des DSB Reparatur		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2008 bis 30.09.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 625.483,80 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Iliakis	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Institut für Med. Strahlenbiologie des Universitätsklinikum Essen bearbeitet Fragestellungen auf dem Gebiet der DNA Doppelstrangbruch (DSB) Reparatur. Unter der Vielzahl von Läsionen, die durch ionisierende Strahlung hervorgerufen werden, gilt der DSB – falls nicht oder falsch repariert, als die Ursache von Zelltod, Transformation oder Mutation. In Zellen höherer Eukaryonten können DSBs entweder durch DNA-PK abhängige nicht homologe Endverknüpfung (D-NHEJ) oder durch homologe Rekombinationsreparatur (HRR) aus dem Genom entfernt werden. Unsere Vorarbeiten haben aber gezeigt, dass ein weiterer Reparaturweg aktiv ist der als Backup von D-NHEJ fungiert und deshalb B-NHEJ genannt wird. Untersuchungen auf diesem Gebiet, die hauptsächlich auf biochemischer Ebene durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass DNA Ligase III (LigIII) und PARP-1 in B-NHEJ beteiligt sein könnten. Ziel dieses Vorhabens ist, genetische Beweise über die Funktion von DNA Ligase III in B-NHEJ zu liefern. Zu diesem Zweck sollen Knock-out Mutanten im DT40 Zellsystem produziert und deren DSB Reparaturfähigkeit getestet werden. Die Erzeugung dieser Mutanten wird in Zusammenarbeit mit Dr. Hiroshi Arakawa, der unter der Leitung von Prof. Dr. Horst Zitzelsberger im Institut für Molekulare Strahlenbiologie, Helmholtz Zentrum München tätig ist, durchgeführt werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Um die oben genannten Arbeiten auf die nächste Stufe voranzutreiben haben wir beschlossen, Ligase III knock-outs in DT40 Zellen zu produzieren. Da es sich schnell gezeigt hat, dass DNA Ligase III essentiell für die Zelle ist, wurde der Weg des konditionellen Knockouts mit folgenden Aufgaben eingeschlagen:

- 2.1: DT40 Mutanten und Wild-typ Zellen sollen zuerst auf ihre Wachstumseigenschaften und Überlebensfähigkeit geprüft werden. Dabei soll auch das konditionelle knock-out von DNA Ligase III untersucht werden, um ein Fenster zu definieren, in dem weitere Versuche bezüglich DSB Reparatur durchgeführt werden können. Experimente werden mit „Real-Time“ PCR, Western-Blotting (falls möglich), wie auch mit Hilfe funktioneller Methoden, die die Aktivität von DNA Ligase III quantitativ erfassen, durchgeführt.
- 2.2: Zellkulturen, die mit Hilfe der oben angegebenen Experimente definiert wurden, sollen eingesetzt werden, um das DSB Reparaturvermögen der verschiedenen Mutanten quantitativ zu erfassen. Dabei soll Pulsed-Field Gel-Elektrophorese, und falls notwendig, auch  $\gamma$ -H2AX Foci-Bildung eingesetzt werden. Das Reparaturvermögen soll in exponentiell wachsenden Kulturen, wie auch in Zellpopulationen in verschiedenen Phasen des Zellzyklus gemessen werden. Für die Gewinnung synchroner Zellpopulationen soll Zentrifugal-Elutriation eingesetzt werden.
- 2.3: Der Einfluss von hoch LET Strahlung besonders von Neutronen, die am Universitätsklinikum Essen vorhanden sind, und Schwerionen an der GSI, soll auf B-NHEJ getestet werden.
- 2.4: Das DT40 Zellsystem ist sehr Apoptose anfällig. Es soll deshalb untersucht werden, in wie weit diese Eigenschaft die DNA DSB Reparaturmessungen beeinflusst. Dabei wird eine Serie von Apoptose Inhibitoren getestet werden, und ihr Einfluss auf die Messungen der DSB Reparatur evaluiert.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zu 2.1: Die neu hergestellten Mutanten, *LIG3<sup>-2loxP</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* wurden mit Tamoxifen behandelt, um den kompletten Ligase III Knockout einzuleiten und Mutanten zu erhalten, die auf *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>* Hintergrund nur noch ihre endogene Ligase I und die exogene humane mitochondriale Ligase I besitzen. Mittels Realtime PCR und Western Blot wurde der vollständige knockout von Ligase III bestätigt. Die erhaltenen *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutanten wurden auf ihre Wachstumseigenschaften und Überlebensfähigkeit geprüft. Es zeigte sich, dass sowohl die *LIG3<sup>-2loxP</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutanten, als auch die *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutanten eine Wachstumsgeschwindigkeit wie DT40 Wildtyp Zellen aufweisen.

Es wurden außerdem Mutanten hergestellt die keine endogene Ligase I und keine Ligase III im Kern haben, dafür aber mit der humanen Version von Ligase III überleben können. Außerdem war das Einbringen einer Verkürzungsmutante (Ligase 3 ohne Zink-Fingerdomäne) erfolgreich. Bei dieser Mutante gab es jedoch kein Überleben nach Knock out der endogenen Ligase I. Daraus lässt sich schließen, dass für die Übernahme der Replikation im Kern, Ligase III die Zink-Finger-Domäne benötigt.

Die Etablierung der Messung des S-Phase Checkpoints in DT40 Zellen war erfolgreich. Jedoch stellte sich heraus, dass die Zellen keinen nachweisbaren S-Phase Checkpoint ausbilden, jedoch einen sehr starken Phänotyp beim G2-Checkpoint zeigen. Allerdings scheint dieser, abhängig von der Mutante, auch bei niedrigen Dosen nur selten reversibel zu sein.

Zu 2.2: In DSB-Reparatur Experimenten mittels PFGE zeigten die neuen *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutanten ein Reparaturvermögen wie ihre „Mutterzellen“ *LIG3<sup>-2loxP</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* und *LIG3<sup>2loxP/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>* bzw. wie *LIG4<sup>-/-</sup>* und *LIG1<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>* Mutanten. Da die neuen *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutanten nur den endogenen und exogene mitochondriale humane Ligase I besitzen, kann das Reparaturvermögen eindeutig Ligase I im B-NHEJ zugeordnet werden.

Zu 2.3: Es wurden erste Reparaturkinetiken nach UVC Bestrahlung mittels Immunofluoreszenzfärbung und dem neuen Antikörper, der zum Nachweis der entstandenen Pyrimidindimere (CPD) dient, durchgeführt. In allen bisher untersuchten Mutanten wurde ein ungewöhnliches Maximum an CPDs Schäden 3 Stunden nach Bestrahlung beobachtet. Weiterhin zeigten *LIG4<sup>-/-</sup>* Zellen keinen Unterschied in ihrem Reparaturvermögen im Vergleich zum Wildtyp. Dahingegen zeigen *LIG1<sup>-/-</sup>* bzw. *LIG1<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>* Zellen ein langsamere Reparatur von CPDs.

Zu 2.4: In Experimenten, deren Ergebnisse früher berichtet wurden, konnte ein Apoptoseinhibitor, der strahleninduzierte Apoptose bei DT40 Zellen hemmt, identifiziert werden. Dieser Inhibitor wird weiterhin routinemäßig in fast allen Experimenten nach Bestrahlung eingesetzt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Zu 2.1. Es soll weiterhin eine Mutante hergestellt werden die keine endogene Ligase I und keine Ligase III im Kern hat, dafür aber die humane Version von Ligase III exprimiert. Diese Mutante kann Aufschluss darüber geben, ob für die Replikation mit Hilfe von Ligase III sowohl BRCT als auch Zink-Finger Domäne essentiell sind. Der G2 Checkpoint der DT40-Mutanten soll bei verschiedenen Dosen untersucht werden. Außerdem sollen Inhibitoren von ATR und ATM eingesetzt werden um herauszufinden ob es sich um ein Artefakt handelt, oder wirklich um einen Checkpoint.

Zu 2.2. Die neu hergestellten Mutanten sollen weiter auf ihr Reparaturvermögen von DSBs mittels Zellüberleben untersucht werden.

Zu 2.3. Die Experimente zur Beteiligung von Ligase III in der Nukleotidexzisionsreparatur sollen weitergeführt werden. Der ungewöhnliche Anstieg an detektiertem Schaden soll kritisch untersucht werden, ob es sich um eine Spezies- oder Methoden-spezifische Beobachtung handelt. Zusätzlich zu dem bisher eingesetzten Anti-CPD Antikörper, soll ein zweiter Anti-6-4 Photoprodukte Antikörper in Immunofluoreszenzfärbung eingesetzt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Paul K, Wang M, Wu W, Mladenov E, Bencsik-Theilen A, Bednar T, Arakawa H, Iliakis G.: DNA Ligase I and III cooperate in alternative non-homologous end-joining in vertebrates (Manuscript ready for submission)

Singh SK, Bednar T, Zhang L, Wu W, Mladenov E, Iliakis G.: Inhibition of B-NHEJ in Plateau-Phase Cells Is Not a Direct Consequence of Suppressed Growth Factor Signaling. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2012, 84: e237-e243.

Manova VI, Singh SK, Iliakis G.: Processing of DNA double strand breaks by alternative non-homologous end-joining in hyperacetylated chromatin. *Genome Integrity* 2012, 3:4 doi: 10.1186/2041-9414-3-4

Singh SK, Wu W, Stuschke M, Bockisch A, Iliakis G.: Reduced Contribution of Thermally-Labile Sugar Lesions to DNA Double-Strand Break Formation after Exposure to Neutrons. *Radiat Res* 2012, 178: 581-590.

Magin S, Saha J, Wang M, Mladenova V, Coym N, Iliakis G.: Lipofection and nucleofection of substrate plasmid can generate widely different readings of DNA end-joining efficiency in different cell lines. *DNA Repair* 2013, 12: 148-160

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 001C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Mechanismen an komplexen Läsionen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2008 bis 30.09.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 760.452,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Löbrich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Hauptziel des Vorhabens ist die Aufklärung primärer Strahleneffekte sowie der Reparatur von DNA-Schäden unterschiedlicher Qualität auf molekularer Ebene, um ein besseres Verständnis für die grundlegenden Folgen von Strahlung für die Zelle zu erlangen. In Zusammenarbeit mit Dr. G. Taucher-Scholz (GSI Darmstadt), Prof. Dr. G. Iliakis (Universität Essen), Dr. J. Dahm-Daphi (Universität Hamburg) und Dr. H. Zitzelsberger (HMGU München) werden verschiedene Schwerpunkte bearbeitet.

Der Forschungsschwerpunkt der TUD liegt in der Aufklärung der Mechanismen zur Behebung komplexer strahleninduzierter DNA-Doppelstrangbrüche (DSBs) mit molekular- und zellbiologischen Techniken unter besonderer Berücksichtigung der Rolle von ATM. Dabei sollen vor allem Faktoren untersucht werden, die eine Rolle bei der Signaltransduktion nach DSB-Induktion spielen, deren Rolle bei der Reparatur aber ungeklärt ist. Ein besseres Verständnis für die Vorgänge in der Zelle als Reaktion auf ionisierende Strahlung ist sowohl für den Strahlenschutz, den Umweltschutz und eine Abschätzung des industriell bedingten Strahlenrisikos der Bevölkerung, als auch für eine Vorhersage möglicher Spätfolgen nach einer Therapie unerlässlich. Dazu bedarf es eines mechanistischen Verständnisses über die Vorgänge in einer Zelle zur Behebung strahleninduzierter Schäden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die geplanten Experimente beinhalten mechanistische Studien zur Reparatur von DNA-Doppelstrangbrüchen (DSBs). Dabei soll zunächst das Modell validiert werden, dass die Nuklease Artemis für die Reparatur der DSBs benötigt wird, welche in Folge des Reparaturvorganges resektiert, d. h. am Bruchende zu einzelsträngigen DNA-Bereichen überführt werden. Da die Entscheidung, ob am Bruchende eine Resektion eingeleitet wird, u. a. von der Komplexität des Bruches abhängt, soll die Rolle von Artemis und die Abhängigkeit der Wahl des Reparaturweges von der Strahlenqualität genauer untersucht werden. Des Weiteren soll das Zusammenspiel von Artemis mit anderen bekanntermaßen an der Resektion beteiligten Nukleasen untersucht werden.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projekts soll auf der Untersuchung der Artemis-Abhängigkeit der DSB-Reparatur in unterschiedlichen Genombereichen liegen. Bisherige Ergebnisse zeigten, dass im Heterochromatin lokalisierte DSBs nach Resektion über den Weg der Homologen Rekombination repariert werden. Dabei wird durch die ATM-abhängige Phosphorylierung von KAP-1 das Heterochromatin relaxiert. Daher soll nun untersucht werden, inwieweit sich eine KAP-1-Depletion in unterschiedlichen Zellzyklusphasen auf die Artemis-Abhängigkeit der heterochromatischen Brüche auswirkt. Des Weiteren soll untersucht werden, inwiefern sich eine Modifikation der Bruchstruktur im Zuge der Reparatur und eine damit verbundene Modifikation des Checkpoint-Signallings auf die Zellzyklusregulation auswirkt.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bisherige Experimente nach dicht ionisierender Schwerionen-Bestrahlung zeigten, dass aufgrund der Komplexität der Brüche der Anteil resektierter und somit Artemis-abhängiger Brüche wesentlich höher ist als nach dünn ionisierender Strahlung. Dies führt dazu, dass nach Schwerionen-Bestrahlung Artemis-defiziente Zellen einen wesentlich größeren Reparaturdefekt aufweisen als nach Röntgenbestrahlung. Interessanterweise zeigten Zellen, in denen mittels siRNA die Nuklease CtIP herunterreguliert wurde nahezu keine Reparatur in der G1- und der G2-Phase, was die Vermutung bestätigt, dass nach Schwerionen-Bestrahlung nahezu alle Brüche resektiert werden (1). Da die Verfügbarkeit von Strahlzeit mit Kohlenstoffionen an der GSI begrenzt ist, sollten diese Experimente nun durch Reparaturmessungen nach Alpha-Teilchen ergänzt werden. Da Alpha-Teilchen nur eine sehr geringe Reichweite haben, müssen die Zellen für die Bestrahlung auf einer nur wenige  $\mu\text{m}$  dicken Mylar-Folie kultiviert werden. Im aktuellen Berichtszeitraum wurden daher für verschiedene Zelllinien die optimalen Kultivierungsbedingungen erfolgreich ausgetestet. Im Anschluss wurden erste Experimente an Zellen durchgeführt, in denen CtIP mittels siRNA herunterreguliert wurde. Andere Arbeiten unserer Arbeitsgruppe deuten darauf hin, dass CtIP in der G1-Phase u. a. von der Kinase Plk3 aktiviert wird. Daher wurden in diesen Experimenten nach Alpha-Bestrahlung zusätzlich zu der Herunterregulation von CtIP Plk1/3 chemisch inhibiert. Wie bereits in den vorherigen Experimenten nach Schwerionen-Bestrahlung zeigten auch in diesen Experimenten CtIP-depletierte Zellen einen ausgeprägten Reparaturdefekt in der G1-Phase. Interessanterweise führte die Inhibierung von Plk3 zu einem Reparaturdefekt, der vom Ausmaß her dem einer CtIP-Herunterregulation gleichkam. Die Inhibierung von Plk3 in einer CtIP-depletierten Zelllinie führte dagegen zu keiner weiteren Erhöhung des Reparaturdefekts. Zusammenfassend zeigen diese Experimente, dass CtIP in G1 auch nach Schwerionen-Bestrahlung von Plk3 aktiviert wird und dass diese Aktivierung für die Reparatur komplexer Brüche benötigt wird. Weitere Experimente im vorherigen Berichtszeitraum untersuchten den Einfluss der Modifikation der Bruchstruktur im Zuge der Reparatur in der G2-Phase auf das zur Aufrechterhaltung des G2/M-Checkpoints notwendige Signalling. Dabei konnte mittels Immunfluoreszenz-Mikroskopie anhand von Rad51-Foci gezeigt werden, dass zu späten Zeiten nach Bestrahlung die Mehrheit der bis dahin unrepariert verbliebenen Brüche resektiert ist und dass an diesen kaum noch die für das Signalling wichtige Kinase pATM nachzuweisen ist. Dieser Befund konnte in weiteren Experimenten mittels Immunfluoreszenz-Mikroskopie bestätigt werden und bekräftigt die Annahme, dass eine Modifikation des Bruches durch Resektion eine Ursache für die Abnahme des Checkpoint-Signallings darstellt, wodurch die Zelle mit unreparierten Brüchen in die Mitose eintritt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im weiteren Verlauf des Projekts sollen die Ergebnisse zum Reparaturverhalten CtIP- und Plk1/3-depletierten Zellen in weiteren Experimenten nach Alpha-Teilchen-Bestrahlung bestätigt und das Zusammenspiel mit den Nukleasen Exo1 und Artemis untersucht werden. Darüberhinaus soll in weiteren biochemischen Ansätzen der Einfluss der Reparatur und des Chromatinstatus auf das Checkpoint-Signalling untersucht werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 002F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt: Ausbreitungspfade von Radionukliden in Luft, Wasser, Boden; TP: Wechselwirkung von Uran(VI) mit Biofilmen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2008 bis 31.01.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 127.135,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Bernhard	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

„Strahlung und Umwelt: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen“ hat hohe gesellschaftspolitische Bedeutung. Es fügt sich nahtlos in die von BMBF und BMU angestrebten Ziele des Kompetenzverbunds Strahlenforschung ein.

Das vorgeschlagene Projekt soll durch den gezielten Einsatz junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Doktoranden einen Beitrag zum Kompetenzerhalt leisten und zu einem verbesserten Verständnis zu den Ausbreitungspfaden von Radionukliden in Luft, Wasser und Boden führen. Anwendungsorientierter Hintergrund des Projektes ist es, erweiterte Kenntnisse zur Mobilisierung und Immobilisierung des Urans auf molekularer Ebene zu erhalten, um die Sanierungsstrategien für die Altlasten des ehemaligen Uranerzbergbaus hinsichtlich der entsprechenden Langzeitsicherheitsanalysen zu verbessern und um bei kerntechnisch-störfallbedingtem Eintrag von Actiniden und langlebigen Radionukliden in die Umwelt die radiologischen Auswirkungen profunder abschätzen zu können. Das Institut für Radiochemie des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf bearbeitet das Teilprojekt Wechselwirkung von Uran(UVI) mit Biofilmen.

Kooperationspartner: 02NUK002A Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 02NUK002B Helmholtz Zentrum München, 02NUK002C Friedrich Schiller Universität Jena, 02NUK002D Leibniz Universität Hannover, 02NUK002E Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 02NUK002F Technische Universität Dresden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Anziehen von Biofilmen in entsprechenden Biofilmreaktoren
- Molekularbiologische Charakterisierung der angezogenen Biofilme.
- Charakterisierung der Biofilmstruktur mittels konfokaler Laser Mikroskopie.
- Einsatz von elektronenmikroskopischen Verfahren wie Raster Elektronen Mikroskopie (REM) und Transmissionselektronenmikroskop (TEM).
- Extraktion von EPS Komponenten aus natürlichen und im Labor angezogenen Biofilmen sowie die EPS Analyse.
- Bestimmung der Uranspeziation im „lebenden“ Biofilm mittels Kopplung der Konfokalen Laser Mikroskopie mit zeitaufgelöster Laser induzierter Fluoreszenz Spektroskopie.
- In-situ-Informationen zu den chemisch-physikalischen Parametern gelöste O<sub>2</sub> Konzentration, pH und Eh in den Biofilmen mittels elektro-chemischen Mikrosensoren und optochemischen Sensoren angestrebt.
- Die oben genannten Untersuchungen werden auf natürliche Biofilme, die von Uran kontaminierten Standorten stammen, erweitert.
- Dokumentation: Technische Berichte, Zwischenberichte, Abschlussberichte.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Es wurden weitere modifizierte Versuche zur Uranakkumulation an *Euglena mutabilis* Zellen durchgeführt. Um die Chancen der Lokalisation des Urans an oder in den Euglena Zellen zu steigern wurden Versuche mit höheren Urankonzentrationen (nicht mehr umweltrelevant) von  $5 \cdot 10^{-4}$  M U in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Lösung durchgeführt. Hierbei wurden sowohl lebende als auch tote Zellen auf ihre Uranakkumulation getestet. Es bestätigte sich, dass die toten Zellen sehr schnell einen Teil des Urans akkumulieren und auch über einen längeren Zeitraum fest halten. Die lebenden Zellen benötigten viel mehr Zeit um die gleiche Menge Uran wie die toten Zellen aufzunehmen. Über einen längeren Versuchszeitraum von etwa einem Monat zeigte sich aber dass die lebenden Zellen es schaffen in Summe etwa die dreifache Menge an Uran zu akkumulieren. Dies deutet auf einen aktiven (Abwehr-)mechanismus im Umgang mit Uran hin. Die Proben aus diesem Versuch wurden mittels der Konfokalen Laser Scanning Mikroskopie (CLSM) gekoppelt mit der Laser-induzierte Fluoreszenzspektroskopie (LIFS) untersucht. Dabei konnten trotz der enormen Störung des Fluoreszenzspektrums durch die Eigenfluoreszenz des Chlorophylls in den Zellen Uransignale im Inneren der ursprünglich lebenden Zellen detektiert werden. Bei der Vergleichenden Untersuchung der toten Zellen konnten keine Uransignale detektiert werden. Dies kann aber auch an der geringeren, an den toten Zellen gebundenen, Uranmenge liegen.

Des Weiteren wurden die Proben für die TEM/EDX-Messung fixiert, in Harz eingebettet und für die Messung in Dünnschnitte überführt. Die TEM/EDX-Analyse zeigt dabei, dass es in den ursprünglich lebenden Zellen Bereiche mit einer signifikanten Uranakkumulation gibt. Diese Bereiche sind vesikel- oder Vakuolen-artig im Aussehen und im Zellinneren lokalisiert. An der Zellpellikel konnten wiederum keine Uranakkumulationen detektiert werden. Bei den vergleichenden Untersuchungen an den toten Zellen konnten solche Urananreicherungen im Zellinneren nicht nachgewiesen werden. Auch an der Zellpellikel konnten keine Uransignale detektiert werden. Das lässt vermuten, dass das von den toten Zellen aufgenommene Uran mehr gleichmäßig an den Bindungsstellen an oder in den Zellen verteilt gebunden wurde, sodass keine lokal begrenzten Akkumulationen auftraten.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Auswertungen zu den TEM-Untersuchungen der Dünnschnitte werden abgeschlossen und Arbeiten an einer Publikation zum Thema Uranimmobilisierung durch *Euglena mutabilis* Zellen werden fortgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Brockmann S., Arnold T., Bernhard G. (2013): Removal of uranium from acidic aqueous solutions by *Euglena mutabilis*. Environmental Science and Pollution Research (under review).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 003A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2008 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 572.506,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Boukamp	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen der Hypothese, dass oxidativer Stress schädigend auf G-reiche DNA Sequenzen wirkt und damit speziell die Enden der Chromosomen, die Telomere, Zielsequenzen von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) sind, soll die Rolle von UVA und vergleichsweise UVB und IR Strahlung auf ihre schädigende Wirkung auf die Telomere - primäre Schadensinduktion und deren Konsequenz - von normalen Hautzellen (epidermale Keratinozyten und dermale Fibroblasten) untersucht werden. Ziel ist zu ermitteln, welchen Beitrag UVA Strahlung für die Hautkrebsentstehung und Hautalterung leistet.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Rahmen des Forschungsverbundes werden folgende Aspekte zur Telomerschädigung und genomischer Instabilität bei der UV-induzierten Hautcarcinogenese und der Alterungs-korrelierten Prozesse untersucht:

- 2.1: Welche Schäden werden durch UVA induziert?
- 2.2: Setzt UV-A spezifische Schäden am Telomer, d. h. kommt es zu Brüchen und sind Veränderungen und Telomer-spezifischen Proteinen involviert? Welche molekularen Signalwege sind involviert und welche Auswirkung hat dies auf die genetische Konstellation der Zellen?
- 2.3: Welche Rolle spielt die Gewebsorganisation bei der UVA-bedingten Schädigung? Analyse der Telomer-bedingten Schädigung im komplexen Gewebeverband in der organotypischen Kultur.
- 2.4: Welche Konsequenzen hat UVA Strahlung auf die Umgebung, die Dermis, und führt dies zu einer „verminderten“ Unterstützung der epidermalen Geweberegeneration?
- 2.5: Zusätzliche Bestrahlung der Zellen mit IR alleine und in Kombination mit USA und UVB.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1: Die Relevanz der Telomerschädigung für die Entstehung von Hautcarcinomen wurde weiter bestätigt. Wir können nun zeigen, dass:

UVC Strahlung (dies wurde benutzt, da es wie UVA ROS induziert, der Anteil der Aggregatbildung aber verstärkt ist, in Dosis-abhängiger Weise Telomeraggregate (TA) induziert und diese Induktion in 3 unabhängigen Experimenten (nach 8 – 10 Tagen gemessen) zur Neubildung chromosomaler Aberrationen führte. D. h. wie ursprünglich für die c-Myc Induktion gezeigt, kommt es durch die Deregulation der Telomerorganisation durch UV Strahlung zu genomischer Instabilität; Für die Induktion der TAs spielt ROS eine wesentliche Rolle. Einerseits wird durch  $H_2O_2$  die TA Bildung induziert. Andererseits kann durch die Gabe des Antioxidants Glutathion (GSH) das durch UV Strahlung induzierte ROS deutlich vermindert werden und es kommt nicht zur TA Bildung; Obwohl c-Myc Überexpression die TA Bildung induziert, spielt die nachweisliche Induktion von c-Myc während der UV-induzierten TA Induktion keine Rolle. Blockierung der Proteinsynthese durch Cycloheximid kann die UV-bedingte TA Induktion nicht verhindern. Dies hat weitgehende Implikationen, da es zeigt, dass für die TA Entstehung generell keine Protein Neusynthese erforderlich ist. Vielmehr scheint hierbei der Verlust von regulatorischen Proteinen von besonderer Bedeutung zu sein. Derzeit untersuchen wir die Rolle der Schelterproteine TRF2 und POT1 sowie des Kernmembran-modulierenden Proteins Nesprin1.

2.2: Weitere Analysen zur Rolle von PARP1 bei der UV-bedingten Telomerverkürzung wurden durchgeführt.

Derzeit ergibt sich folgender Stand:

PARP1 ist ein Enzym, das wesentlich am „Base excision repair“ (BER) beteiligt ist und in dieser Rolle wahrscheinlich auch an den Telomeren wirkt. Nach UV Behandlung kommt es zur ADP Ribosylierung. Diese Reaktion ist spezifisch, da sie durch einen PARP Inhibitor verhindert werden kann. Anders als erwartet, führt dies aber zur Reduktion von TRF2 am Telomer. Dieses unerwartete Ergebnis muss jetzt weiter analysiert werden.

2.3: Die OTK Versuche wurden weiter ausgewertet, um die Konsequenz von unterschiedlichen UVA Dosen zu ermitteln und mit dem Effekt von kombinierter Bestrahlung (UVA plus UVB) zu vergleichen. Hierbei wurden zur Analyse 3 Zeitpunkte gewählt 2 h (frühe Schadensinduktion), 3 und 9 Tage (phänotypische Ausprägung der Schädigung). Zusätzlich zu den morphologischen Veränderungen in der Epidermis und in der Dermis (siehe vorigen Zwischenbericht) können wir jetzt zeigen:

Dass es in der Basalschicht der Epidermis 3 Tage nach Bestrahlung mit 60J/cm<sup>2</sup> zu einer Telomerverkürzung kommt. Wie schon für die morphologischen Veränderungen gezeigt, war nach Kombinationsbestrahlung mit UVA+UVB dieser Effekt nicht nachweisbar. Anstatt einer Addition von Schädigung scheint es zu einer Aufhebung der UVA Effekte durch gleichzeitige UVB Strahlung zu kommen; Das Heat shock Protein Hsp72 wird in der Epidermis konstitutiv in schwachem Maße exprimiert. Drei Tage nach Bestrahlung mit 60J/cm<sup>2</sup> kam es in der Epidermis zu einer starken Induktion von Hsp72. Interessanterweise war auch in der internen Kontrolle (mit Alufolie abgeschirmter Bereich derselben Kultur) eine erhöhte Expression von Hsp72 nachweisbar – die Intensität war aber deutlich schwächer. Dies weist aber klar auf eine weitreichende Beeinflussung der Epidermis hin. In der Dermis war nach 3 Tagen eine eindeutige de novo Induktion von Hsp72 in nahezu allen Fibroblasten nachweisbar; Bemerkenswerterweise, wurde auch die Hsp72 Induktion durch die kombinierte Bestrahlung mit UVA plus UVB unterdrückt. D. h. der Unterschied zwischen UVA alleine und UVA plus UVB ist kein singuläres (zufälliges?) Ereignis, sondern ein offensichtlich spezifisches regulatorisches Phänomen; Caspase-3 ein Marker für apoptotische Zellen, wurde in keinem Fall in größerem Maße exprimiert, was impliziert, dass Apoptose Induktion nach UV Strahlung in unserem Modell keine große Rolle spielt.

2.5: Das in Kooperation mit AG Krutmann (Düsseldorf) durchgeführte Bestrahlungsexperiment - Bestrahlungsversuch von OTKs mit IRA (unterschiedliche Dosen) - wurde weiter ausgewertet. Anders als nach UV Strahlung traten erste morphologischer Veränderungen erst 14 Tage nach Bestrahlung auf. Die lebende Epidermis (suprabasalen Schichten) waren reduziert, die Hornschichten dagegen deutlich vermehrt; In der Dermis war nach 14 Tagen die Zahl der Fibroblasten reduziert und es waren Kavitäten entstanden; Telomerlängenmessungen ergaben anders als bei UV eine Telomerverlängerung 4 Tage nach IRA Bestrahlung mit der hohen Dosis. Dieser Effekt scheint Dosis-abhängig zu sein; Hsp72 wird offensichtlich nicht durch IRA induziert (Analyse 4 Tage nach Bestrahlung); Dagegen war die Zahl Caspase-3-positiver Zellen sowohl in der Epidermis als auch der Dermis erhöht. Hier konnten wir keine Dosisabhängigkeit erkennen. D. h. das Schadensprofil unterscheidet sich erheblich von dem der UV Strahlung.

2.4: Dieser Teilaspekt wird erst nach der Charakterisierung der UV Strahlung auf die Keratinozyten in OTKs verfolgt werden. Langzeitexperimente sind geplant.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

2.1: Wie oben ausgeführt, werden die Untersuchungen zum Mechanismus der TA Entstehung mit Hochdruck fortgeführt. Derzeit stehen speziell die Rolle von TRF2, POT1 und Nesprin1 im Vordergrund.

2.2: Ebenfalls sind Blockierungsexperimente geplant, um die Rolle von PARP1 bei der UVA-induzierten Telomerverkürzung weiter mechanistisch zu analysieren.

2.3: Weitere Analysen der Bestrahlungsexperimente (OTK Versuche):

Frühe und andauernde Schädigung in der Epidermis – Doppelstrangbrüche – dysfunktionelle Telomere) Proliferation, Differenzierung, Stress-Antwort (Heat shock Proteine), Apoptose (Caspase 3, Damage response (p53BP1 Damage Foci), Telomerase Expression – hTERT Färbung; Frühe und andauernde Schädigung im dermalen Äquivalent (Fibroblastenzahl, Apoptose, Kollagen-degradation (MMP1 Induktion, Gelatinase Assay), aberrante Genexpression; Experimente zur chronischen Bestrahlung und Auswertung.

2.5: Weitere Analyse des IRA Bestrahlungsexperiments und wie nun vereinbart (zeitlich möglich) Wiederholung des IRA Experiments unter kontrollierter „Wärmeentwicklung“ zur Klärung, ob es sich bei den ersten Veränderungen um einen „Wärmeartefakt“ oder aber IRA-spezifische Effekte handelt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Boehnke K, Falkowska-Hansen B, Stark HJ, Boukamp P. Stem cells of the human epidermis and their niche: composition and function in epidermal regeneration and carcinogenesis. *Carcinogenesis*. 2012 Jul;33(7):1247-58  
Leufke C, Stammer H, Leykauf J, Kronic D, Purdie K, Jauch A, Holtgreve-Grez H, Böhm-Steuer B, Bröcker EM, Mauch C, Utikal J, and Boukamp P. The telomere profile distinguishes two classes of genetically distinct cutaneous squamous cell carcinomas. *Oncogene in Revision*

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universitätsklinikum Ulm, Albert-Einstein-Allee 29, 89081 Ulm		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 003B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Alterungskorrelierte Prozesse der UVA-induzierten Hautkarzinogenese		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2008 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 471.694,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Scharffetter-Kochanek	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen der Hypothese, dass oxidativer Stress kausal an der UVA-induzierten Karzinogenese beteiligt ist, soll die Wirkung von kontinuierlichem intrinsischen oder extrinsischen oxidativem Stress auf zentrale zelluläre Schutz- und Reparatursysteme untersucht werden. Ziel ist, zu prüfen, ob oxidativer Stress zur gestörten zellulären Homöostase *in vitro* und zur gesteigerten Tumorsuszeptibilität *in vivo* führen kann.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Rahmen des Forschungsverbundes werden folgende Aspekte der Alterungs-korrelierten Prozesse der UVA-induzierten Hautkarzinogenese untersucht.

- AP1: Charakterisierung der Induktion und Reparatur UV-induzierter DNA-Läsionen in SOD2 defizienten Keratinozyten
- AP2: Untersuchungen zur Tumorigenese der epidermal SOD2 defizienten Maus nach chronischer UV-Bestrahlung
- AP3: Charakterisierung möglicher Tumor-fördernder Wechselwirkungen zwischen dermalen stromalen Fibroblasten und malignen Zellen der Epidermis (Keratinozyten und Melanomzellen)
- AP4: Untersuchungen zur Transformationswirkung sezernierter Mediatoren dermalen seneszenten Fibroblasten
- AP5: Wirkung der SOD2-Defizienz auf den Eintritt der UV-induzierten vorzeitigen Seneszenz dermalen Fibroblasten und Effekt auf das sekretorische Mikromilieu
- AP6: Untersuchungen zu den Mechanismen der Tumorinitiation, -promotion und -progression in der Stroma-Interaktion *in vivo*
- AP7: Hat eine kombinierte UVA/IRA Bestrahlung Einfluss auf die Induktion und Reparatur UV-induzierter DNA-Läsionen in SOD2 defizienten Keratinozyten?
- AP8: Kann die gesteigerte UVA-induzierte Tumorigenese in der Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Maus durch antioxidative Prävention vermindert werden?
- AP9: Zeigen die in transgenen Mäusen mit gewebespezifischer SOD-Defizienz durch UVA-Strahlung induzierten Tumore genetische oder epigenetische Besonderheiten?
- AP10: Gibt es eine Wechselwirkung von UVA und IRA bei der Hauttumorigenese?

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Murine SOD2-defiziente Fibroblasten wurden mit Wasserstoffperoxid und dem ROS-Generator Rotenon sowie Eisen-induzierter Fenton-Reaktion behandelt. Die Durchflusszytometrie mit CPD-spezifischen Antikörpern bei AG2 Buxtehude ergab eine sehr geringe absolute Induktion von CPD bei einer prozentualen Steigerung im Vergleich zur Negativkontrolle um 50 %. Die UVB-Positivkontrolle zeigte eine Steigerung der CPD um das 30-fache.
- AP2: Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäuse für den Folgeversuch wurden gezüchtet und nach Budapest transferiert. UVA-Bestrahlungsexperimente alleine und in Kombination mit ROS-Scavengern (EUK134) wurden begonnen, um die Ergebnisse des ersten Bestrahlungsexperimentes zu validieren und eine mögliche Revertierung der UVA-induzierten Tumorigenese zu untersuchen.
- AP5: Murine Zellstämme der SOD2-defizienten Genotypen wurden zu AG1 DKFZ transferiert. Erste organotypische Kulturen (OTC) zwischen humanen Keratinozyten und murinen SOD2-defizienten Fibroblasten zeigten aufgrund unbekannter Inkompatibilität keine Differenzierung der Keratinozyten und keine Entwicklung einer Epidermis.
- AP7: Als Voraussetzung für 3.7 wurden murine SOD2-defiziente Keratinozyten immortalisiert. Die Immortalisierung wird zurzeit überprüft.
- AP8: Der Langzeit-UVA-Bestrahlungsversuch von Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäusen in Kombination mit ROS-Scavengern (EUK-134) wurde in Budapest begonnen.
- AP9: Tumorgewebe der Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäuse wurde asserviert und histologisch charakterisiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Da nur eine geringe CPD-Zunahme durch ROS induziert wurde, wird zurzeit geklärt, ob extern die Möglichkeit besteht, eine andere Methode der CPD-Detektion zu verwenden.
- AP2: Nach Zusendung von Tumor-Stroma-Gewebe der UVA-bestrahlten SOD2-defizienten Mäuse aus Budapest werden die feingeweblichen Analysen sowie molekulare Untersuchungen zur Qualität und Pathogenese der Tumoren fortgeführt, um Hinweise auf die molekularen Pathomechanismen zu erhalten.
- AP5: Mit AG1 DKFZ werden die Bedingungen für eine OTC-Differenzierung, Entwicklung der Hautstruktur und die sekretorische Interaktion zwischen murinen SOD2-defizienten Fibroblasten und humanen Keratinozyten in organotypischen Kulturen optimiert und weiter untersucht.
- AP7: Eine Methode zur Immortalisierung von Keratinozyten aus der Haut SOD2-defizienter Mäuse wurde etabliert. Zurzeit wird der Erfolg der Immortalisierung durch Langzeitkulturen geprüft, um die Keratinozyten anschließend einer kombinierten UVA/IRA-Bestrahlung zu unterziehen.
- AP8: Die Langzeit-UV-Bestrahlungsversuche werden mit ROS-Scavengern (EUK-134) fortgeführt.
- AP9: Gewebeproben der UV-induzierten Tumore werden in Kooperation mit AG2 Buxtehude weiter molekular analysiert.
- AP10: Epidermis-spezifisch SOD2-defiziente Mäuse wurden gezüchtet. Nach Genehmigung der Tierversuche werden die Mäuse zu AG3 IUF transferiert. Kombinationsbestrahlungen UVA/IRA von Hautzellen sind vorgesehen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> IUF- Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 003C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Mitochondriale Schäden		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2008 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 427.457,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. med. Krutmann	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem von AG4, IUF Düsseldorf vorgeschlagenen Teilaspekt geht es um die Rolle, die kurzwellige Infrarot (IRA)-Strahlung in der Schädigung der menschlichen Haut durch Sonnenstrahlung hat. Es wird heute als erwiesen angesehen, dass IRA-Strahlung, ähnlich wie UV-Strahlung zur extrinsischen Hautschädigung ursächlich beiträgt. Über die hierfür verantwortlichen Mechanismen, die Wechselwirkung zwischen UVA und IRA-Strahlung und geeignete Methoden zur Prävention UVA / IRA-induzierter Hautschäden ist bislang nur wenig bekannt. Gemeinsam ist jedoch beiden Strahlenarten, dass sie in der Lage sind, die Integrität und Funktion der Mitochondrien signifikant zu beeinträchtigen. Der Schwerpunkt der in der ersten Antragsperiode durchgeführten Arbeiten lag auf der Identifikation von Strategien, durch die die menschliche Haut gegen schädliche Wirkungen (i) der UVA Strahlung und (ii) der IRA Strahlung geschützt werden kann. Wichtig ist, dass die bisher durchgeführten Arbeiten fast ausnahmslos Studien darstellen, in denen die schädlichen Eigenschaften der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche separat analysiert wurden. Da dieser Expositionsansatz, so richtig und wichtig er initial auch ist, nicht die tatsächliche Expositionssituation des Menschen widerspiegelt, sollen daher in den nächsten Jahren schwerpunktmäßig (Wechsel)wirkungen kombinierter Bestrahlungsregime analysiert werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Komplementär zu den humanen organotypischen Kulturen (AG1) soll von der AG3 im Tiermodell (hairless Maus) untersucht werden, ob die UVA-induzierte Hautschädigung durch eine kombinierte Bestrahlung mit UVB oder IRA oder UVB plus IRA beeinflusst wird. Hierbei werden die gleichen Untersuchungsparameter angewendet wie für die ursprünglichen Untersuchungen an den Monolayer Kulturen, um so Vergleichbarkeit bzw. Unterschiede ermitteln zu können.
- AP2: Das Bestrahlungsprotokoll mit der größten Hautschädigung wird dann ausgesucht, um basierend auf den in der ersten Antragsperiode erarbeiteten Ergebnissen zum UVA, UVB und IRA-Schutz, eine Intervention mit einem „optimierten“ Sonnenschutz durchzuführen. Diese Untersuchungen zielen direkt darauf ab, die Schädigung zu verhindern, also Möglichkeiten der Prävention aufzuzeigen.
- AP3: Da sowohl IRA als auch UVA Strahlung ihre biologische Wirkung primär durch Mechanismen entfalten, die auf der Bildung reaktiver Sauerstoffspezies beruhen, wird zudem in enger Kooperation mit der AG4 (Dermatologie Ulm) untersucht werden, ob Mäuse mit einem durch genetische Manipulation hergestellten partiellen Defekt in der antioxidativen Abwehr hinsichtlich der UVA/IRA-induzierten Hautschädigung besonders empfindlich sind. Diese Arbeiten sind nicht nur von mechanistischer und grundlagenwissenschaftlicher Bedeutung, sondern auch von unmittelbarer Relevanz für die Identifizierung von Hochrisikogruppen beim Menschen.
- AP4: Um die Relevanz unserer Ergebnisse für den Menschen zu untersuchen, werden parallel soweit möglich Untersuchungen am Menschen sowie in Kooperation mit der AG1 (DKFZ Heidelberg) vergleichbare Untersuchungen an den organotypischen Hautkulturen (OTKs) durchgeführt. Hierbei wird AG3 vor allem Veränderungen der Nukleotidexzisionsreparatur untersuchen.
- AP5: Da die bisher durchgeführten Arbeiten zeigen, dass Hautstammzellen ein präferentielles Target für UVA, aber auch für IRA Strahlung sind, soll gemeinsam mit der AG2 (Elbekliniken Buxtehude) erstmals die Kombinationswirkung von UVA plus IRA auf diese Zellpopulation analysiert werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Nachdem die Zucht der zu verwendenden Mäuse nach zwischenzeitlichen Schwierigkeiten erfolgreich war, wird der Tierversuch planmäßig im Februar 2013 begonnen werden.
- AP2: Diese Arbeiten können erst durchgeführt werden, wenn die Arbeiten unter 1. abgeschlossen wurden.
- AP3: In den zuvor durchgeführten in-vitro-Untersuchungen konnte bereits gezeigt werden, dass der Transkriptionsfaktor HIF-1 eine wichtige Rolle bei der UVB-induzierten Expressionszunahme von DNA-Reparatur-Genen wie z. B. XPB, XPG und CSB in murinen Keratinozyten spielt, wobei die molekular zu Grunde liegende Signalkette nicht komplett verstanden wird. Da CSB selbst in der Lage ist, die Expression zahlreicher anderer UV-modulierbarer Gene zu beeinflussen, wurde unter Verwendung von CSB<sup>-/-</sup> Keratinozyten die Induktion von XPB und XPG analysiert. Tatsächlich war die UVB-vermittelte Induktion von XPB und XPG in CSB<sup>-/-</sup> Keratinozyten unterdrückt. Im Einklang mit den zuvor beschriebenen Daten zeigte die Untersuchung der DNA-Reparaturkapazität der CSB<sup>-/-</sup> Keratinozyten anhand von UVB-induzierten Cyclobutanpyrimidin-Dimeren (CPD), dass diese Zellen nicht in der Lage sind, CPDs innerhalb eines Zeitraums von 24h nach Bestrahlung zu reparieren. Ebenso beobachteten wir erstmals, dass HIF-1 $\alpha$ <sup>-/-</sup> Keratinozyten eine eingeschränkte CPD-Reparatur aufweisen, auch wenn dieser Effekt nicht so ausgeprägt wie bei den CSB-defizienten Zellen zu beobachten war und in weiteren Experimenten verifiziert werden muss. Zusammengefasst deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass der HIF-1/CSB-Signalweg von Bedeutung für die Reparatur UV-induzierter DNA-Schäden ist und somit vor der Entstehung strahlungsbedingter Hautschäden wie z. B. Tumoren schützen könnte.
- AP4: In einer Humanstudie wurde in einem kontrollierten Studiendesign (randomisiert, Plazebo-kontrolliert, doppelt blind) untersucht, ob der bisher in-vitro beobachtete Schutzeffekt bestimmter Antioxidantien gegen IRA-induzierte Hautschädigung auch unter kontrollierten Bedingungen in menschlicher Haut in vivo nachweisbar ist. Der klinische Teil dieser Studie konnte zwischenzeitlich nach Erhalt des positiven Ethikvotums abgeschlossen werden und aktuell werden die entnommenen Hautbiopsien weiter analysiert und ausgewertet. Um zu prüfen, ob ein konventioneller Sonnenschutz mit UV Filtern in der Tat, wie aufgrund der in der 1. Förderperiode erhobenen Befunde, wirkungslos gegenüber IRA ist, wurde nach Erhalt des positiven Ethikvotums zwischenzeitlich mit einer zweiten, kontrollierten humanen in-vivo Studie begonnen, deren klinischer Teil voraussichtlich im April 2013 abgeschlossen sein wird. Zudem wurden die von der AG3 entwickelten IRA-Bestrahlungsprotokolle durch einen entsprechenden Personalaustausch in der AG1 (DKFZ Heidelberg) etabliert und erfolgreich erste Versuche mit humanen OTKs durchgeführt. Präliminäre Ergebnisse weisen daraufhin, dass IRA biologische Wirkungen in der Epidermis der bestrahlten OTKs hervorruft.
- AP5: Zwischenzeitlich wurden unter Verwendung der von der AG3 etablierten Bestrahlungsprotokolle und in enger Kooperation mit der AG3 (Personalaustausch) von der AG2 (Elbekliniken Buxtehude) sequentielle Bestrahlungen mit IRA plus UVA durchgeführt, um die Auswirkungen auf epidermale Stammzellen zu untersuchen. Die Auswertung der bestrahlten Proben wird aktuell in Buxtehude durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Der Tierversuch wird planmäßig im Februar 2013 beginnen.
- AP2: Diese Arbeiten können erst nach Abschluss der unter 1. beschriebenen Arbeiten begonnen werden.
- AP3: Die in-vitro-Bestrahlungsexperimente mit den HIF-1 $\alpha$ - und CSB-defizienten Keratinozyten werden parallel zu der Durchführung der Tierversuche fortgesetzt werden. Die Einschränkung der DNA-Reparatur in den HIF-1 $\alpha$ - und CSB-defizienten Keratinozyten soll mit Hilfe der Quantifizierung von CPDs verifiziert werden. Darüber hinaus soll die Reparatur weiterer UV-bedingter DNA-Läsionen (6-4-Photoproducte, 8-OHdG) in diesen Zellen untersucht werden, um eine mögliche Spezifität der beeinträchtigten Reparaturmechanismen zu testen. Da zumindest CPDs als auch 8-OHdGs ebenso durch UVA-Strahlung generiert werden können, soll das Auftreten und die Reparatur dieser Schäden sowie die Expression von Reparatur-beteiligten Faktoren wie z. B. XPA, XPB und XPG nach UVA-Bestrahlung untersucht werden. Zusätzlich sollen diese Versuche in Kombination mit Infrarot A-Strahlung durchgeführt werden (UVB/IRA und UVA/IRA).
- AP4: Die bereits begonnene klinische Studie konnte abgeschlossen werden, so dass nun die gewonnenen Biopsien weiterverarbeitet und ausgewertet werden können. Die bereits begonnene, zweite klinische Studie wird in den nächsten Wochen abgeschlossen und die erhaltenen Biopsien sodann ausgewertet werden.
- AP5: Gemeinsam mit AG2 werden die in Buxtehude bestrahlten Proben hinsichtlich der Wirkung der kombinierten Bestrahlung mit IRA plus UVB ausgewertet werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Elbe Kliniken Stade-Buxtehude gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH), Bremervörder Str. 111, 21682 Stade		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 003D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Epigenetische Veränderungen, Schadensinduktion, Prozessierung und Reparatur		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2008 bis 31.03.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 463.374,24 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Volkmer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel der Arbeiten ist es, die Bedeutung von DNA-Reparaturprozessen für die Hautkrebsentstehung nach Induktion von DNA-Schäden durch UVA im Detail zu erforschen. Dazu ist es notwendig, sowohl die Schadensinduktion, und im besonderen Maße die nachfolgende DNA-Reparatur nach (i) UVA-Strahlung im Vergleich zu anderen UV-Strahlenqualitäten (UVB und SSR (solar simulated (UV) radiation)) (ii) Wechselwirkung von UVA-Strahlung mit anderen Strahlenqualitäten (UVB, SSR, Infrarotstrahlung) zu beschreiben (iii) unterschiedlichen Expositionsmustern (chronisch vs. akut) zu charakterisieren (iv) Ausschalten oder Aktivierung bestimmter molekularer und zellulärer Reaktionswege zu charakterisieren. Es ist das Ziel, bei den Punkten (i) – (iv) insbesondere den Einfluss von epigenetischen Faktoren (DNA-Methylierung, Histon-Methylierung) zu bestimmen.

In Kooperation mit AG1 wurden Zellkulturproben (HaCaT) untersucht, die nach einer chronischen UVA-Bestrahlung in Nacktmäusen Tumore bildeten (vgl. gemeinsame Veröffentlichung: Wischermann et al. (2008). UVA radiation causes DNA strandbreaks, chromosomal aberrations and tumorigenic transformation in HaCaT skin keratinocytes. *Oncogene*, 27:4269-4280.) In Kooperation mit AG4 (Ulm) wurden die Wirkung der verminderten Stress-Antwort auf die Induktion von CPDs durch UVA und deren Reparatur in Mausfibroblasten mit konditional defizienter Mangansuperoxiddismutase (SOD2) (Maus-Modell AG4) untersucht.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Induktion von DNA-Schäden (Cyclobutan-Pyrimidindimeren, evtl. DNA-Doppelstrangbrüche, 8-oxoGuanin) nach Bestrahlung mit UVA und anderen Strahlenqualitäten (UVB, SSR) in unterschiedlichen Expositionsmustern (chronisch/akut).
- AP2: Messung der Reparatur der mit UVA, UVB, SSR und Kombination der Strahlenqualitäten induzierten Schäden.
- AP3: Untersuchung möglicher Veränderungen im Methylierungs- und Acetylierungsmuster von Histonen nach Bestrahlung.
- AP4: Untersuchung möglicher Veränderungen epigenetischer Muster im Chromatin bestrahlter Zellen an genspezifischen DNA-Sequenzen (methylierte CpG islands).
- AP5: Untersuchung möglicher UVA-abhängiger Veränderungen des epigenetischen Musters in Bezug zu einer weiteren Charakterisierung epidermaler Stammzellen und ihrer Bedeutung für die Hautkarzinogenese.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *Arbeitspaket 4:*

Weitere Untersuchung der Promotormethylierung in chronisch UVA-bestrahlten primären Keratinozyten. **Ergebnisse:** Die Promotormethylierung wurde in mehrfach UVA-bestrahlten (4 bis 6 mal, 100 bis 200 kJ/m<sup>2</sup> UVA) primären Keratinozyten überprüft. Dabei konnte in den Promotoren der Gene MGMT, LIN28, HIC1 und DNMT1 keine Abweichung festgestellt werden. Als Alternative wurde zur bisherigen Bestimmung der globalen Methylierung (LINE1 COBRA) ein LINE1 TaqMan qPCR-Assay getestet, der in ersten Versuchen vergleichbare Ergebnisse lieferte. Zusätzlich wurde in ersten Versuchen ein auf dem 5-MeC Antikörper basierender ELISA getestet.

#### *Arbeitspaket 5:*

Bestimmung epigenetischer Veränderungen und deren Effekt auf die Genexpression in den chronisch mit UVA-bestrahlten KH8.2.00 Keratinozyten. Untersuchung des Expressionsmusters hautkrebsrelevanter Gene nach akuter und chronischer UV Bestrahlung in HaCaT sowie die evtl. in diesem Zusammenhang stehenden epigenetischen Veränderungen. Untersuchung des Expressionsmusters hautkrebsrelevanter Gene in SCC-Zellen (primäre Tumore und Metastasen). Untersuchung möglicher Beteiligung von IRA an die Reparatur UV-induzierter DNA-Schäden. **Ergebnisse:** Bei über 5 Wochen chronisch mit UVA-bestrahlten KH Zellen (200 bzw. 400 kJ/m<sup>2</sup> pro Woche) wurden die epigenetischen Markierungen am Promoter von KLF4 und TERT untersucht. Bei beiden Genen wurde für die repressive Markierung H3K9me3 eine Reduzierung um 40 % festgestellt (nur bei 400 kJ/m<sup>2</sup> UVA). Bei KLF4 lag entsprechend eine um das 1,8-fach erhöhte Expression vor. Da die Funktion von KLF4 eng mit der Differenzierung von Hautzellen im Zusammenhang steht, könnten diese Ergebnisse auf eine UVA induzierte Ausdifferenzierung hindeuten. Bei den 15 Wochen chronisch mit UVA-bestrahlten KH Zellen konnten bislang keine großen Veränderungen bzgl. Histonmodifikationen beobachtet werden. Bei der Wiederholung der akuten Bestrahlung mit UVA (600 kJ/m<sup>2</sup>) und UVB (900 J/m<sup>2</sup>) konnten die vorläufigen Ergebnisse in HaCaT Zellen (Bericht 2012-1) bestätigt und erweitert werden (siehe unten). Eine Erhöhung der Expression von p16<sup>INK4a</sup> um den Faktor 2 wurde nach 600 kJ/m<sup>2</sup> UVA nachgewiesen. Nach akuter Bestrahlung mit UVB erhöhte sich die Expression von p16<sup>INK4a</sup> und p14<sup>ARF</sup> um den Faktor ~3. P16<sup>INK4a</sup> zeigte noch 16 Tage nach Bestrahlung eine leichte Erhöhung der Expression. Bei allen anderen Genen hatte sich das Kontrollniveau wieder eingestellt. KLF4 wurde verstärkt nach UVB Bestrahlung dosisabhängig exprimiert, wohingegen nach UVA kein Anstieg der Expression zu detektieren war. Auch hier stellte sich 16 Tage nach Bestrahlung wieder Kontrollniveau ein. HIC1 wurde sowohl nach akuter UVA als auch nach akuter UVB Bestrahlung vermehrt exprimiert, was auch nach 16 Tagen noch nachzuweisen war. Als Vergleich zu den chronischen Bestrahlungen mit UVA (2011-2) wurden die HaCaT Zellen 15 Wochen mit wöchentlich 100 und 200 J/m<sup>2</sup> UVB bestrahlt und das Expressionsmuster ausgewählter Gene untersucht. 14 Tage nach der letzten Bestrahlung ist eine Repression von p21<sup>CIP1</sup> und HIC1 um den Faktor ~2 zu beobachten. Eine p16<sup>INK4a</sup> Repression konnte nicht beobachtet werden. Die Untersuchung des Expressionsmusters hautkrebsrelevanter Gene in Primärmaterial sowie IRA-Versuche dauern noch an.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Abschließende Analyse der Promotormethylierung in Zellen mit unterschiedlichen Bestrahlungen.
- AP5: Untersuchung der IR-Bestrahlungsexperimente (möglicher Beteiligung von IRA an die Reparatur UV-induzierter DNA-Schäden, epigenetische Veränderungen. Untersuchung der Expression ausgewählter Gene und epigenetischer Veränderungen in chronisch UV-bestrahlten Keratinozytenzelllinien. Vergleichende Analyse von Expression und epigenetischen Veränderungen hautkrebsrelevanter Gene in den Proben mit unterschiedlichen Hauttumorstadien um evtl. stadienspezifische Signaturen zu identifizieren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Siehe Bericht 2011-2.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 005A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2008 bis 31.10.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 686.460,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kriehuber	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Gen- und Proteinexpression in primären humanen Zellen und humanen Zelllinien soll mit dem Ziel hin untersucht und analysiert werden, Gen- und Proteinexpressionsmuster zu identifizieren, die es zum einen ermöglichen, die Dosis einer vorausgegangenen Strahlenexposition schnell und zuverlässig abzuschätzen und zum anderen erlauben, Aussagen über die Strahlenqualität zu treffen. Die Beschreibung und das Verständnis der Interaktion der beteiligten Signaltransduktionswege soll zudem erlauben, Schlüsselgene zu identifizieren, die eine zeitlich lang andauernde oder verzögert auftretende strahlendosis- und/oder strahlenqualitätsabhängige Expressionsänderung oder Aktivierungsänderung ihres Genproduktes aufweisen und hierüber zu einem besseren Verständnis der molekularbiologischen Grundlagen der zellulären Strahlenwirkung führen. Ein spezielles Interesse gilt hier den Auger-Elektronen, deren biologische Wirkung bislang nicht adäquat in einem Qualitätsfaktor abgebildet ist, da die biologischen Wirkmechanismen weitgehend unverstanden und zudem konventionelle Dosimetrie-Konzepte nicht anwendbar sind. Die vergleichenden Untersuchungen verschiedener Strahlenqualitäten hinsichtlich der Veränderungen der Genexpression sollen somit auch zu einem besseren Verständnis der biologischen Wirkung von Auger-Elektronen-Emittern (AEE) führen. Ein weiteres Ziel des Vorhabens ist die Etablierung und Validierung von Single-Nucleotide-Polymorphisms (SNPs), als mögliche Marker für die zelluläre Strahlenempfindlichkeit und das Risiko von Nebenwirkungen nach Strahlentherapie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- 2.1 Können Genexpressionsänderungen in primären Lymphozyten die Höhe einer Gamma-Exposition bis zu 48 h nach erfolgter Exposition zuverlässig anzeigen? Hierzu sollen in isolierten primären Lymphozyten von sechs Spendern zu drei verschiedenen Zeitpunkten und nach Exposition mit vier verschiedenen Strahlendosen RNA-Isolate gewonnen werden. Diese sollen im Anschluss gepoolt und mittels DNA-Microarrays hinsichtlich signifikanter Änderungen des Genexpressionsprofils in Zusammenarbeit mit der Gruppe Prof. Wolkenhauer (Universität Rostock) analysiert werden. Kandidatengene mit robusten Expressionsänderungen sollen mittels qRT-PCR verifiziert und hinsichtlich ihrer Aussagekraft für eine retrospektive Dosisabschätzung in einer kleinen Population (< 12 Personen) *in vitro* verifiziert werden.
- 2.2 Können charakteristische Genexpressionsänderungen in lymphoblastoiden Zelllinien die Exposition mit verschiedenen Strahlenqualitäten anzeigen? Hierzu sollen Jurkat-Zellen mit drei verschiedenen Strahlenqualitäten – Auger-Elektronen, Alpha-Partikeln und Gamma-Strahlung - konfrontiert werden und Genexpressionsprofile erstellt und vergleichend analysiert werden. Über die Analyse sollen Gene bzw. Gengruppen identifiziert werden, die es erlauben, die drei untersuchten Strahlenqualitäten zu diskriminieren. Für alle drei Strahlenqualitäten soll aufgrund der großen Inhomogenität der Energie-deposition bei Auger-Elektronen und Alpha-Partikeln zuvor eine Dosiswirkungsabschätzung über verschiedene biologische Endpunkte erfolgen.
- 2.3 Können Auger-Elektronen-Emitter (AEE) über geeignete Carriermoleküle gezielt an die DNA angela-

gert und hierüber eine Schädigung der target-Sequenz induziert werden und inwieweit führt die Schädigung von funktional verschiedenen Bereichen des Chromatins zu unterschiedlichen Genexpressionsänderungen? Die gezielte Exposition von Chromatinstrukturen mit AEE soll anhand von mit  $^{125}\text{I}$ -markierten DNA-Triplex-bildenden Oligonukleotiden (TFO), aber auch mittels DNA-inkorporiertem 5- $^{125}\text{I}$ -2'-desoxyuridin ( $^{125}\text{I}$ -UdR) durchgeführt werden. In SCL-II Zellen sollen nach Transfektion mit spezifischen TFOs sowie mit  $^{125}\text{I}$ -UdR die zelluläre Schädigung, die chromosomale Schädigung und die Expressionsänderungen spezifischer Gene untersucht werden.

- 2.4 Die bisherigen Daten, die im Rahmen dieses Projektes gewonnen wurden, deuten daraufhin, dass definierte SNPs neben der zellulären Strahlenempfindlichkeit vor allem den Schweregrad der Akutreaktion „Erythem“ beeinflussen. Es soll daher für die zehn resistertesten und zehn sensitivsten Patientinnen des Erythemkollektivs mittels DNA-Microarray-Technik ein vollständiges Genexpressionsprofil nach Bestrahlung erstellt werden, um zu klären, ob charakteristische und für Strahlenempfindlichkeit / Strahlenunempfindlichkeit signifikante Genexpressionsmuster auftreten und ob hierbei Gene involviert sind, für die bereits die SNP-Analysen durchgeführt wurden. Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zu überprüfen, soll eine retrospektive Studie von 120 Kopf/Hals-Tumorpatienten am UKE Hamburg vergleichend untersucht werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- 2.1: Etablierung eines Probanden-Pools für die Untersuchungen zur biodosimetrischen in vivo Anwendbarkeit der bereits in vitro identifizierten Gensignaturen im Niedrig- und Hochdosisbereich. Publikation der Ergebnisse (in vitro Gensignaturen) zu den Hoch- und Niedrigdosisexperimenten.
- 2.2: Es konnten 5 Gene identifiziert und durch qRT-PCR validiert werden, welche die Diskriminierung der drei untersuchten Strahlenqualitäten (Auger-Elektronen,  $\alpha$ -Partikeln und  $\gamma$ -Strahlung) erlauben.
- 2.3: Es wurden Untersuchungen zur biologischen Wirkung von potentiell Quadruplex-bildenden I-125 markierten TFOs durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die induzierten zyto- und genotoxischen Effekte von Quadruplex-bildenden I-125 markierten TFOs die biologischen Effekte von einzel- als auch multi-bindenden TFOs annähernd um den Faktor 2 übersteigen. Publikation der Ergebnisse zur biologischen Wirksamkeit von I-125 markierten TFOs.
- 2.4: Erstellung und Erhalt des für die Durchführung der klinischen Studie notwendigen Ethikantrages. Etablierung der Methodik für die Quantifizierung von DNA-Reparaturfoci ( $\gamma$ -H2AX und 53BP1) in funktionsfähigen Lymphozyten zur Bestimmung der individuellen Strahlenempfindlichkeit.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.1: Etablierung eines Probanden-Pools für die Untersuchungen zur biodosimetrischen in vivo Anwendbarkeit der bereits in vitro identifizierten Gensignaturen im Niedrig- und Hochdosisbereich. Überprüfung der in vivo Anwendbarkeit der identifizierten Gensignaturen/Marker gene für die Dosiszuordnung im Niedrig- und Hochdosisbereich.
- 2.2: Sequenzierung der aufgereinigten qRT-PCR-Produkte der 5 Kandidatengene. Ermittlung der jeweiligen Genfunktion der identifizierten Kandidatengene sowie Analyse beteiligter Signalwege und biologischer Prozesse
- 2.3: Untersuchung der Spezifität und Komplexität der durch I-125-TFO induzierten DNA Schäden im zellulären System mittels geeigneter Plasmidkonstrukte.
- 2.4: Gewinnung der Blutproben für die RNA-Isolierung für die geplanten Microarray-Experimente und die Bestimmung der Strahlenempfindlichkeit per Foci-Assay.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Knops K, Boldt S, Wolkenhauer O, Kriehuber R.: Gene expression in low- and high-dose-irradiated human peripheral blood lymphocytes: possible applications for biodosimetry. *Radiat Res.*, 178(4):304-12 (2012)

Dahmen V. and Kriehuber R.: Cytotoxic effects and specific gene expression alterations induced by I-125-labeled triplex-forming oligonucleotides. *International Journal of Radiobiology*, 88(12):972-979 (2012)

Knops K.: Genexpressionsanalysen in humanen peripheren Blutlymphozyten nach Bestrahlung - Grundlagen für biodosimetrische Applikationen, Dissertationsschrift Universität Duisburg-Essen (2012)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Duisburg-Essen, Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 005C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität; TP: ATM/ATR Signaltransduktionswege und Strahlenempfindlichkeit in Normal- und Tumor-Zellen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2008 bis 31.10.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.283.590,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Iliakis	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

**Ziel 1:** Den Strahlensensibilisierungsmechanismus von Nucleosidanalogen im Hinblick auf die Reparaturmechanismen, die durch diese Substanzen inhibiert werden, zu untersuchen.

**Ziel 2:** Die Effekte von durch Restriktionsendonukleasen induzierten Doppelstrangbrüchen zu charakterisieren.

**Ziel 3:** Den Einfluss der Checkpointkinasen Chk1 und Chk2 auf den Zelltod und Chromosomenaberrationen zu untersuchen.

**Ziel 4:** Die Aktivierung von wichtigen Signalmolekülen der zellulären Antwort auf Strahlenschäden, DNA-Doppelstrangbruch-Reparatur, ATM und ATR auf den Zelltod und Chromosomenaberrationen zu studieren.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

**Ziel 1:** Das Strahlensensibilisierungspotential verschiedener Nucleosidanaloge wie  $\beta$ -araA,  $\beta$ -araC und deren fluorinierte Derivate soll mit Hilfe des Koloniebildungsverfahrens untersucht werden. Pulsfeld Gelelektrophorese (PFGE) Experimente in den verschiedenen Phasen des Zellwachstums, wie auch in bestimmten Phasen des Zellzyklus (G1 und G2) werden durchgeführt. Der Effekt von Nucleosidanalogen auf die Homologe Rekombination soll untersucht werden. Dazu werden sowohl Plasmidsubstrate, die eine Erfassung von HRR erlauben als auch HRR Mutanten eingesetzt werden.

**Ziel 2:** Um gezielt Restriktionsenzym induzierte Doppelstrangbrüche in einer Zelle zu erzeugen, werden wir die I-Sce-I Endonuclease einsetzen. Mit Hilfe von Zelllinien, die eine vorher bestimmte Anzahl an I-Sce-I-Erkennungssequenz Integrationsstellen beherbergen, wird Zellüberleben über Koloniebildungsvermögen bestimmt. Parallel dazu werden auch Chromosomenaberrationen gemessen. Der Effekt von Nucleosidanalogen wird auf die Reparatur von durch I-Sce-I induzierten Doppelstrangbrüchen analysiert.

**Ziel 3:** Die zelluläre Strahlenempfindlichkeit von z. T. selbst etablierten Tumorzelllinien wird im Klonogenitätstest untersucht. Zusätzlich werden Fibroblasten und Lymphozyten aus Patienten mit Kopf-Hals- und Lungen-Tumoren mit und ohne Späteffekten in Kultur genommen und immortalisiert. Primärkulturen derselben Patienten, wenn möglich, werden etabliert. An diesem Material werden dann die anschließenden Untersuchungen durchgeführt. 2. Die Bedeutung der Checkpointkinasen Chk1 und Chk2 sowie auch von ATM und ATR wird bestimmt. Es wird nach Möglichkeiten gesucht, u. a. durch Inhibitoren von Checkpointkinasen (Chk1, Chk2), die Strahlenresistenz von Tumoren zu beeinflussen.

**Ziel 4:** Die Strahlenreaktion der Zellen wird charakterisiert. Hierzu wird die Bildung von gamma-H2AX und Rad51 foci, biochemische Aktivitätsmessungen für DNA-PK sowie Zellzyklusprogression gemessen werden. Die Bedeutung von ATM und ATR sowie Chk1 für die Reparatur und Strahlenempfindlichkeit wird bestimmt. Protonentherapie für Patienten mit hohem Risiko an Normalgewebseffekten wird evaluiert. Bestrahlungen mit Protonen erfolgen zum einen mit dem 12 MeV Cyclotron in der Strahlenklinik Essen, und der Microbeam Anlage des PTB in Braunschweig in Kollaboration mit Dr. U. Giesen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

**Ziel 1:** Die Unterdrückung der homologen Rekombination durch  $\beta$ -araA wurde vergleichend mit anderen Repli-

kationsinhibitoren gemessen. Dazu wurde ein Zellsystem verwendet, das ein stabil ins Genom integriertes Reporterkonstrukt trägt, in dem gezielt ein DSB durch eine Endonuclease induziert werden kann. Zuvor wurde die Inhibition der Replikation durch dieselben Stoffe bestimmt um diese angemessen vergleichen zu können. Es konnte festgestellt werden, dass  $\beta$ -araA im Vergleich zu Replikationsinhibitoren wie Hydroxyurea oder Aphidicolin die HRR deutlich stärker hemmt. Andere Nucleosidanaloge wie Gemcitabine oder F-araA üben gleichfalls eine starke Hemmung auf die HRR aus.

**Ziel 2:** Cytogenetische Untersuchungen wurden mit wildtyp CHO10B4 Klonen, welche simple DSBs und komplexe DSBs mit einem unterschiedlichen Maß an Komplexität modellieren, nach der DSB Induktion durch I-*SceI*, durchgeführt. Dafür wurden Klone untersucht, welche sieben Integrationen von Konstrukten mit einer I-*SceI* Schnittstelle (CHO-1X.I.*SceI*-7) und elf Integrationen von Konstrukten mit zwei (CHO-2X.I.*SceI*-R11) oder vier (CHO-4X.I.*SceI*-R11) Schnittstellen in nicht kompatibler Orientierung aufweisen. Anhand von G2-PCC Experimenten konnte eine hohe Anzahl von sowohl G2-PCC Brüchen, als auch von Austausch Aberrationen (Exchanges) in den Zelllinien, welche komplexe DSBs modellieren, nachgewiesen werden. Diese Beobachtung liefert einen Hinweis darauf, dass aus Enzym induzierten DSBs Chromatidbrüche entstehen. Weiterhin weist die Zelllinie CHO-4X.I.*SceI*-R11 die doppelte Anzahl an G2-PCC Brüchen und eine mindestens dreifache Erhöhung an Exchanges auf im Vergleich zu CHO-2X.I.*SceI*-R11. Mit dem gleichen Set an Zelllinien wurden Live Cell Imaging Experimente nach Kotransfektion der Expressionsvektoren von I-*SceI* und GFP gekoppeltem 53BP1 unter Zugabe des DNA-PKcs Inhibitors NU7441 durchgeführt. Es konnte beobachtet werden, dass in allen Zelllinien die maximale Anzahl der 53BP1 Foci, entsprechend der Anzahl an Integrationen, gebildet werden. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass ein DSB an allen I-*SceI* sites induziert wird, aber die Signalkaskade nur dann bis zum 53BP1 Protein signalisiert, falls der D-NHEJ pathway beeinträchtigt ist.

**Ziel 3:** Im Berichtszeitraum wurden zu diesem Punkt keine weiteren Experimente durchgeführt, bzw. wurden gerade erst begonnen.

**Ziel 4:** Die Analyse des Einflusses der Inhibition von ASH2L und EZH2 auf die Induktion und Reparatur von DSB mittels  $\gamma$ H2AX Foci in A7 wurde fortgeführt. ASH2L Inhibition mittels siRNA führt zu einer signifikanten Reduktion der  $\gamma$ H2AX Foci sowohl 30 min (-20 %,  $p < 0.05$ ) als auch 24 h nach Bestrahlung (-62 %,  $p < 0.05$ ). Die Genexpressionsstudien zeigen, dass ASH2L-Inhibierung zu einer erhöhten Genexpression von 289 Genen und zu einer reduzierten Expression von 970 Genen führt. Wurde hingegen EZH2 inhibiert, konnte eine erhöhte Expression von 544 Genen und eine reduzierte Expression von 445 Genen festgestellt werden. Viele der durch ASH2L und EZH2 deregulierten Gene finden sich in mehreren funktionalen Gruppen (Apoptose, Zellzyklus, Chromatin, DNA-Reparatur), was auf ein breites Funktionsspektrum schließen lässt. Die Immunfluoreszenzmethode zur Kolokalisation von DSB assoziierten Foci (53BP1) mit H3K27trimethyl als HC-Marker wurde weiter optimiert. Zunächst wurde der Einfluss der Bestrahlung auf den Methylierungsstatus (H3K27trimethyl) analysiert. Bereits 5 min nach Bestrahlung mit 0.5 Gy kommt es zu einer deutlichen Reduktion des HC Anteils, welche ab etwa 60 min nach Bestrahlung wieder ansteigt. Nach Bestrahlung mit höheren Dosen von 10 Gy bleibt diese Reduktion länger erhalten. Vorläufige Kolokalisationsanalysen von 53BP1 und H3K27trimethyl zeigen, dass 15 min nach Bestrahlung mit 0,5 Gy etwa 30 % der 53BP1 Foci mit dem HC kolokalisiert sind.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

**Ziel 1:** Überlebensexperimente mit Zelllinien, die Mutationen für Komponenten des HRR aufweisen werden fortgeführt. Der Einfluss von  $\beta$ -araA auf die Resektion von DSB wird genauer untersucht werden. Weitere Versuche sind notwendig um ein experimentelles Protokoll zur Untersuchung von Chromosomenbrüchen nach  $\beta$ -araA Behandlung zu finden, da die Ausbeute von Metaphase Zellen durch  $\beta$ -araA stark reduziert wird. Mikroskopische Studien zur Bildung von Foci weiterer Reparaturproteine sind geplant um ein besseres mechanistisches Verständnis der von  $\beta$ -araA auf die HRR ausgeübten Hemmung zu erlangen.

**Ziel 2:** Die Foci Kinetiken der Signalproteine  $\gamma$ H2AX und MDC1, welche in der Signalkaskade an einem früheren Zeitpunkt als 53BP1 aktiviert werden, sollen untersucht werden. Weiterhin sollen cytogenetische Untersuchungen mit dem gleichen Set an CHO10B4 Klonen nach Zugabe des DNA-PKcs Inhibitors durchgeführt werden, um die Unterschiede die mittels Live Cell Imaging beobachtet wurden zu verifizieren.

**Ziel 3:** Die Reparaturfähigkeit von replikativ gealterten (seneszenten) Fibroblasten nach fraktionierter Bestrahlung in Abhängigkeit von ATM wird untersucht.

**Ziel 4:** Die Identifikation der Gene welche zu einer Reduktion bzw. Erhöhung der strahleninduzierten Apoptose nach ASH2L bzw. EZH2 haben, wird in Folgeexperimenten mittels siRNA evaluiert. Diese Analysemethode zur Kolokalisation wird derzeit weiter optimiert.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Siehe FKZ: 02NUK001B

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Rostock, Ulmenstr. 69, 18057 Rostock		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 005D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2008 bis 31.10.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 326.176,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Wolkenhauer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Um den Menschen vor den negativen Auswirkungen ionisierender Strahlungen bestmöglich schützen und bei unabsichtlicher Strahlungseinwirkung notwendige Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, ist es notwendig, die Dosis der freigesetzten Strahlung bestimmen zu können. Die Bestimmung der Strahlendosis auf der Basis strahleninduzierter Genexpressionsänderungen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt im Bereich der Biodosimetrie, der viele Vorteile gegenüber herkömmlichen und etablierten Methoden birgt. So ist die Erstellung von Genexpressionsdaten einerseits weniger zeit- und kostenintensiv und andererseits kaum beschränkt auf spezifische Gewebe- oder Zellarten. Aufgrund dieser Vorteile ist es ein Hauptziel des Projektes, eine Teilmenge an Genen zu identifizieren, mit denen man anhand der strahleninduzierten Expressionsänderungen die Strahlendosis quantifizieren kann. In Zusammenarbeit mit Dr. Kriehuber (Forschungszentrum Jülich) analysieren wir die erstellten Microarray-Daten von Blutproben vor und nach der Behandlung mit ionisierender Strahlung in Hinblick auf das Vorhabensziel des Verbundprojektes.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Rekonstruktion eines regulatorischen Interaktionsnetzwerkes der Genexpression nach ionisierender Bestrahlung

AP2: Umsetzung des Interaktionsnetzwerk in ein Boolesches Modell

AP3: Analyse des Eingabe / Ausgabe Verhaltens des Modells

AP4: Experimentelle Validierung und Modelloptimierung

AP5: Modellierung kritischer Subnetzwerke

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Unsere Arbeiten in diesem Projektzeitraum umfassten:

- Die Entwicklung eines zweiten Ensemble-Ansatzes zur Kombination von verschiedenen Methoden zur Rekonstruktion genregulatorischer Netzwerke:  
Im letzten Projektzeitraum wurde bereits eine Methodik entwickelt, die mit Hilfe von überwachten Lernverfahren (supervised learning) verschiedene Rekonstruktionsmethoden kombinierte. Diese Methodik wurde in diesem Projektzeitraum erweitert, indem neben Support Vector Machines auch andere Lernverfahren, wie die Lineare Diskriminanzanalyse, zur Methodenkombination verwendet wurden. Darüberhinaus haben wir einen zweiten Ensemble-Ansatz entwickelt, der unter Verwendung von unüberwachten Lernverfahren, verschiedene Rekonstruktionsmethoden kombiniert. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, dass hier keine Trainingsdatensätze zum Erlernen der Netzwerkstrukturen benötigt werden.
- Aufbereitung drei großer Microarray-Datensätzen verschiedener Organismen zur Evaluation:  
Im letzten Projektzeitraum haben wir unsere Methoden mit Hilfe von relativ kleinen Datensätzen evaluiert. Dies kann problematisch sein, da einige Methoden für die Netzwerkvorhersage eine große Datenmenge (hohe Anzahl von Messungen pro Gen) benötigen. In diesem Projektzeitraum haben wir Datensätze der letzten DREAM challenge extrahiert und aufbereitet, um unsere Methoden an den bereitgestellten Goldstandards zu evaluieren und diese darüberhinaus mit bereits existierenden Methoden zu vergleichen. Unsere Ergebnisse zeigen deutlich, dass eine von uns durchgeführte Kombination der Methoden zu einer Verbesserung der Netzwerkkonstruktion gegenüber einzeln angewendeter Methoden führt. Es wird ebenso deutlich, dass eine Netzwerkrekonstruktion für prokaryotische Organismen deutlich bessere Ergebnisse erzielt als für eukaryotische Organismen.
- Extraktion von strahlungsrelevanten Microarray-Daten aus Expressionsdatenbanken:  
Da die Rekonstruktion von genregulatorischen Netzwerken eine grosse zugrunde liegende Datenmenge voraussetzt, sind die in diesem Projekt generierten Microarray Daten von bestrahlten Lymphozyten für die Herleitung eines „Strahlungsnetzwerkes“ nicht ausreichend. Wir haben daher weitere, thematisch passende, Genexpressionsdatensätze in der Datenbank Gene Expression Omnibus (GEO) extrahiert, um ein regulatorischen Interaktionsnetzwerk der Genexpression nach ionisierender Bestrahlung, vorhersagen zu können.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Nachdem wir anhand von Goldstandards der DREAM Challenge die Güte unserer Rekonstruktionsmethoden quantifizieren konnten, ist der nächste Schritt, die Herleitung eines regulatorischen Interaktionsnetzwerkes der Genexpression nach ionisierender Bestrahlung. Hierfür ist zunächst eine umfassende Datenaufbereitung notwendig, da hierfür Expressionsdaten verschiedener Institute und Plattformen vereint werden müssen. Daraufhin werden wir das Netzwerk auf Grundlage der von uns aufbereiteten Daten und entwickelten Methoden herleiten und die vorgesagten Geninteraktionen mit dem bisherigen Wissenstand über die Genexpressionsantwort nach ionisierender Strahlung vergleichen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 007E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Individuelle Strahlenempfindlichkeit und genomische Instabilität: Einfluss von Rb1 Gen-Variationen auf die Ausbildung akuter Nebenwirkungen und auf das Auftreten bösartiger Strahlenspätchäden nach den bei einer konventionellen Strahlentherapie angewendeten Gamma-Dosen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 425.076,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Atkinson	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des geplanten Forschungsverbundes sollen epidemiologische, in vivo-, und in vitro Untersuchungen durchgeführt werden, um die Bedeutung der strahleninduzierten genomischen Instabilität bei der individuellen Ausprägung von Strahlenschäden zu untersuchen. Gene und Genvarianten sollen identifiziert werden, die ein erhöhtes individuelles Risiko für die Ausbildung strahleninduzierter Akut- und Spätchäden vermitteln.

Im Teilprojekt E sollen die Auswirkungen der genomischen Instabilität in klinischen Modellen analysiert werden. In Teilprojekt 1 (Federführend Atkinson) wird die Auswirkung von Retinoblastom-Mutationen bei Tumor- und Normalgewebe nach therapeutisch relevanten Strahlendosen erforscht.

In Teilprojekt 2 (federführend Multhoff) soll die Stressantwort von Normalgeweben (Endothelzellen) und Tumorzellen auf niedrig dosierte Bestrahlung (subletale Bestrahlung) untersucht werden. Als Parameter der Stressantwort soll die Expression von Hsp70, nicht-klassischen MHC Molekülen (MICA/MICB, HLA-E) sowie Molekülen der Zelladhäsion (z. B. ICAM-1) und Survivin in den Zellen, auf der Zelloberfläche und im extrazellulären Milieu analysiert werden. Es hat sich gezeigt, dass die Expression von Hsp70 und HLA-E auf Endothelzellen nach Bestrahlung gesteigert ist. In der Zukunft sollen immunologische Konsequenzen dieser veränderten Expressionsmuster näher untersucht werden.

Nach Abschluss der in vitro Untersuchungen sollen ausgewählte Parameter der Stressantwort auf eine subletale Bestrahlung in einem C57/BL6 Mausmodell untersucht werden. Darüber hinaus ist geplant, Blut- und Serumproben von Tumorpatienten vor und nach Bestrahlung zu asservieren, um die in vivo Relevanz der in vitro Untersuchungen zu überprüfen. Teilprojekt 1 und 2 sind mit dem Arbeitspaket 02NUK007A direkt verknüpft.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

TP1: Rosemann

Abschluss des Vorhabens zum 31.12.2012.

- Veröffentlichen über der Strahlensensitivität von Osteosarkom Zelllinien.
- Veröffentlichen der mikroRNA als Biomarker der Strahlentherapie und
- Veröffentlichen der Normalgewebsreaktion mittels MikroRNA Bestimmungen.

TP2: Multhoff

- In vivo Bestrahlung (0 Gy, 30 Gy single dose) von Tumoren in Mäusen
- Isolation der Endothelzellen aus Tumor und Normalgeweben der Maus
- Durchflusszytometrische Analysen der Endothelzellmarker aus Tumor und Normalgewebe (CD31, CD102, CD105)
- Analysen der Seren von Mäuse vor und nach Bestrahlung hinsichtlich Hsp70 Serumgehalte
- Analyse der Seren von Tumorpatienten (Sarkome) hinsichtlich Hsp70 Serumgehalte und Assoziation zur Tumorgröße

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

TP1: Rosemann

Die im vorangegangenen Berichtszeitraum erhaltenen Daten zu Strahlensensitivität der Maus-Osteosarkom Zelllinien (mittels Limited Dilution Assay) wurden mit mehreren Wiederholungsexperimenten bestätigt. Es konnte gezeigt werden, dass sich diese Zelllinien hinsichtlich der Expression von Tumor-Stammzell-Markern auf mRNA Ebene (Oct3, Sox2, Klf4, Nestin, Bmi1) unterscheiden. Die bisherigen Arbeiten wurden im Rahmen einer Doktorarbeit durchgeführt. Im Berichtszeitraum wurden die gewonnenen Daten und Schlussfolgerungen der Thesis Kommission vorgestellt und im Rahmen eines Promotions-Zwischenberichtes zusammengefasst. Ein Manuskript wird gegenwärtig erarbeitet und soll bis 31.03. eingereicht werden.

Die Arbeiten zu den miRNA Profilen im Blutserum von Strahlentherapie-Patienten mit HNO Tumoren wurden auf der Jahrestagung der Europäischen Gesellschaft für Strahlenbiologie in Vietri-sul-Mare vorgestellt (I.Summer et al.). Ein Manuskript zur Publikation in „Radiotherapy & Oncology“ ist in Vorbereitung. Für die abschließenden Bewertungen der Normalgewebsreaktionen bei strahlentherapierten HNO-Tumor-Patienten und einer Korrelation mit den Serum-miRNA Profilen konnten die klinischen Daten erst Anfang 2013 ermittelt werden. Ein Bericht und Manuskript entsteht im Augenblick in Zusammenarbeit mit der Klinik für Strahlentherapie der LMU München.

TP2: Multhoff

Es wurde eine innovative Technologie etabliert, die es erlaubt primäre mikrovaskuläre Endothelzellen aus Normalgeweben der Maus zu isolieren und in Zellkultur zu bringen. Diese Endothelzellen exprimieren typische Endothelzellmarker wie z. B. CD31, CD102, CD105 auf der Zelloberfläche und weisen in Zellkultur das typische „Cobblestone“ Wachstumsmuster auf. Dem Labor steht ein IBIDI Flusssystem zur Verfügung, das es erlaubt Endothelzellen unter Scherstressbedingungen zu kultivieren, um sie funktionell zu charakterisieren. In einem nächsten Schritt soll versucht werden Endothelzellen aus Sarkomen zu isolieren. Es soll untersucht werden inwieweit sich Endothelzellen von Tumor und Normalgeweben unterscheiden, sowohl phänotypisch als auch funktionell. Die Etablierung und Kultivierung von Endothelzellen aus Mausgeweben ist im Labor etabliert, eine Publikation ist in Vorbereitung.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

TP1: Das Teilprojekt 1 des Vorhabens wurde mit dieser Berichtsperiode abgeschlossen.

TP2: Nachdem geklärt werden konnte, dass der Hsp70 Gehalt im Serum von Mäusen mit der Zelloberflächenexpression von Hsp70 auf den Tumorzellen assoziiert ist, soll nunmehr untersucht werden inwieweit eine Bestrahlung des Tumors die Hsp70 Gehalte im Serum beeinflusst. Zu diesem Zweck sollen Tumor der Mäuse in vivo mit einer Dosis von 10, 20 und 30 Gy Einmaldosis bestrahlt werden. Abhängig von der Tumorkontrolle sollen erneut die Hsp70 Serumgehalte bestimmt werden.

Darüber hinaus sollen Endothelzellen aus bestrahlten und nicht bestrahlten Tumoren und Normalgewebe der Maus isoliert werden und vergleichend phänotypisch untersucht werden.

Parallel dazu sollen Tumorumfängen menschlicher Tumore mit den bislang asservierten Hsp70 Serumgehalten korreliert werden. Bislang konnten von ca. 15 Patienten mit Sarkomen die Hsp70 Gehalte im Serum bestimmt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Rosemann M, “Biomarkers - The challenge to personalize radiation risk”, invited talk at the annual ESRB meeting, Vietri-sul-Mare 2012.

Schmid TE, Multhoff G. Radiation-induced stress proteins – the role of heat shock proteins (HSPs) in anti-tumor responses (Review). *Curr Med Chem* 19: 1765-1770, 2012

Schmid TE, Multhoff G. Non-targeted effects of photon and particle irradiation and the interaction with the immune system. *Front Oncol, The immunology of cellular stress proteins.* 2:80, 2012

Schilling D, Bayer C, Li W, Molls M, Vaupel P, Multhoff G. Radiosensitization of normoxic and hypoxic H1339 lung tumor cells by HSP90 inhibition is independent of hypoxia inducible factor 1 alpha. *PLoS One* 7:e31110, 2012 Feb 7

Schmid TE, Zlobinskaya O, Multhoff G. Differences in phosphorylated H2AX foci formation and removal of cells exposed to low and high linear energy transfer radiation. *Curr Genomics*, accepted 2012

Schilling S, Düwel M, Molls M, Multhoff G. Radiosensitization of wildtype p53 cancer cells by MDM2-inhibitor PXN727 is associated with altered Hsp70 levels. *epub CSC* 2012, Aug 30

Summerer I, Kraemer A, Zitzelsberger H, Niyazi M, Moertl S, Atkinson MJ, “Circulating microRNAs as biomarkers in radiation therapy of head and neck cancer patients”, talk at the annual ESRB meeting, Vietri-sul-Mare 2012.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Oberschleißheim		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 008A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Physikalisch-technische Optimierung und Quantifizierung von CT-Systemen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2009 bis 31.08.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.08.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 231.229,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. rer. nat. Hoeschen	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die globalen Zielsetzungen dieses Projektes sind:

- die Reduktion der Strahlenexposition der Bevölkerung durch technische Verbesserungen in der Computertomographie.
- Entwicklung standardisierter Verfahren zur Evaluation neuer Methoden oder Gerät.
- Die Kompetenz in Deutschland auf dem Gebiet des Medizinischen Strahlenschutzes und der Optimierung von diagnostischen Strahlenanwendungen zu erhalten und zu erweitern.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Entwicklung von physikalischen Verfahren, mit deren Hilfe in der alltäglichen Praxis zum Einsatz kommende CT-Scanner evaluiert und quantitativ verglichen werden sollen.
- Test unseres neu entwickelten Verfahrens an CT-Scannern in einem Münchner Klinikum und Vergleich mit bisher zum Einsatz kommenden Evaluierungsmethoden.
- Ein alternatives Verfahren wurde in Zusammenarbeit mit der U.S.-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) weiterentwickelt, um mit mathematisch genaueren Methoden CT Scanner zu charakterisieren.
- Monte-Carlo Simulationen von neuartigen CT-Geräten, die in unserer Abteilung entwickelt wurden.
- Charakterisierung von neuartigen CT-Geräten mit Hilfe der von uns (weiter-) entwickelten Evaluierungsmethoden (s. oben).

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- Fortsetzung des Monte-Carlo Simulationen des neuen CT-Gerätes (Watch-Scanner) inklusive Veränderungen, Vorbereitung Publikation
- Mitarbeit an einem Antrag an die IEC MT30 zur Überarbeitung des Standards zur Qualitätsbestimmung von CT-Bildern
- Überarbeitung des Bildraum-basierten Ansatzes zur Qualitätsbestimmung von CT-Bildern in Zusammenarbeit mit der FDA, entsprechende Publikation, inzwischen erschienen in Med. Phys. (hochwertigstes Fachjournal)
- Anwendung des überarbeiteten bildraum-basierten Ansatzes auf ein klinisches CT-System
- Mitwirkung an Publikationen zur CT-Evaluierung Chaité / MH Hannover

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- weitere Publikationen
- Koordination des Gesamtabschlussberichts
- Erstellung des Abschlussberichts im Berichtszeitraum

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

C.C. Brunner, B. Renger, C. Hoeschen, and I.S. Kyprianou: Investigation of a method to estimate the MTF and NPS of CT towards creating an international standard. Proc. SPIE, 7961:79613C, 2011.

C. C. Brunner, S. F. Abboud, C. Hoeschen, and I. S.Kyprianou: Signal detection and location-dependent noise in cone-beam Computed Tomography using the spatial definition of the Hotelling SNR, Med. Phys. 39(6), 2012: 3214-3228

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Charité - Universitätsmedizin Berlin, Campus Benjamin Franklin, Hindenburgdamm 30, 14195 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 008D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Reduktion der Strahlenexposition von Patienten auf dem Gebiet der CT-Angiographie, der Abdomen-CT und der Dual Source CT		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 499.910,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. med. Meyer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zielsetzung des am Standort Charité – Berlin durchgeführten Teilprojektes des Verbundprojekts (02NUK008D) ist zunächst die Ermittlung der Strahlenexposition bei der CT-Angiographie des Abdomens und anschließend der Vergleich der Bildqualität und Strahlenexposition an einem zu bauenden anthropomorphen Phantom unter Verwendung strahlensparender Akquisitionsprotokolle und fortschrittlicher Bildberechnungsalgorithmen unter Zusammenarbeit des Helmholtz-Zentrums München (02NUK008A) und des Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München (02NUK008C). Anschließend wird die Erprobung in einer Patientenpilotstudie angestrebt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Gesamtvorhaben umfasst an der Charité:

- Zunächst wird die Thermolumineszendosimetrie in der Radiologie zur Messung der Strahlenexposition am Alderson-Phantom und am Patienten etabliert.
- Anschließend wird ein bisher nicht auf dem Markt verfügbares anthropomorphes Gefäßphantoms für den Einsatz im Alderson-Phantom gebaut. Mit Hilfe dieses Phantoms werden die bisher verfügbaren Untersuchungsprotokolle zunächst experimentell in Hinblick auf die Bildqualität und die Strahlenexposition optimiert. Anschließend erfolgt die klinische Überprüfung in einer Patientenpilotstudie.
- In Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum werden die Rohdaten der CT-Untersuchungen mit dem am Helmholtz-Zentrum entwickelten neuen Bildrekonstruktionsalgorithmen am Phantom und in einer Patientenpilotstudie in Hinblick auf die Dosisreduktion untersucht und weiterentwickelt. Ziel ist es eine Dosisreduktion von etwa 50 % zu erreichen. Die so gewonnen Bilder werden im Hinblick auf die Genauigkeit der Stenosequantifizierung mit dem Goldstandard (bisheriges Standarduntersuchungsprotokoll) verglichen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im aktuellen Berichtszeitraum wurde aufbauend auf den Ergebnissen der veröffentlichten Phantomstudie „Dose-Wise Scanning in Visceral Computed Tomography Angiography: A Phantom Study“, eine weitere Phantomstudie zur Einsetzbarkeit der Dual-Source CT für die sukzessive Reduktion der Strahlenexposition in der CT durchgeführt. Diese zeigt, dass es in gewissen Grenzen möglich ist, die verwendete Röntgenstrahlung auf zwei Röntgen-Röhren Detektorsysteme ohne klinisch relevanten Qualitätsverlust im Vergleich zu einem einzelnen Röntgen-Röhren Detektorsystem aufzuteilen. Dies ermöglicht unabhängig von neuen Rekonstruktionsalgorithmen das iterative Überprüfen der für eine Untersuchung notwendigen Strahlenexposition.

Darüber hinaus wurde die Patientenakquise von 50 Patienten für die prospektive, klinische Studie „Reduktion der Strahlenexposition in der Becken-Bein-CT-Angiographie“ beendet. Diese Studie wird zurzeit ausgewertet. Die ersten Ergebnisse hierzu zeigen, dass bei guter Kontrastierung eine weitere Reduktion der Strahlenexposition auf ca. 2/3 der bisherigen Standardprotokolle in der CT-Angiographie der Becken- und Beinarterien ohne Minderung der diagnostischen Aussagekraft möglich ist.

Im weiteren wurde im letzten Berichtszeitraum die retrospektive Studie zum optimalen Kontrastmittelbolustiming in der CT-Angiographie der Becken-Bein-Arterien bei Patienten mit Aortenaneurysmata fertiggestellt, auf dem Nordamerikanischen Röntgenkongress präsentiert und zur Veröffentlichung eingereicht.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Weiterführend ist geplant, die Auswertung der Patienten- und klinischen Studie zu beenden und die Ergebnisse zu veröffentlichen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Werncke T, von Falck C, Taupitz M, Hoeschen C, Wacker, F, Meyer, B. C. Dose-wise scanning in visceral computed tomography angiography: a phantom study. Invest Radiol 2012; 47:530-537

Exposition in CT-angiography: the impact of the new OPED algorithm in CT-angiography (CTA) - a phantom study, T. Werncke<sup>1</sup>, B. Renger<sup>2</sup>, O. Tischenko<sup>3</sup>, F. Wacker<sup>4</sup>, B. Meyer<sup>4</sup>; <sup>1</sup>Berlin/DE, <sup>2</sup>Munich/DE, <sup>3</sup>Neuherberg/DE, <sup>4</sup>Hannover/DE, ECR 2012

Werncke, T; Schegerer, A; Wacker, F; Meyer, BC: Exposition in CT Angiography: Assessment of Potential Dose Reduction in a Vessel Phantom; Vascular and Interventional Radiology. Am J Roentgenol 2011; 196:A62-64

Run-off CT-Angiography in Patients with an Aortic Aneurysm - Is There an Optimal Acquisition Strategy? Thomas Werncke, Mathias Wittmann, Matthias Taupitz, Frank Wacker, Bernhard Meyer, RSNA 2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Ammerländer Heerstr. 114-118, 26129 Oldenburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 008E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Individuelle Dosisbestimmung und Berechnung		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2009 bis 30.11.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 30.11.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 330.932,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Poppe	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen.

In diesem Teilprojekt sollen Verfahren zur Individuellen Dosisbestimmung und Berechnung in der Radiologie speziell am CT entwickelt werden.

Im Rahmen des Verbundes besteht ein enger Austausch mit allen Verbundpartnern.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Rahmen des Teilprojektes sollen Verfahren zur Berechnung der Dosisverteilung im Körper erstellt werden. Das Arbeitsprogramm gliedert sich daher in:

- a) Untersuchung von möglichen Verfahren zur Dosisberechnung,
- b) Untersuchung der notwendigen radiologischen Parameter,
- c) Untersuchung der Notwendigkeit der Individualisierung bzw. Parametrisierung verschiedener relevanter Parameter,
- d) Adaption von Verfahren aus Strahlentherapie (Organkonturierung, Organdosisberechnung etc.),
- e) Detaillierte Monte-Carlo Simulationen für verschiedene dosimetrische Situationen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *Anpassung und Optimierung der analytischen Beschreibung der Dosisdeposition von Röntgenstrahlung im kV-Bereich*

Ein unentbehrliches Werkzeug zur Dosisbestimmung in der Bestrahlungsplanung mit 3D-Planungssystemen ist der so genannte „pencil-beam“-Algorithmus. Ausgehend von der analytischen Beschreibung der Dosisdeposition mit Hilfe der Superposition von Exponentialfunktionen, welche in bisherigen Arbeiten im Rahmen dieses Projektes gewonnen wurde, wurde die Parametrisierung auf ihre Implementation hin optimiert und ersten Verifikationen unterzogen. Aufgetretene Differenzen zu ebenfalls durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen wurden charakterisiert und auf Möglichkeiten zur Minimierung hin untersucht.

#### *Evaluation von verschiedenen Patientenschutzmitteln für craniale CT-Untersuchungen*

Zum Schutz des Patienten bei Schädel CT Untersuchungen muss gemäß Sachverständigen-Richtlinie (SV-RL) im Untersuchungsraum ein Schilddrüsenschutz bereitgehalten werden. Die tatsächliche Nutzung dieser Schutzvorrichtungen ist aber aus diversen Gründen oftmals nicht gegeben. Mittels im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Ergebnissen zur Sensitivität von Thermolumineszenzdosimetern beim Einsatz in der Dosimetrie an Computertomographen wurden verschiedene Patientenabdeckungen auf ihre Effektivität zur Dosisreduktion bei cranialen CT Untersuchungen evaluiert. Zu diesem Zweck wurde eine Absolutkalibration der Thermolumineszenzdosimeter im Strahlenfeld eines klinisch genutzten CT Scanners mit Hilfe einer Ionisationskammer für Luftkerma-Längenprodukt und radiochromen Film durchgeführt und anschließend Organdosen in einem anthropomorphen Phantom gemessen. Ausgewertet wurde dabei die Organdosis in Schilddrüse, Sternum sowie weiblicher Mamma. Als weiterer Untersuchungsgegenstand wurden die Einstellparameter und insbesondere die Lokalisati-

on der Übersichtsaufnahme zur Positionierung des eigentlichen CT-Scans identifiziert in die Auswertung einbezogen.

#### *Monte Carlo Simulationen zur Dosimetrie in der Computertomographie*

In den vorherigen Berichtszeiträumen wurden die Monte Carlo Simulationen eines Siemens SOMATOM Sensation 64 Scanners mit dem Programm GMctdospp (Institut für Medizinische Physik und Strahlenschutz, Technischen Hochschule Mittelhessen) sowohl durch Vergleich mit durchgeführten CTDI-Messungen und als auch durch Messungen von Dosisprofilen mit Thermolumineszenzdosimetern (TLD) validiert. Die Messungen wurden in standardisierten Head- und Body-Phantomen aus PMMA mit einem Durchmesser von 16 cm bzw. 32 cm durchgeführt. Die CTDI-Messungen verschiedene Kollimationen von 10 mm bis 28,8 mm und unterschiedlichen Energien (80 kV, 100 kV, 120 kV, 140 kV) stimmten innerhalb von 2 % für das Head-Phantom und innerhalb von 4,9 % für das Body-Phantom mit den durchgeführten Simulationen überein. Die mit Hilfe von TLDs gemessenen Dosisprofile bei 80 kV und 120 kV bei den verschiedenen Kollimationen zeigten ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Dosisprofilen. Da die Gesamtkollimation auf der Zentralachse eines Mehrzeilen-CT-Scanners sich durch sogenanntes „Overbeaming“ von der am CT-Gerät eingestellten nominellen Kollimation unterscheidet, wurde die Gesamtkollimation zuvor mit Hilfe von radiochromatischen Filmen (Gafchromic XR-QA2) ausgemessen, um eine präzise Simulation zu ermöglichen. Die Kollimation auf der Zentralachse des Siemens SOMATOM Sensation 64 Scanners liegt für die ausgemessenen Kollimationen im Mehrschicht-Betrieb zwischen 3,3 und 3,5 mm über der nominell eingestellten Gesamtkollimation. Die Messdaten konnten durch weitere Messungen der Gesamtkollimation für weitere Energien und unterschiedliche Größen des Focalspots der Röntgenröhre weiter vervollständigt werden.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Methode der analytischen Beschreibung und anschließender Berechnung von Dosisdepositionen in der Röntgendiagnostik soll weiter an die klinische Praxis angepasst und optimiert werden. Außerdem soll die Möglichkeit der Implementation in bestehende Bestrahlungsplanungssysteme evaluiert werden.

Des Weiteren sollen die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Dosimetrie in kV-Feldern genutzt werden, um die Erweiterung bestehender Normen auf neue Geräteklassen, wie z. B. Cone-Beam-CT Geräte, bzw. die Schaffung neuer Normen zu ermöglichen. Dafür sollen typische Expositionssituationen dosimetrisch charakterisiert werden und gegebenenfalls neue dosimetrische Größen eingeführt werden und ihre Relation zu bestehenden Größen untersucht werden.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Von Boetticher H, Lüllau T, Lammers M, Kamau E, Poppe B. Exposition of the organ liver in computed tomography of the thorax: a new approach to individual dosimetry with methods of radiotherapy treatment planning, accepted by Health Physics

Lüllau T, von Boetticher H, Lammers M, Poppe B. Einfluss des Umfangs des Patienten auf Organdosen in der Computertomographie. N. Hodapp, J. Hennig, M. Mix: Medizinische Physik 2010, S. 300-302

Lüllau T, von Boetticher H, Lammers M, Poppe B. Ein Programm zur Modifikation von Voxelmodellen des Menschen. Hodapp, J. Hennig, M. Mix: Medizinische Physik 2010, S. 482-483

Lüllau T, von Boetticher H, Lammers M, Poppe B. Exposition des Organs Lebers beim Thorax-CT – Auswirkungen einer individuellen Dosimetrie in der Computertomographie. N. Hodapp, J. Hennig, M. Mix: Medizinische Physik 2010, S. 484-486

Lüllau T, Poppe B, von Boetticher H. A program for the modification of human voxel models and radiological DICOM studies, RSNA 2011

Liebmann M, Lüllau T, Uhlig C H, Poppe B, von Boetticher H. Entwicklung eines Multi-Detektor Phantoms für die Dosimetrie im CT, 3 Ländertagung der ÖGMP, DGMP und SGSMP, Wien 2011

Liebmann M, Lüllau T, Feltes M, Poppe B, von Boetticher H. Comparison of different methods for measuring CT dose profiles with a new dosimetry phantom, 13th International Radiation Protection Association (IRPA) Congress, Glasgow 2012

Liebmann M, Poppe B, von Boetticher H. Suitability of various radiation detectors used in radiation therapy for x-ray dosimetry in computed tomography, 54th AAPM Annual Meeting, Charlotte, NC 2012

Lüllau T, Liebmann M, von Boetticher H, Poppe B. Measurement of X-Ray Beam Width and Geometric Efficiency in MDCT Using Radiochromic Films, 54th AAPM Annual Meeting, Charlotte, NC 2012

Liebmann M, Poppe B, von Boetticher H. Strahlentherapie-Dosimetriesysteme in der CT-Dosimetrie - Energieabhängigkeit und Einsatzgebiete, 43. Jahrestagung der DGMP, Jena 2012

Liebmann M, Lüllau T, Poppe B, von Boetticher H. Methoden zur Messung von CT-Dosisprofilen, 43. Jahrestagung der DGMP, Jena 2012

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 008F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Strahlenhygienische Bewertung und Optimierung diagnostischer und therapeutischer Verfahren in der Medizin		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2009 bis 31.12.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 700.892,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. med. Wenz	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundprojektes werden am Universitätsklinikum Mannheim zwei Teilprojekte mit den folgenden Zielen bearbeitet:

- Erfassung und strahlenhygienische Bewertung der kumulativen Strahlenexpositionen von Patienten mit koronarer Herzerkrankung (KHK).
- Funktionelle und pharmakologische Bildgebung für die biologisch-adaptierte Bestrahlungsplanung.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

*Teilprojekt 1:* Strahlenexposition von KHK-Patienten

- 1.1 Patientenspezifische Erfassung der Häufigkeit und Art diagnostischer und interventioneller Strahlenanwendungen sowie der dokumentierten Expositionsparameter aus dem KIS/RIS des Universitätsklinikums Mannheim.
- 1.2 Dosisabschätzung für die verschiedenen Strahlenanwendungen.
- 1.3 Berechnung der kumulativen Dosis der Patienten sowie der mittleren Strahlenexposition pro KHK-Patient und Jahr; statistische Auswertung und strahlenhygienische Bewertung.

*Teilprojekt 2:* Funktionelle und pharmakologische Bildgebung für die Bestrahlungsplanung

- 2.1 Entwicklung von Bildgebungstechniken zur nichtinvasiven Quantifizierung von Mikro-zirkulation, Mikromilieu und Energiestoffwechsel in Tumoren.
- 2.2 Entwicklung von Bildgebungstechniken zur Erfassung der Aufnahme und Retention von fluoridierten Chemotherapeutika im Tiermodell.
- 2.3 Entwicklung von mit Radiosensitizern beladenen kationischen Lipidkomplexen (vascular targeting).
- 2.4 Präklinische Untersuchungen zum Einfluss funktioneller Tumorparameter (Mikro-zirkulation, Mikromilieu, Energiestoffwechsel) bzw. von Pharmaka (Chemotherapeutika, Radiosensitizer-beladene Lipidkomplexe) auf die Strahlenwirkung.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

*Teilprojekt 1:* Strahlenexposition von KHK-Patienten

- 1.1 Die Erhebung von Daten zur Strahlenexposition von KHK-Patienten wurde abgeschlossen. Nach Bereinigung des Datensatzes verblieben 1219 Patienten (819 Männer, 400 Frauen), bei denen insgesamt 3938 diagnostische und interventionelle Strahlenanwendungen durchgeführt wurden. Im Mittel wurden 3,2 Strahlenanwendungen pro Patient durchgeführt. Am häufigsten waren Röntgenuntersuchungen (52,4 %), gefolgt von Herzkatheteruntersuchungen bzw. Katheterinterventionen (41,3 %), CT Untersuchungen (3,9 %) und Myokardperfusions-SPECT (2,3 %).
- 1.2 Für jede Einzeluntersuchung wurden aus den erhobenen Untersuchungs- bzw. Behandlungsparametern die Organdosiswerte sowie die effektiven Dosen (nach ICRP 103) sowie das daraus resultierende Strahlenrisiko nach den aktuellen BEIR-VII-Modellen berechnet. Dabei zeigte sich, dass 87 % der Strahlendosis durch

den Herzkatheter verursacht wurden.

- 1.3 Aus den ermittelten kumulativen effektiven Dosen wurde das kumulative Lebenszeitrisko einer strahleninduzierten Krebserkrankung abgeschätzt, dass maximal 0,88 % betrug. Die Ergebnisse der Studie wurden in einer Publikation zusammengefasst, die inzwischen eingereicht wurde.

*Teilprojekt 2: Funktionelle und pharmakologische Bildgebung für die Bestrahlungsplanung*

- 2.1 Tracerkinetische Modelle wurden implementiert. Die erfolgreiche Erweiterung der Hypoxiemessung auf eine 2D/3D-Kernspinnbildgebung wird aktuell noch optimiert.
- 2.2 Die Versuche in einem 3D-organotypischen mikrovaskulären *in vitro* Modell zeigten eine gute Aufnahme des 4-Komponenten Systems, wobei eine Schädigung nur im Tumorgewebe zu beobachten ist. Eine Behandlung von Tumoren in Kultur zeigte ebenfalls eine Reduktion der Größe. Eine erste Studie an Mäusen mit einem Brustkrebstumor Xenograft zeigte nach einer 2 wöchigen i.p. Applikation von 2 mg/ kg Körpergewicht (jeden 2. Tag) ein verlangsamtes Wachstum der Tumoren.
- 2.3 Im Rahmen der Untersuchung der strahlenbiologischen Wirkung von Radiosensitizern (Gold-Nanopartikeln) wurden weitere physikalische Dosissimulationen in 3D-Geometrie durchgeführt. Mit Hilfe von Monte Carlo-Rechnungen wurden für Bestrahlung mit kV-Röntgenquellen verschiedene dosimetrische Parameter in Abhängigkeit von der Partikelgröße analysiert. Besonderes Augenmerk galt hierbei der Eigenabsorption des Goldpartikels sowie der effektiven Elektronenreichweite. In Abhängigkeit vom verwendeten Spektrum wurden in einer weiteren Versuchsreihe Gütefaktoren bestimmt, welche die Durchführbarkeit einer definierten Dosiseskulation im Zielvolumen qualifizieren.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Teilprojekt 1: Das Teilprojekt ist abgeschlossen.

Teilprojekt 2: Das Teilprojekt ist abgeschlossen. Dissertationen werden im Laufe des Jahres fertig gestellt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- |               |  |
|---------------|--|
| Brix 2009     | Brix G, Zwick S, Kiessling F, Griebel J. Pharmacokinetic analysis of tissue microcirculation using nested models: Multimodel inference and parameter identifiability. <i>Med Phys</i> 2009; 36: 2923-2933  |
| Brix 2010a    | Brix G, Veit R, Häusler U. Strahlenhygiene in der medizinischen Röntgenbildgebung: Expositionsbestimmung und Strahlenschutzmaßnahmen. <i>Radiologe</i> , im Druck  |
| Brix 2010b    | Brix G, Zwick S, Griebel J, Fink C, Kiessling F. Estimation of tissue perfusion by dynamic contrast-enhanced imaging: Simulation-based evaluation of the steepest-slope method. <i>Eur Radiology</i> , DOI: 10.1007/s00330-010-1787-6.   |
| Brix 2010c    | Brix G, Griebel J, Kiessling F, Wenz F. Tracerkinetic modeling of angiogenesis based on dynamic contrast-enhanced CT and MRI measurements. <i>Eur J Nucl Med Mol Imag.</i> 2010, 37: S31-S51   |
| Fink 2010     | Fink C, Krissak R, Lechel U, Graf T, Schmidt B, Brix G, Takx RAP, Abro JA, Schoenberg SO, Schoepf UJ. Radiation exposure at coronary CT angiography: Second generation dual-source CT versus 64-section single source and first generation dual-source CT. <i>AJR Am J Roentgenol.</i> 2011 May; 196(5):W550-7                 |
| Roeloffs 2010 | Roeloffs V, Wetterling F, Kirsch S, Tsagogiorgas C, Schad L. Entwicklung einer doppelresonanten <sup>1</sup> H/ <sup>19</sup> F-Spule zur Stoffmengen-Quantifizierung mittels Magnetresonanztomographie bei 9.4T. German chapter of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine                               |
| Brix 2011     | Brix G, Lechel U, Petersheim M, Krissak R, Fink C. Dynamic Contrast-Enhanced CT Studies: Balancing patient exposure and image noise. <i>Invest Radiol.</i> 2011, 46(1): 64-70  |
| Kegel 2012    | S. Kegel, G. Glatting, B. Theisinger, C. Tsagogiorgas, L.R. Schad, S. Kirsch. In vitro determination of calibration curves for a pure and an emulsified semifluorinated alkane as prerequisite for <sup>19</sup> F-oximetry. <i>ESMRMB, Book of Abstracts, Lissabon, 2012, Nr. 734, S.547</i> (DOI: 10.1007/s10334-012-0324-9) |

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 008G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen - Reduktion der durch computertomographische Untersuchungen hervorgerufenen Strahlenexposition		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2010 bis 30.11.2012	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 30.11.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 77.781,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Stiller	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Forschungsvorhabens sind die Analyse und Quantifizierung der Strahlenexposition der Patienten in der Computertomographie (CT) von Thorax und Abdomen, um neue bzw. weiterführende Konzepte zur Reduktion der Strahlenbelastung zu erforschen und Modelle zu deren Vorhersage zu entwickeln. Zu diesem Zweck soll die Strahlenexposition von Thorax- und Abdomen-CT zunächst für Untersuchungen mit Standardprotokollen dosimetrisch bestimmt (Messung) werden. Basierend auf den Ergebnissen der vorhergehenden Dosimetrie sollen dosisreduzierte/-optimierte Scanprotokolle entwickelt (Reduktion der Strahlenexposition z. B. durch 3D-Dosismodulation, Rausch- und Gewichtsadaption, Einsatz spezieller Blenden und Filter) und deren Strahlenexposition mit der gleichen Methodik experimentell quantifiziert werden. In einem weiteren Schritt soll ein Monte-Carlo Computerprogramm zur Simulation der Strahlenexposition von CT-Untersuchungen entwickelt, getestet und mit den Ergebnissen der dosimetrischen Messungen korreliert und validiert werden.

02NUK008B: Die physikalischen Projekte des Forschungsvorhabens werden mit den medizinisch-radiologischen Forschungsvorhaben des Teilprojekts 02NUK008B in sehr enger Abstimmung durchgeführt.

02NUK008A: Zusammenarbeit mit der am Projekt "Biomedizinische Bildgebung" als Partner beteiligten Forschergruppe des Instituts für Strahlenschutz am Helmholtz Zentrum München zur Bestimmung der charakteristischen Filterkurven von konventionellen CT-Systemen (Vermessung der gefilterten Röntgenspektren/der Strahlenformfilter mittels Compton-Spektrometer).

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Einstellung von wissenschaftlichem Personal (Doktorand/in) auf die im Rahmen des Forschungsvorhabens über 3 Jahre finanzierte Doktorandenstelle.
- AP2: Teilnahme an und Vorträge im Rahmen von Projekttreffen des Verbundprojekts: "Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen".
- AP3: Bestimmung des aktuellen Stands wissenschaftlicher Forschung auf dem Gebiet der Computersimulation der CT, speziell im Hinblick auf CT-Dosisverteilungen sowie auf dem Gebiet der Dosimetrie und dosimetrischer Messvorrichtungen in Hinblick auf die CT.
- AP4: Planung der Monte-Carlo Computersimulation zur Bestimmung von Dosisverteilungen von CT-Untersuchungen; Aufsetzen einer Simulationsumgebung für die Monte-Carlo Simulation und eines Softwarepaketes zur Datenanalyse.
- AP5: Messung der Strahlenexposition von Standardprotokollen für Thorax- und Abdomen-CT mittels geometrischer Phantome, Bestimmung von Dosisindizes und Dosislängenprodukten an allen zur Verfügung stehenden klinischen CT Scannern.
- AP6: Messung der Strahlenexposition von Standardprotokollen für Thorax- und Abdomen-CT mittels anthropomorpher Phantome (z. B. Alderson RANDO) und Thermolumineszenzdosimetern (TLD) an allen zur Verfügung stehenden klinischen CT Scannern; nachfolgend Erstellung dreidimensionaler Dosiskarten.
- AP7: Messung der Strahlenexposition für dosisreduzierte sowie 3D dosismodulierte CT an allen zur Verfügung stehenden klinischen CT Scannern in Abhängigkeit von deren technisch gegebenen Möglichkeiten, nachfolgend Erstellung dreidimensionaler Dosiskarten.

- AP8: Monte-Carlo Simulationen von Dosisverteilungen von Thorax- und Abdomen-CT und dosisreduzierter CT in virtuellen Geometrien; Validierung und Vergleich von Simulations- und Phantommessergebnissen.
- AP9: Test der Ergebnisse der Phantomeexperimente und der Computersimulationen in vivo durch Messung der Strahlenexposition von Standard-, dosisreduzierten sowie 3D dosismodulierten Protokollen für Thorax- und Abdomen-CT im Tierexperiment.
- AP10: Korrelation der Ergebnisse von Phantom-, Simulations- und Tierexperimenten mit den Aufnahmeparametern (Scanparameter) sowie eine Analyse des Gesamtergebnisses im Hinblick auf eine weitere Reduktion der Strahlenexposition in der CT, z. B. durch Protokollanpassungen, technische Veränderungen, etc.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Detaillierte Abstimmung & Ausarbeitung eines möglichen Projektbeitrages für einen Folgeantrag zur Fortführung der Arbeit innerhalb des erfolgreichen Projektverbundes.
- AP3: Regelmäßige Aktualisierung der Literaturrecherche; Teilnahme an wissenschaftlichen Konferenzen: IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 29.10.-03.11.2012, Anaheim, CA, USA (Poster Stiller); 98th RSNA, 25.-30.11.2012, Chicago, IL, USA (Vortrag Stiller).
- AP5: Einreichung eines Konferenzabstracts & Erstellung eines Manuskripts zum Vgl. von Bildqualität & Dosisparpotential eines neuen CT-Detektorkonzepts (hochintegrierte Verstärker- & Ausleseelektronik) mit dem momentanem Standarddetektorkonzept. Rauschreduktion durch neues Detektorkonzept um bis zu 35 % bzw. Dosisreduktionspotential von ca. 50 %.
- AP7/9: Abschluss quant. & qual. Auswertung (statistische Aufarbeitung) der Patientenstudie zum Dosisreduktionspotential it. CT-Bildrekonstruktion f. d. Thorax-CT beim Patienten-Follow-up; Vorbereitung & Einreichung d. entsprechenden Ethikantrags zwecks Ergebnisverwertung (Publikation). It. Rekon. ist Standardverfahren überlegen bzw. ermöglicht Dosisreduktion von 50-75 % bei Thorax-CT.
- AP8/10: Simulation v. CT-Dosisverteilungen in elliptischen Scanobjekten unterschiedlicher Halbachsenlängen mit objektformspezifischen Strahlfiltern f. Gantrywinkel a.p. bis lateral. Analyse möglicher Dosishomogenisierung & -sparpotential objektformspez. dynamischer Strahlfilter. Dyn. CT-Strahlfilter homogenisieren 3D-Dosisverteilungen & könnten Strahlenexposition d. Patienten 25-45 % reduzieren. Zusammenschrift & Abgabe der Dissertation von Frau Veloza.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Abgeschlossen.
- AP2: Einreichung eines Folgeantrags zur Fortführung der Arbeit innerhalb des erfolgreichen Projektverbundes. Ansonsten abgeschlossen.
- AP3/4: Auch über Projektlaufzeit hinaus Beobachtung d. aktuellen Stands d. wiss. Forschung sowie Konferenzteilnahmen/-beiträge; Weiterentwicklung MC-Computersimulation der CT. Ansonsten abgeschlossen.
- AP5: Einreichung einer Publikation (European Radiology in KW 19, vgl. 3. „zu 5.“, s. o.) nach Einarbeitung der Kommentare der Koautoren. Ansonsten abgeschlossen.
- AP6: Aufgrund veränderter Schwerpunktsetzung innerhalb der Projektlaufzeit nicht weiter verfolgt/abgeschlossen. Weiterbearbeitung/Wiederaufnahme bzw. zahlreiche mögl. Anschlussarbeiten.
- AP7/9: Einreichung entsprechender Konferenzabstracts & je einer Publikation pro Tier-/Patientenstudie z. Dosisreduktionspotential iterativer CT-Bildrekonstruktion. Ansonsten abgeschlossen; zahlreiche mögliche Anschlussarbeiten.
- AP8/10: Publikation von insgesamt 3 Manuskripten zur MC-Simulation (1) & math. Modellierung der statischen (2) sowie zum math. Modell der dynamischen (3) Strahlformfilterung in der CT. Ansonsten abgeschlossen; Vielzahl an möglichen & hochgradig interessanten Anschlussarbeiten.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Doktorarbeiten (Promotion zum Dr. sc. hum.):

Veloza, S. "Experimental Dosimetry and Simulation of Computed Tomography Radiation Exposure: Approached for Dose Reduction." Medizinische Fakultät der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Eingereicht November 2012, erfolgreich verteidigt & abgeschlossen 27.02.2013.

Proceeding Papers:

Stiller, W.; Veloza, S.; Kauczor, H.-U.: "Attenuation-Based Dynamic CT Beam-Shaping Filtration in Dependence of Fan and Projection Angle: Evaluation of a New Method for Radiation Exposure Reduction by Monte-Carlo Simulation of Spatial Dose Distribution." In: Yu, B. Ed., 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), 2012, p. 2625-2632.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 159.922,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Breustedt	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Arbeitspaket 3.2 „Zähleffizienzkalibrierung von *in vivo* Messsystemen mit probandenadaptierten anthropomorphen Modellen“ sollen bereits existierende, segmentierte Voxelmolelle des menschlichen Körpers an die Körperproportionen eines Individuums angepasst werden. Voxelmolelle werden grundsätzlich bei der Kalibrierung von Ganz- bzw. Teilkörpermesssystemen eingesetzt, um die Zähleffizienz für das jeweilige System numerisch zu ermitteln. Ziel hier ist letztendlich eine verbesserte Wirkungsgradkalibrierung für Teilkörperzähler und eine damit verbundene optimierte Dosisabschätzung für den individuell exponierten Probanden.

Eine Zusammenarbeit mit Partnern des Helmholtz Zentrum München (s. Arbeitspaket 3.3) wird bei der Bearbeitung der genannten Aspekte erfolgen. Eine darüber hinausgehende nationale und internationale Vernetzung entsteht durch die Teilnahme an Workshops (z. B. EURADOS) und Konferenzen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Arbeitspaket 3.2 ist in vier Teilschritte unterteilt:

- Ermittlung von Zähleffizienz-sensitiven, anthropometrischen Parametern (z. B. Gewicht, Größe, Brustwandstärke, Lungenvolumen) an Probanden und deren routinetaugliche Erfassung.
- Entwicklung und Anwendung von Techniken zur Erstellung von individuellen Voxelmolellen anhand der ermittelten anthropometrischen Parameter und Prüfung des Einsatzes von alternativen Repräsentationstechniken (z. B. Polygonnetze, implizite Oberflächen) für Körpermolelle.
- Entwicklung und Anwendung von Algorithmen zur Bestimmung der anthropometrischen Parameter an den erstellten Voxelmolellen.
- Erstellung einer routinetauglichen Datenbank mit auf anthropometrischen Parametern basierenden Zähleffizienzen bei niederenergetischen Photonenstrahlern (z. B. Am-241, U-235) für *in vivo* Messsysteme.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Die Entwicklung des Softwarewerkzeugs Voxel2MCNP zur Modellierung, Simulation und Auswertung von generischen Strahlentransportszenarien wurde fortgesetzt.  
Ergebnis: Der bereits entwickelte Algorithmus zur Bestimmung der Brustwandstärke an Phantomen in Abhängigkeit von der Detektorposition wurde integriert und das Datenmodell mit entsprechenden Massenschwächungskoeffizienten erweitert. Weiterhin wurde ein Modul zur Integration von Emissionswahrscheinlichkeiten von Radionukliden aus dem weit verbreiteten Dateiformat ENSDF erstellt. Der Import von Simulationsergebnissen des Strahlentransportwerkzeugs MCNPX und deren Auswertung sind nun auch durch ein entsprechendes Modul möglich.
- Die entwickelte Methodik zur Zähleffizienzkalibrierung mit Voxel2MCNP wurde im Rahmen der EURADOS <sup>241</sup>Am Skull Intercomparison und einer Diplomarbeit zum JAERI-Phantom und der Messung von Gewebeproben getestet.  
Ergebnis: Die Methodik erlaubt eine genaue Rekonstruktion von Messungen am KIT-Teilkörperzähler mit verschiedenen Phantomen in unterschiedlichen Messkonfigurationen.
- Als Datengrundlage für die zu erstellende Zähleffizienzdatenbank wurden weitere Simulationen und Berechnung an der XCAT-Phantomserie durchgeführt.  
Ergebnis: Für insgesamt 30 Phantome wurden Kalibrierparameter für Lunge und Leber in der Standardmesskonfiguration des KIT-Teilkörperzählers bestimmt. Weiterhin wurden jeweils 23 verschiedene anthropometrische Parametern berechnet.
- Basierend auf den generierten Daten wurde eine erste statistische Analyse durchgeführt, die den Zusammenhang zwischen einzelnen Parametern und der Zähleffizienz in Abhängigkeit von Quellorgan und Photonenenergie untersucht.  
Ergebnis: Neben der erwarteten Korrelation mit der Brustwandstärke konnte kein herausragender Prädiktor für Lungenmessungen gefunden werden. Das Körpergewicht scheint ein guter Prädiktor für Lebermessungen zu sein, ist jedoch selbst auch stark mit dem Brustumfang korreliert. Eine Verringerung der Photonenenergie erhöht generell die Sensitivität der Parameter.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Zur Erstellung der Zähleffizienzdatenbank werden weitere statistische Analysen durchgeführt werden, um den Zusammenhang von anthropometrischen Parametern und Zähleffizienz zu quantifizieren.
- Sensitivitätsanalysen sollen eine Einordnung von bei der Modellierung getroffenen Annahmen ermöglichen (z. B. bezüglich der Genauigkeit bei der Detektorpositionierung im Routinebetrieb).
- Für die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner am HMGU ist eine Übertragung der entwickelten Methodik für Leber- und Lungenmessungen auf Knochenmessungen am Kopf geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Pölz, S., Breustedt, B., Urban, M., 2012. Numerische Zähleffizienzkalibrierung von Teilkörperzählern mit probandenadaptierten anthropomorphen Phantomen. 79. Sitzung des Arbeitskreises Inkorporationsüberwachung. Karlsruhe, 17.-21. September 2012.

Pölz, S., Breustedt, B., 2012. Numerical Efficiency Calibration of Partial Body Counters Using Anthropomorphic Phantoms. Workshop des Kompetenzverbands Strahlung und Umwelt 2. Jena, 8.-9. Oktober 2012.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Oberschleißheim		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.937.835,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Tschiersch	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zum Erhalt und Weiterentwicklung der Kompetenz in der Strahlenforschung sollen im Rahmen des Verbundprojekts Strahlung und Umwelt II in neun Arbeitspaketen Nachwuchs-kräfte ausgebildet und neue Erkenntnisse auf folgenden Gebieten erarbeitet werden: Ausbreitung von Radionukliden in Luft, Wasser und Boden, Transport von Radionukliden in Pflanzen, Validierung biokinetischer Stoffwechselmodelle und Strahlenbelastung durch natürliche Radionuklide. Intensive interne und Zusammenarbeiten mit den Verbundpartnern Universität Bremen, Leibniz Universität Hannover, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Karlsruher Institut für Technologie und VKTA Rossendorf ist bereits in den Programmen der jeweiligen Arbeitspakete festgelegt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm ist in neun Arbeitspakete (AP) gegliedert. In AP3.4 werden die experimentellen Ergebnisse der übrigen AP hinsichtlich der Dosisabschätzung modelliert. Im Einzelnen haben die APs folgende Themen:

- AP1.1: Modellierung des Verbleibs von Radionukliden in städtischer Umgebung und der resultierenden Exposition (Kaiser)
- AP1.3: Radioökologie bei Schnee (Tschiersch)
- AP2.3: Mechanismen der Blattaufnahme von Radionukliden in Pflanzengewebe (Kanter)
- AP3.1: verbesserte Abschätzung der internen Dosis nach Inkorporation natürlicher Radionuklide aus Böden mit Hilfe von Modellstudien mit Heilerde (Höllriegl, Oeh)
- AP3.3: Pobandenspezifische Kalibrierung des HMGU Teilkörperzählers (Rühm)
- AP3.4: Biokinetische Modellierung und interne Dosisabschätzung auf der Basis experimenteller Messdaten (Li, Oeh)
- AP4.1: Aufnahme und Ausscheidung von Ra-226, Pb-210, Ra228 und Th-228 an NORM/TENORM-Arbeitsplätzen (Shinonaga)
- AP4.2: Entwicklung von aktiven Detektoren zur Bestimmung individueller Radon- und Thoronexpositionen (Rühm)
- AP4.3: Innenraumexposition durch Thoron (Tschiersch)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

*AP1.1:* Es wurde eine automatisierte Routine zur akkuraten Berechnung der Gammadosisrate aus geographischen Umgebungskarten entwickelt, ein Fallbeispiel studiert und die Ergebnisse in einem Artikel zusammengefasst. Die Routine wurde im Folgenden an die Messdaten der Gammadosisraten aus

Fukushima, Japan angepasst. Ein Datensatz mit etwa 2500 Messungen wurde vom BfS zur Verfügung gestellt und die entsprechenden Landnutzungskarten beschafft, in denen die Messdaten dargestellt werden sollen.

*AP1.3:* Die experimentellen Einrichtungen im Zugspitz-Labor wurden optimiert, um auch größere Niederschlagsmengen sammeln zu können. Schneeprobenahme, Messungen der Schnee- und meteorologischen Parameter sowie die  $\gamma$ -spektrometrischen Messungen wurden weitergeführt. Erste Tests zur  $\gamma$ -spektrometrischen Aktivitätsbestimmung der partikelgrößen-fraktionierten Aerosole wurden durchgeführt.

*AP2.3:* Die Laborversuche wurden vorbereitet und mit den zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen abgesprochen.

*AP3.1:* Weitere Probandenuntersuchungen wurden durchgeführt. In vitro-Löslichkeitsstudien mit  $^{238}\text{U}$ -kontaminierter Erde bzw.  $^{238}\text{U}$ -haltigem Phosphatdünger wurden gestartet; die Messungen und Auswertungen stehen teils noch aus. Mittels des Uran-Modells wurde eine erste Dosisabschätzung durchgeführt.

*AP3.3:* Die Implementierung des Voxel-Phantoms eines mit  $^{241}\text{Am}$  kontaminierten menschlichen Schädels, wurde in GEANT4 erfolgreich durchgeführt. Die unter Verwendung des Voxelphantoms mit GEANT4 und MCNP simulierten Ansprechvermögen des Teilkörper-zählers wichen bei 59,54 keV um weniger als 2 % voneinander ab. Ein Vergleich dieser Rechnungen mit Messungen ergab Abweichungen von ca. 10 %, was unter Berücksichtigung der mit Messung und Simulation verbundenen Unsicherheiten (Positionierung, Materialzusammensetzung des Phantoms, etc.) zu erwarten ist.

*AP3.4:* Um die Strahlenexposition aus Thorongas und dessen Folgeprodukte für Jugendliche zu bestimmen (in Kooperation mit AP4.3) wurden die Dosiskoeffizienten für  $^{220}\text{Rn}$  und dessen Folgeprodukte bei zwei Altersgruppen (10 und 15 Jahre) berechnet.

*AP4.1:* Das erste Experiment zur Exposition von Reinigungsarbeiter wurde im VKTA durchgeführt. Gleichzeitig wurden  $^{222}\text{Rn}$  Hintergrundmessungen vor Ort durchgeführt und ausgewertet (in Kooperation mit AP4.2). Die analytische Methodenentwicklung mit Standard-Referenzmaterialien wurde weiter geführt. Die Analyse der Lebensmittel, die für die Reinigungsarbeiter und Referenzpersonen besorgt wurden, ist angefangen worden. Erste Ergebnisse liegen vor.

*AP4.2:* In einem ersten Feldversuch wurde der neue Exposimeter-Prototyp in einem Fachwerkhaus in Leimbauweise in Steinfeld zur Thoron und Radon Messung eingesetzt. Derzeit wird eine Evaluierungsmethode für die gewonnen Messdaten erarbeitet. Des Weiteren wurden die Radon-Exposimeter in einem Salzbergwerk getestet, in dem auch eine erhöhte Radon Konzentration festgestellt werden konnte. Dadurch konnte die Alltagstauglichkeit erprobt werden. Für weitere Feldtests wurden 30 neue Platinen und 60 Detektoren geordert.

*AP4.3:* Für die Untersuchung des Einflusses der mineralogischen Eigenschaften auf die Thoron-Exhalation aus Lehm wurde die spezifische Aktivität von Thorium-232 in ca. dreißig verschiedenen Tonmineralen bestimmt. Zur Messung der Thoron-Exposition in Wohnhäusern wurden passive Messgeräte für Thoron und seine Zerfallsprodukte in acht Wohnhäusern mit Lehm als Baumaterial aufgestellt. In einem Fachwerkhaus fand außerdem eine zweiwöchige Messkampagne statt.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Arbeitspakete werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans weiter abgearbeitet. Beim letzten Workshop des Verbundes am 8./9. Oktober 2012 in Jena wurden weitere Zusammenarbeiten der Verbundpartner konkretisiert.

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 324.816,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kothe	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel der Arbeiten ist die Darstellung der Prozesse, die SM/R über den Wasserpfad aus dem kontaminierten Substrat bis in Pflanzen und die Nahrungskette bringen. Dazu werden Modelle herangezogen, die eine Quantifizierung von SM/R erlauben. Pflanzen des Testgebiets von Standorten mit jungen geochemischen Barrieren in Oberflächennähe werden chemisch charakterisiert um den Einfluss der räumlichen Verteilung auf den Transport von SM/R in die Pflanze zu untersuchen.

Da Schwermetalle und radioaktive Elemente auch die Diversität und Rate der Mykorrhizierung beeinflussen könnten, wird die Adaptation und Konkurrenzfähigkeit ausgewählter Pilze auf SM/R-belastetem Substrat untersucht. Labor- und Topfversuche unter Zusatz von Cd, Pb und Ni sowie Cs und Sr mit Kiefern- und Fichtenkeimlingen werden genutzt, um die Pilze auf ihren Effekt zur Steigerung des pflanzlichen Wachstums zu testen. Zusammenarbeiten mit den Forschungszentren Dresden-Rossendorf und Jülich sowie dem Helmholtzzentrum München sind geplant.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Modellierung und Quantifizierung des Transfers von SM/R in Pflanzen
- Adaptation ausgewählter Pilze an Substrate mit Cs, Pb, Ni, Cs und Sr
- ICP-MS Kartierung von Pilzen von belasteten Standorten
- Einfluss von Siderophoren in Mikrokosmen
- Genexpressionsmuster unter SM/R-Stress bei Pilzen
- Identifizierung von Resistenzgenen in Modellorganismen
- $^{58}\text{Ni}/^{63}\text{Ni}$ -Isotopie zur Unterscheidung von Schwermetall- von Isotopentoxizität
- Molekularbiologische Antwort des Pilzes auf Stressoren

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im zweiten Halbjahr 2012 wurden Mesokosmen zur Untersuchung der Wirkung von Bakterien- und Ectomycorrhizapilzinokulation auf die Aufnahme von Schwermetallen und Radioisotopen weitergeführt. Dazu wurden Boden- und Wasserproben entnommen und analysiert. Die Detailuntersuchungen an 10 verschiedenen Standorten sowie an sieben verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlichen Alters wurden abgeschlossen. Mit ihnen ist es möglich, eine

zeitliche Veränderung der Anreicherung von Radionukliden in den Pflanzenkompartimenten (Wurzel, Stängel, Blatt) aufzulösen. Die unterschiedliche Einlagerung von SM/RN in Pilzfruchtkörper-Teilen wird weiter untersucht, um unterschiedliche Mechanismen der Aufnahme, des Transports und der Einlagerung zu identifizieren. Durch Einsatz von stabilen vs. radioaktiven Cs-Isotopen wurden in Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf Transkriptomdaten erhoben, die nun im Winterhalbjahr ausgewertet werden. Daneben wurde die Veränderung der Bioverfügbarkeit von Metallen im Boden durch Mikroorganismen und die Wirkung von Siderophoren auf andere Mikroben untersucht. Zudem werden SM/R in unterschiedlichen Pilzen getestet, um dort ähnliche Mechanismen zu zeigen. Diese Arbeiten werden sowohl mit Ektomykorrhizapilzen als auch mit Saprophyten und Weißfäuleerregern durchgeführt. Damit können Rückschlüsse auf die für alle Pilze typischen Reaktionen gezogen werden.

In Zusammenarbeit mit der Wismut GmbH wurden vier flutungsbedingte Vernässungsgebiete im Hinblick auf den Schwermetall- und Radionuklidgehalt in Boden, Porenwasser und Pflanzen untersucht. Die Porenwassergehalte spiegeln die Flutungswasserkontamination und damit veränderte Schwermetallkonzentrationen im Wurzelraum wieder.

#### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Modellierung des Transfers von SM/R in biogeochemischen Barrieren
- Modellierung des Transfers in Pflanzen und Pilzen
- Mesokosmen mit standorttypischen Pflanzen belasteter Standorte
- Transkriptomdaten-Auswertungen zu Pilzen auf stabilen/strahlenden Cs-Isotopen
- Einfluss von Siderophoren auf Mikrobenpopulationen und Pflanzen
- Weitere molekularbiologische Analyse des Pilzes auf Stressoren
- Porenwassergewinnung an den Untersuchungsstandorten

#### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Raudaskoski M., Kothe E., Fowler T.J., Jung E.M., Horton J.S. (2012): Ras and Rho small G proteins: insights from the *Schizophyllum commune* genome sequence and comparisons to other fungi. *Biotechnol Genet Eng Rev.* 28, 61-100.

Erdmann S., Freihorst D., Raudaskoski M., Schmidt-Heck W., Jung E.M., Senftleben D., Kothe E. 2012: Transcriptome and functional analysis: Mating in the basidiomycete *Schizophyllum commune*. *Eukaryot Cell* 11: 571-589.

Goldammer J. (2012): Einfluss von Schwermetallen auf die Siderophorenproduktion schwermetallresistenter Streptomyceten. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Apel J. (2012): Transformation des Mykorrhizapilzes *Tricholoma vaccinum*. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Dressler C. (2012): Nickel-Superoxid-Dismutase und ihr Einfluss auf die Schwermetallresistenz. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Prätzsch D. (2012): Proteomanalyse von *Streptomyces mirabilis* P16B-1 unter Nickelstress. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Löbner, W. (2012): Untersuchung von Grasproben aus flutungsbedingten Vernässungsgebieten am Standort Ronneburg der Wismut GmbH. Wismut.Bericht WIS-R494/1. Berichtszeitraum: 1.7.2011 bis 31.12.2011

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 430.874,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Riebe	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundprojektes „Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen“ wird im vorliegenden Arbeitspaket eine bundesweite Bilanzierung der vorhandenen Iod-Inventare in der Pedosphäre (Bodenproben) sowie eine Erfassung der atmosphärischen Einträge (Luftfilter, Niederschläge) von Iod-129 und I-127 angestrebt. Dabei werden Depositionsraten, Depositionsdichten und der Transport mit Oberflächenwasser untersucht werden. Basierend auf dem Förderkonzept "Grundlegende FuE-Arbeiten in der nuklearen Sicherheits- und Entsorgungsforschung zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und zum Kompetenzerhalt" des BMBF bietet es die Möglichkeit zur Ausbildung qualifizierten Nachwuchses in der Radioökologie und eröffnet aufgrund der Relevanz für die Beurteilung von radioaktiven Altlasten und auch im Hinblick auf Fragen der Langzeitauswirkungen von Endlagern radioaktiver Abfälle Zukunftsperspektiven für Nachwuchswissenschaftler.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Organisation der Probenahme (Boden, Gewässer, trockene Deposition)
- AP2: Entnahme von Bodenproben (unterschiedliche Bodentypen und Nutzung)
- AP3: Entnahme von Gewässerproben (Niederschläge bzw. Proben von Fließgewässern)
- AP4: Erfassung der trockenen Deposition mittels Luftfiltern an repräsentativen Stellen
- AP5: Vorbereitung der Proben für die Analyse
- AP6: AMS / ICP-MS-Messungen zur Bestimmung der I-129 und I-127 Gehalte
- AP7: Auswertung der Messergebnisse

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Die Entnahme von Bodenproben wurde an 6 weiteren Standorten durchgeführt. Entnahmetiefen waren 0-5, 5-10, 10-20 und 30-50 cm.
- AP3: Die Probenahme von Niederschlag durch den Deutschen Wetterdienst wurde weiterhin durchgeführt. Die Probenahme an den Bundeswasserstraßen durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde wurde ebenfalls monatlich fortgesetzt.
- AP4: Die Aerosolsammlung an den vier ausgewählten Standorten wurde fortgesetzt. Da in Braunschweig (PTB), anders als an den anderen Stationen, Polypropylenfilter für die

Aerosolsammlung verwendet werden, wurde dort zum Vergleich in den Monaten Juli und August 2012 zusätzlich ein Iodsammler mit Glasfaserfiltern installiert, um Vergleichsmessungen durchzuführen. Dabei handelte es sich um ein baugleiches System, wie es die anderen Stationen verwenden. Die Proben befinden sich zurzeit in der Analyse.

AP5: Die Boden- und die Wasserproben wurden weiterhin mit den üblichen Verfahren vorbereitet. Die Filterproben wurden weiterhin mit einer Extraktion durch Chloroform bearbeitet.

AP6: Es wurden an der ICP-MS bisher 53 Bodenproben, 79 Filterproben und 201 Wasserproben sowie 6 Schneeproben und an der AMS 83 Bodenproben, 103 Filterproben und 319 Wasserproben sowie 8 Schneeproben gemessen. Weitere ICP-MS Messungen werden zurzeit durchgeführt, die nächsten Messungen an der AMS werden im Frühjahr erfolgen.

AP7: Bei den Niederschlagsproben lässt sich ein deutliches Nord-Süd bzw. West-Ost-Gefälle feststellen. Die höchsten Werte für das Isotopenverhältnis fanden sich auf Norderney mit bis zu  $987 \cdot 10^{-9}$ , die niedrigsten in Lahr mit maximal  $196 \cdot 10^{-9}$ , in Essen ließen sich Isotopenverhältnisse bis zu  $520 \cdot 10^{-9}$  messen, in Görlitz dagegen nur maximal  $259 \cdot 10^{-9}$ . Deutlich wird dieser Trend auch in den mit Hilfe der Niederschlagswerte berechneten Depositionsdichten. Hier ergaben sich der höchste Wert wiederum für Norderney ( $1136 \text{ pg/m}^2$ ) und der niedrigste Wert für Nürnberg und München (beide  $56 \text{ pg/m}^2$ ).

Bei den gemessenen Schneeproben zeigten sich sehr große Unterschiede in den  $^{129}\text{I}$  Gehalten (zwischen 39 und  $2529 \text{ fg/kg}$ ), die Gehalte an stabilem Iod waren dagegen alle recht ähnlich (0,5 bis  $2 \text{ ng/g}$ ). Die Isotopenverhältnisse lagen zwischen  $10 \cdot 10^{-9}$  und  $3733 \cdot 10^{-9}$ .

Die Messungen der Aerosolfilterproben ergaben für die Proben aus Norddeutschland die höchsten Isotopenverhältnisse, sie lagen zwischen  $132 \cdot 10^{-9}$  und  $685 \cdot 10^{-9}$ . Die niedrigsten Werte fanden sich wie erwartet im Süden ( $17 \cdot 10^{-9}$  bis  $146 \cdot 10^{-9}$ ).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Weitere Bodenprobenahmen sind für April bis Juni 2013 geplant. Parallel zu den  $^{127}\text{I}$ - und  $^{129}\text{I}$ -Bestimmung sollen weiterhin entsprechende bodenkundliche Parameter (pH, Corg, Gehalt an Fe-, Al-, Mn-oxiden, Korngrößenanalyse) untersucht werden.
- Weiterhin werden Niederschlag, Aerosolproben und Flusswasser bis März 2013 gesammelt.
- Bereits gesammelte Proben werden für die Analyse vorbereitet.
- Die Messungen an der ICP-MS und der AMS und deren Auswertung werden fortgesetzt

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

3 Posterbeiträge bei der NRC 8 in Como 2012.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, Leo-Brandt-Straße, 52428 Jülich		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 140.493,20 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Burauel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Forschungsprojekt "Strahlenschutz und Umwelt: RN in der Umwelt, ihren Transport in die Lebensmittel-Kette, deren Biocinetics im Menschen" ist in vier Projekte unterteilt. Das Projekt 2 konzentriert sich auf "Prozesse an der Schnittstellen Pflanzen-Mikroben und der Transport von RN in Pflanzen und in die Nahrungskette. Das Projekt 2 ist weiter in vier Arbeitspakete verteilt. Work Package 2.1 ist unter dem Titel "Einfluss von Biofilmen auf das Migrationsverhalten von Uran und Americium in der Umwelt" und der Fokus der Work Package 2.2 ist "Mikrobielle Prozesse der Mobilisierung und Immobilisierung (von Schwermetallen) im Boden." Arbeitspaket 2.3 befasst sich mit der "Mechanismen der Blattaufnahme von Radionukliden in Pflanzengewebe". Und das Arbeitspaket 2.4 von Agrosphäre (IBG-3) des Forschungszentrums Jülich beteiligt sich mit dem Titel "Verfügbarkeit von Radionukliden in Böden – Effekte von Bodenmanagement und Klimawandel". Dieses Arbeitspaket berücksichtigt die nachhaltige Nutzung der Böden für die Nahrungs- und Futterproduktion. Um dieser neuen Herausforderung zu überwinden und die wachsenden Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit Anforderungen als Folge der steigenden Bevölkerung gerecht zu werden, bedarf es für den Boden-Management-Systeme zu verbessern.

Es wird das Verhalten der Radionuklide (RN, z. B. Cs-134, Cs-137 oder Sr-90, Sr-85) in Bodensystemen desselben Typs mit unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung untersucht. Eine bodenschonende Minimierung der Bodenbearbeitung wird dazu beitragen, dass Bodenverlust durch Erosion reduziert wird. Eine solche Bodenbearbeitung in Kombination mit der Anwendung von Mulch verändert die Eigenschaften der organischen Substanz des Bodens sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen/Radionukliden. Darüber hinaus sind extreme Wetterbedingungen auf Grund des Klimawandels zu erwarten. Extreme Feuchtwechsel werden die natürlichen Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe verändern und sich so in noch unbekannter Weise auf die Mobilisierung von Radionukliden in der Bodenmatrix auswirken.

Eine Vernetzung mit dem Arbeitspaket *Microbial Processes of Sequestration and Mobilization in Soil* (Prof. Kothe, Jena) ist vorgesehen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

In diesem Arbeitspaket wird das Verhalten ausgewählter Radionuklide in verschiedenen Bodenbewirtschaftungssystemen im Hinblick auf Zugänglichkeit, Transport und Pflanzenaufnahme beleuchtet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

The instrumentation and sealing of the two lysimeters has been completed. The lysimeters are placed back into the lysimeter station. The sensors have been re-installed and configured and are ready for continuous data monitoring (temperature, water content). To avoid huge sample preparation with regard to separation into single nuclides before activity measurement when both radionuclides (Cs-137, Sr-90) are applied together, each lysimeter is designated for just one radionuclide, keeping one half for the organic amendment and the second half as control. For this purpose a metallic plate (45 cm long, 4 mm thick) has been inserted in each lysimeter. It reaches a depth of about 35 cm, dividing the lysimeter top soil into two parts. The digestate application has already been completed. For this, the top 5 cm soil from the one half (the designated portion for organic amendment) was removed from each lysimeter, mixed with digestate in a concrete mixer and spread back onto the lysimeter surface for equilibration over several months. The second half of each lysimeter was just ploughed to a depth of 15 cm but no organic amendment was made in this portion. A similar procedure will be adopted later for radionuclides application to lysimeter soils; however the radionuclides will be applied in both halves of each lysimeter.

After intensive training and practice for handling high activities (MBq), the original radionuclide solutions were transferred to new vials and diluted in several steps; from the last step activity measurements were made. The two agricultural soils (clay and sand), incubated at room temperature with different application rates of biochar and digestate are now ready to start a sorption/desorption experiment. A third, forest- soil with high organic carbon content (without amendment) will also be part of this sorption study. The lab scale experiment tackling three different soils will be started directly after the application of radionuclides onto the lysimeters.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Preparation of protective shielding around lysimeters to avoid contamination of surroundings by radiotracers (Cs-137, Sr-90).
- Sowing of seasonal crop in Feb, 2013 (summer wheat) for the determination of transfer factors (TFs) of Cs-137, Sr-90.
- Application of radionuclides to lysimeter soils in Feb, 2013.
- Application of conservative water tracer (Potassium Bromide) on lysimeter soils to study the water movement in soil directly after the application of the radionuclides.
- Recording of environmental parameters data (temperature, water content) for lysimeters through installed sensors (Temperature, TDRs, Tensiometers).
- Sorption/desorption study with soils incubated with biochar and digestate to compare the behavior of radiotracers in mineral soils subjected to organic amendment in contrast to a natural organic soil (forest soil).
- Harvesting of crop and radioactivity measurement in plants and soil to calculate transfer factors (TFs).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 351.591,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Arnold	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der vorgeschlagene Kompetenzverbund „Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen“ hat zum Ziel das Wissen und die Kompetenz auf dem Gebiet der Radioökologie zu erhöhen. Dazu ist multidisziplinäre Zusammenarbeit zu organisieren, um die verschiedenen Aspekte von der Ausbreitung in Luft, Wasser und Boden, des Transfers an Grenzflächen in biologisches Material und in die Nahrungskette und bis hin zur Biokinetik der Radionuklide im Menschen zu einem Gesamtbild zusammenzufügen. Es ist beabsichtigt, die in der ersten Förderrunde begonnene Kooperation zwischen Einrichtungen der Helmholtzgemeinschaft und Universitäten fortzusetzen und durch verstärkte Vernetzung zu intensivieren.

Neben der Organisation exzellenter Wissenschaft im Verbund hat das Vorhaben zum Ziel, Doktoranden und Nachwuchswissenschaftlern an die Gebiete der Radioökologie und Strahlenforschung heranzuführen und für sie ein herausforderndes Tätigkeitsfeld zu öffnen. Der naturwissenschaftliche Nachwuchs soll eine gründliche Ausbildung in den Disziplinen erhalten, die wesentlich für das interdisziplinäre Feld der Radioökologie sind. Das Vorhaben soll in vernetzten Einzelprojekten offene Fragen der Radioökologie bearbeiten, um das Wissen in der Strahlenforschung auszubauen und die Kompetenz in diesem Gebiet durch gezielte Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs zu erhalten. Das Vorhaben ist thematisch in vier Teilprojekte gegliedert, wobei das hier vorliegende im Teilprojekt zwei „Mikrobiologische Prozesse an der Schnittstelle Pflanzen - Boden und der Transport von Radionukliden in Pflanzen und in die Nahrungskette“ angesiedelt ist. Das Institut für Ressourcenökologie (vorm.: Institut für Radiochemie) des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf bearbeitet innerhalb des Teilprojekts 2 das Arbeitspaket „Einfluss von Biofilmen auf das Migrationsverhalten von Uran, Americium und Europium in der Umwelt“. Die Projektarbeiten erfordern den sensitiven Umgang mit  $\alpha$ -strahlenden Radionukliden in Strahlenschutzkontrollbereichen. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit wird durch die Verbindung von mikrobiologischen und radiochemischen Arbeitsmethoden realisiert.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Bestimmung der anorganischen und organischen Zusammensetzung der Lösungen in und um Biofilme.
- EPS Analytik: Bestimmung des Einflusses der EPS auf die Immobilisierung von Actiniden in Biofilmen.
- Mikrobielle Diversität: Ermittlung der mikrobiellen Diversität in den Biofilmproben.
- Bestimmung geochemischer Parameter (pH,  $E_h$ , gelöste  $O_2$  Konz.) und Gradienten innerhalb der Biofilme.
- Speziationsrechnungen: Ermittlung der theoretischen Speziation innerhalb und außerhalb der Biofilme.
- Konfokales Laser Scanning Mikroskop (CLSM): Visualisierung struktureller Biofilmkomponenten
- Elektronenmikroskopie: Wechselwirkungen zwischen EPS Komponenten und Actiniden.
- Dokumentation: Technische Berichte, Zwischenberichte, Abschlussberichte

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Für die Strukturuntersuchung der nächsten atomaren Nachbarschaft verschiedener fluoreszierender radioaktiver Schwermetallionen wie U(VI) ist die zeitaufgelöste Laserfluoreszenzspektrometrie ein immer wichtiger werdendes Werkzeug. Werden derartige Untersuchungen radioaktiver Schwermetallionen in organischer Matrix biologischer Proben angestrebt, so stört dabei häufig die kurzlebige, jedoch sehr intensive Fluoreszenz organischer Stoffe. Im Rahmen dieses Projektes soll an der Verfeinerung eines Messsystems zur Erfassung der Fluoreszenz radioaktiver Schwermetallionen in organischer Matrix gearbeitet werden. Dazu wurde ein 80-MHz-Laserstrahl eines MaiTai-Lasers in einen quasi gepulsten Strahl umgewandelt, indem der aus dem Laser tretende Strahl alternierend in einer Frequenz von 100 kHz für je 2  $\mu$ s praktisch zur Probe hin gebeugt wurde. Dies geschieht mittels eines über ein Piezoelement in Schwingung versetzten  $TeO_2$ -Kristall, durch den der Laserstrahl geht und der in diesem in Folge der alternierenden Kristallschwingung seine Beugung erfährt. Die zeitliche Präzision der dadurch erreichten, „quasi“-gepulsten Laserstrahlung wurde mittels einer an ein Oszilloskop angeschlossenen Photodiode kontrolliert,

und kann über Delay-Generatoren variiert werden. Durch anschließende Frequenz-verdreifachung oder -verdopplung mit optischen Aufbauten (Harmonixx/APE und Inspire/Newport) steht so ein Wellenlängenbereich von 230-1020 nm zur Verfügung (Lücke bei 340-345 nm; der durchstimmbare Laser selbst bietet 690-1020 nm), mit dem die Probe quasi gepulst angeregt werden kann. Die daraufhin von der Probe ausgehenden Fluoreszenzsignale werden in einer Single Photon Avalanche Diode detektiert und in einem Multi-channel Picosecond Event Timer & TCSPC Module im Verhältnis zur Anregung in ein Histogramm geordnet, welches dann die zeitliche Abklingkurve der Fluoreszenz beschreibt. Auf diese Weise gelang es, die Fluoreszenzlebenszeitkurve von U(VI) Spezies, die sich an der Oberfläche der Protozoen *Euglena Mutabilis* befanden, aufzuzeichnen. Diese Kurve wies anfängliche einen schnell abfallende Fluoreszenz auf, die in eine deutlich langsamer abfallende Fluoreszenz überging. Dies spricht für einen schnell abfallenden Anteil von Fluoreszenz, der von organischen Stoffen hervorgerufen wird sowie einen langsamer abklingenden Fluoreszenzanteil, der von Uranylspezies in und auf *Euglena* Zellen stammt. Für einen biexponentiellen Fluoreszenzabfall, betrug die Lebenszeit der von Organika verursachten Fluoreszenz 35  $\mu$ s, während dessen die des den Uranylspezies zuzuordnenden Fluoreszenzanteils 24  $\mu$ s betrug. Damit gelang an einer *Euglena* Suspension das gleichzeitige Bestimmen von Organika verursachter und von radioaktiven Schwermetallionen verursachter Fluoreszenz.

Das saure Wasser aus der gefluteten Uranmine Königstein wurde hinsichtlich der Zusammensetzung der Mikroorganismen untersucht. Drei verschiedene Systeme zur Gewinnung der Mikroorganismen kamen hierbei zum Einsatz. Zum einen wurde das Grubenwasser filtriert (10L), andererseits wurden die bewachsenen Objektträger aus der Flusszelle und die Träger aus dem *In-situ*-Reaktor zur mikrobiellen Analyse genutzt. Die quantitative Methode zur Bestimmung der Zusammensetzung der Mikroorganismen stellte die CARD-FISH (Catalyzed reporter deposition fluorescence *in-situ* hybridization) dar, bei der ausgewählte Mikroorganismen-Gruppen mit fluoreszenzmarkierten Sonden angefärbt und anteilig zur Gesamtzellzahl ausgezählt wurden. Die Qualität bzw. die Bestimmung der vorkommenden Arten wurde molekularbiologisch durch PCR (Polymerase Ketten Reaktion), Klonierung und (Pyro)-Sequenzierung bestimmt, nachdem die DNA aus der Umweltprobe isoliert wurde. Mittels PCR konnten nachgewiesen werden, dass sowohl in den Wasserproben, als auch auf den Objektträgern der Flusszelle und auf den Reaktor-Trägern Bakterien, Archaea und Eukaryonten vorhanden sind, ähnlich wie in den unter Tage-Biofilmen vor der Flutung der Grube. Die quantitative Analyse der Proben mittels CARD-FISH ergab eine Dominanz der Bakterien von 61-78 % gegenüber Archaea (< 1 %) und Eukaryonten (< 1 %). Die Summe der Abundanzen, ermittelt mit der Bakteriensonde und den Sonden für Archaea und Eukaryonten, sollten theoretisch ca. 100 % hybridisierbare Zellen ergeben. Allerdings konnten nur höchstens 78 % der Bakterien zugeordnet werden. Gründe für die von 100 % abweichenden und geringer ausgefallenen Zahlen sind: Eisenkrusten an den Zellen (verhindern das Anfärben), eine hohe Anzahl an Zell-Clustern (erschwerte Farbstoffpenetration) und einen geringen Anteil an Mikroorganismen, die nicht stoffwechselaktiv bzw. tot waren zu. CARD-FISH Sonden weisen nur Mikroorganismen nach, die vor der Fixierung mindestens gering stoffwechselaktiv waren. Außerdem erfasst die Bakteriensonde auch nicht alle enthaltenen Eubakterien. Auf den Objektträgern der Flusszelle wurde die Gruppe der Bakterien von den Alpha-Proteobakterien mit 66-75 % dominiert. Beta-Proteobakterien machen einen Anteil von 25-39 % aus, gamma-Proteobakterien sind mit 8-16 % vertreten. Die bakteriellen Gruppen Acidobakterien, Actinobakterien, Firmicutes und Delta-Proteobakterien wurden in geringen Anteilen in der Flusszelle gefunden. Die Art *Ferrovum myxofaciens*, die in den Biofilmen vor der Flutung die mikrobielle Gemeinschaft dominierte, war auf den Objektträgern mit einem Anteil von nur 0,75 % vertreten. Im Gegensatz zu den Objektträgern der Flusszelle setzten sich die Filterproben aus 10L Grubenwasser vor allem aus Beta- (37 %) und Gamma-Proteobakterien (37 %) zusammen. Weitere Vertreter im Grubenwasser waren Alpha-Proteobakterien (11 %), Firmicutes (8 %) und Actinobakterien (5 %). Durch die qualitative Analyse der Proben konnten einige Gruppen bis hin zum Arten-Namen beschrieben werden. Hinter der Gruppe der Alpha-Proteobakterien verbergen sich z. B. Rhodoblastus-, Acidocella- und Acidiphilium Spezies. Zu den Beta-Proteobakterien zugehörig wurden *Ferrovum myxofaciens* und Thiomonas Spezies detektiert. *Acidithiobacillus ferrooxidans* und Xanthomonadales konnten den Gamma-Proteobakterien zugeordnet werden. Aus der Gruppe der Firmicutes wurden Bacilli und Clostridia nachgewiesen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Durch RNA-Extraktion aus den Biofilmen und anschließender Sequenzierung der extrahierten Fragmente wird analysiert, welche der Mikroorganismen im Biofilm des Grubenwasser stoffwechselaktiv sind. Die Biofilme im *In-situ*-Reaktor sollen anschließend hinsichtlich der Rückhaltung der Metalle und vorwiegend des Urans analysiert werden. Außerdem soll geprüft werden, ob sich die Zusammensetzung/Chemie des abfließenden Wassers am Reaktor durch die Biofilme ändert.

Da die Ermittlung der Lebenszeit der Fluoreszenzsignale von U(VI) Spezies an organischer Matrix im makroskopischen Maßstab mittels der HydraHarp nun realisiert werden konnte, soll dies nun auch im mikroskopischen Bereich durch Einkopplung der Laseranregung ins Konfokale Mikroskop (CLSM) erreicht werden. Dabei wird das Sammeln und Überleiten der Fluoreszenz in SPAD und HydraHarp eine besondere Herausforderung sein, da die Photonenausbeute aufgrund des minimalen Probenvolumens entsprechend gering sein wird, und daher Verluste an Fluoreszenz auf dem Wege von Präparat zu SPAD weitgehend vermieden werden müssen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Baumann N., Haferburg G., Arnold T. (2013): Uranium contents in plants and mushrooms grown on uranium contaminated site. In preparation for submitting to "Environmental Science and Pollution Research".

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 128, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 247.200,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hampe	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Forschungsthema hat das Ziel die Ausscheidung von Ra-226+, Pb-210++, Ra-228+ und Th-228+ aus dem menschlichen Körper an NORM/TENORM-Arbeitsplätzen detailliert zu untersuchen.

In den Arbeitsfeldern der Geothermie und Erdöl/Erdgasförderung können in den Anlagen Ablagerungen der natürlichen Radionuklide Ra-226+, Pb-210++, Ra-228+ und Th-228+ anfallen (NORM), die bei Reinigungs-, Umbau- und Reparaturarbeiten zu Inkorporationen und damit zu beruflich bedingten Strahlenexpositionen führen können.

An einer Probandengruppe aus den betreffenden Arbeitsfeldern und einer Referenzgruppe nicht exponierter Personen werden nach einem festen Probenahmeprogramm die Ausscheidungsraten für diese Radionuklide untersucht.

Zur Durchführung des Untersuchungsprogramms werden radioanalytische Methoden zur Bestimmung von Ra-226+, Pb-210++, Ra-228+ und Th-228+ in biologischen Materialien (Urin, Stuhl) hinsichtlich der zu erreichenden Nachweisgrenzen ausgewählt und für den Routinebetrieb optimiert.

Das Forschungsvorhaben ist Bestandteil des Arbeitspaketes (AP) 4.1 im Verbundprojekt „Strahlung und Umwelt II“ und wird gemeinsam mit dem Institut für Strahlenschutz (ISS) des HZM bearbeitet, wobei das ISS die Aufnahme der Nuklide mit der Nahrung und dem Wasser untersucht. Weitere Zusammenarbeit innerhalb dieses Verbundprojektes bestehen zu AP3.1 und AP3.4.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben umfasst folgende Teilaufgaben:

- AP1: Um aktuelle und für den Routinebetrieb geeignete Methoden zur Bestimmung von  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$  in Urin und Stuhl zu entwickeln und/oder zu optimieren, ist eine intensive Literaturrecherche durchzuführen.
- AP2: Für die übersichtliche Gestaltung des Probenahmeprogramms ist eine Datenbank für die Verwaltung von Proben und Ergebnissen sowie Fragebögen und Begleitprotokolle für die Probenahme zu entwerfen.
- AP3: Aufbauend auf der Literaturrecherche erfolgt die Entwicklung/Optimierung von radiochemischen Anreicherungs-, Trenn- und Reinigungsverfahren für  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$  aus Urin und Stuhl.
- AP4: Mögliche Probanden aus den Bereichen „Geothermie“ oder „Erdgas/Erdölindustrie“ und eine Referenzgruppe werden für die Teilnahme geworben.
- AP5: Die Probenahme von Urin und Stuhl erfolgt angepasst an die jeweiligen Arbeiten in den unter 4) genannten Bereichen in mehreren Kampagnen.
- AP6: Die Analyse der entsprechenden Radionuklide in Urin und Stuhl erfolgt nach den neu entwickelten/angepassten Methoden. Die Ergebnisse werden in der Datenbank (Punkt 2) verwaltet.
- AP7: Die Ergebnisse werden in einem Abschlussbericht gegenübergestellt sowie die Auswertung und Schlussfolgerungen zusammengefasst.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Literaturrecherche resultierte für  $^{228}\text{Ac}$ , das Tochternuklid von  $^{228}\text{Ra}$ , in der Auswahl zweier Methoden, die einer detaillierteren Untersuchung unterzogen werden, um  $^{228}\text{Ra}$  indirekt über LSC oder Gammaspktrometrie von  $^{228}\text{Ac}$  zu bestimmen.
- AP3: Aufgrund der begrenzten Probenmenge (Urin, Stuhl) wurde daran gearbeitet, eine Methode zu entwickeln, die die sequentielle Abtrennung von  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  und  $^{228}\text{Th}$  aus demselben Probenaliquot ermöglicht.  
 $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ : Die Bestimmung erfolgt direkt aus der Aufschlusslösung mittels Spontanabscheidung von Po und Bi auf Nickel. Über die  $^{210}\text{Bi}$ -Messung im Proportionalzählrohr ergibt sich die  $^{210}\text{Pb}$ -Aktivität. Damit entfällt die Entwicklung einer LSC-Messmethode für  $^{210}\text{Pb}$ .  $^{228}\text{Th}$  wird aus der Restlösung nach der Spontanabscheidung durch Anionenaustauschchromatographie und Flüssig-Flüssig-Extraktion abgetrennt.  $^{226}\text{Ra}$  wird aus der wässrigen Phase der Flüssig-Flüssig-Extraktion mittels Kationenaustausch- und Extraktionschromatographie von Calcium und anderen Matrixbestandteilen abgetrennt alphaspektrometrisch bestimmt. Dabei gestaltet sich die Abtrennung größerer Calciummengen sowie Mangan und Phosphat weiter als störend.
- AP4/5: Im September 2012 sind im VKTA Reinigungs- und Dekontaminationsarbeiten an Wärmetauscherplatten aus der Geothermieanlage Neustadt-Glewe durchgeführt worden. Dabei haben 3 Mitarbeiter an der geplanten Probandenstudie der Berufsgruppe teilgenommen, in der die Zufuhr von  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{226+228}\text{Ra}$  mit der Nahrung durch eine vorgegebene „Diät“ sowie deren Ausscheidung über Urin und Stuhl untersucht wurde. Dafür war hinsichtlich Nahrungsmittelauswahl, Mengenabschätzung, Beschaffung und Probenahme von 24-h-Ausscheidungen eine intensive Vorbereitung im Zusammenarbeit mit dem ISS, HMGU München vorangegangen. Damit ist ein wesentlicher Schwerpunkt des Forschungsvorhabens erfüllt worden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Literaturrecherche wird fortgesetzt, um weitere Informationen in die Methoden-optimierung einfließen zu lassen.
- AP3: Das für  $^{226}\text{Ra}$  bestehende Problem der Calciumabtrennung wird weiter optimiert.  
 Für die Bestimmung von  $^{228}\text{Ra}$  wird eine indirekte Methode über die Messung von seiner Tochter  $^{228}\text{Ac}$  mittels Betamessung im Proportionalzählrohr entwickelt.  
 Das sequentielle Verfahren wird an geeigneten Proben- und Referenzmaterialien getestet.
- AP4/5: Im Januar/Februar 2013 wird in München die Probandenstudie mit Referenzpersonen nicht strahlenexponierter Personen durchgeführt.  
 Die Analyse der Urin- und Stuhlproben der Probanden auf  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Th}$  und  $^{226}\text{Ra}$  wird durchgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Die Ergebnisse für die laufende Methodenentwicklung und der Ablauf der Probandenstudie in der Berufsgruppe wurden in einem Kurzvortrag auf dem KVSF-Workshop am 08./09.10.2012 in Jena (FSU) vorgestellt.

Die Methodenentwicklung für die Bestimmung von  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{226+228}\text{Ra}$  in Nahrungsmitteln wurde im Juni 2012 auf der BERM 13 in Wien vorgestellt (Beitrag als Coautor).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 015H</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 113.639,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Fischer	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Projekts ist die Erfassung und Modellierung des Transports nuklearmedizinisch angewandter Radioisotope im städtischen Abwassersystem und im daraus beaufschlagten Fließgewässer in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Vorgesehenes Untersuchungsgebiet ist die Stadt Bremen mit dem Fluss Weser. Die Ergebnisse sind für die Prognose der Radionuklidausbreitung nach einem Eintrag im städtischen Bereich und möglicherweise auch für Emissionen aus kerntechnischen Anlagen anwendbar. Innerhalb des Teilprojektes A sind Kooperationen mit den anderen Arbeitspaketen, insbesondere zu AP1.1 (städtisches Kanalsystem) und AP1.2 (Verhalten von Iod in Wasser und Sediment) vorgesehen.

Das Projekt ist ein Folgevorhaben von universitätsinternen Forschungsprojekten.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

#### *Teilprojekt A (Abwasser)*

Zu- und Ablauf der größten städtischen Kläranlage sollen in einer mehrwöchigen Kampagne kontinuierlich beprobt und Zeitreihen der Radionuklidkonzentrationen gammaspektroskopisch ermittelt werden. Gleichzeitig soll der Eintrag der Isotope anhand von mittleren Untersuchungszahlen (Diagnostik) bzw. individuellen, anonymisierten Patientendaten (Therapie) erhoben werden. Hieraus soll ein einfaches räumliches und zeitliches Modell des Abwasserpfades und der Kläranlage erstellt werden.

#### *Teilprojekt B (Fließgewässer)*

In einer zweiten Kampagne sollen Sedimentproben aus der Weser entnommen (Längs- und Querprofile) und auf medizinische und weitere Isotope untersucht werden. Aus den ermittelten Konzentrationen und den aus Teil A gewonnenen Eintragungswerten soll ein Ausbreitungs- und Depositionsmodell für  $^{131}\text{I}$  im Fließgewässer erstellt werden. Daten für  $^{137}\text{Cs}$  und  $^7\text{Be}$  werden nach eigenen Voruntersuchungen hierbei hilfreich für die Ermittlung der Verdünnung im Tidenbereich der Weser sein.

#### *Teilprojekt C*

Die in Teil A und B erstellten Modelle sollen anhand eines Vergleichs der hydrologischen Daten mit denen anderer Lokalitäten verallgemeinert und so eine überregionale Gültigkeit angestrebt werden. Eine Validierung kann ansatzweise anhand der in IMIS erhobenen Daten zur Umweltradioaktivität (zu denen das Labor beiträgt und auf die es bundesweiten Zugriff hat) erfolgen. Weiterhin soll ein Vergleich der Ergebnisse mit denen aus derzeit angewandten hydrologischen Ausbreitungsmodellen wie RODOS/RIVTOX erfolgen. Im Fall einer erfolgreichen Implementierung des Abwassermodells aus AP1.1 kann dieses numerische Modell zusätzlich verwendet und anhand der erhobenen Daten validiert werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Die im letzten Berichtszeitraum entwickelte Methode zum Nachweis von  $^{131}\text{I}$  in Oberflächenwasser auf Basis der „Messanleitungen für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“ des BMU wurde weiterentwickelt. Durch ein größeres Probenvolumen, eine Verbesserung der Probengeometrie bei der Messung und Verlängerung der Messzeit konnte die Erkennungsgrenze für  $^{131}\text{I}$  von 10 mBq/l auf 0,5 mBq/l gesenkt werden.
- Eine Methode zur Fällung von organisch gebundenen  $^{131}\text{I}$  in Oberflächenwasser mit Hilfe von Kationen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) wurde entwickelt. Die Motivation dazu war die schwankende Ausbeute des oben genannten Verfahrens, welches vorwiegend das anorganisch gebundene Iod fällt. Mit Anwendung beider Fällungsmethoden nacheinander soll eine konstant hohe Ausbeute für  $^{131}\text{I}$  erzielt werden.
- Entwicklung eines vereinfachten eindimensionalen Transportmodelles für  $^{131}\text{I}$  in nicht tidebeeinflussten Oberflächenwasser und Flusssedimenten. Das Modell setzt u. a. konstante laterale und longitudinale Fließgeschwindigkeiten und konstante Dispersionskoeffizienten voraus.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterhin ist die Durchführung der Probenkampagne im Kanalnetz geplant. Es sollen in Zusammenarbeit mit dem städtischen Kanalnetzbetreiber automatische Probennehmer in ausgewählte Kanalschächte gehängt werden. Die Abwasserproben sollen gamma-spektroskopisch untersucht und so der Transport von  $^{131}\text{I}$  im Kanalnetz beobachtet werden.
- Der Transport des  $^{131}\text{I}$  im Kanalnetz soll mit Kanalberechnungssoftware simuliert werden.
- Laborbesuch bei Projektpartnern des IRS in Hannover zum Austausch von Aufbereitungsverfahren von Iod in Flusswasser und möglichen weiteren Kooperationen.
- Laborbesuch bei Projektpartnern des Helmholtzzentrums München (Besuch des Schneefernerhauses) zu Austausch von Erfahrungen bei gammaspektroskopischen Messungen.
- Gegenseitige Laborbesuche und Erfahrungsaustausch mit dem städtischen Kanalnetz- und Kläranlagenbetreiber.
- Für die erste durchgeführte Probenkampagne an der Weser war die Methode zum Nachweis von  $^{131}\text{I}$  noch nicht empfindlich genug, die  $^{131}\text{I}$ -Konzentrationen der Oberflächenwasserproben lagen alle unterhalb der Erkennungsgrenze (EG). Mit der nun erreichten EG von 0,5 mBq/l soll die Kampagne wiederholt werden, um ein Konzentrationsprofil um die Einleitstelle der Kläranlage bis zu 10 km flussauf- und abwärts zu erstellen. Anhand der  $^{131}\text{I}$ -Konzentrationen im Oberflächenwasser können Rückschlüsse auf die Konzentration im Flusssediment gezogen werden. Das Transportmodell soll mit den Messwerten validiert werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Es sind Beiträge zu diesem Projekt auf folgenden Tagungen/Konferenzen präsentiert worden:  
Erfolgreicher Abschluss einer Masterarbeit mit dem Thema „Medical  $^{131}\text{I}$  in Weser water“.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 016A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.851.937,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Blettner	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Kenntnisse über die Prozesse der malignen Transformation von Geweben sind maßgebend für die Festsetzung von Dosisgrenzwerten im Strahlenschutz. Hoher Forschungsbedarf besteht zu den Mechanismen der Prozessierung von Strahlenschäden im Niedrigdosisbereich, zur individuellen Suszeptibilität gegenüber ionisierender Strahlung sowie zu individuellen Faktoren, die die Strahlenempfindlichkeit von Tumor- und Normalgeweben beeinflussen können. Das übergeordnete Ziel des ISIMEP - Forschungsverbundes ist die Untersuchung der Rolle der individuellen Strahlensensibilität bei der Entstehung maligner Tumoren. Für eine individuell erhöhte Strahlensensibilität werden in Bezug auf die Kanzerogenese intrinsische genetische Faktoren maßgeblich verantwortlich gemacht, die die zellulären Schutz- und Reparaturmechanismen und damit die genomische Stabilität beeinflussen. Damit könnte eine Kenntnis von Faktoren der individuellen Strahlenempfindlichkeit auch zu einer Individualisierung des Strahlenschutzes führen. Zu den offenen Forschungsfragen in diesem Zusammenhang gehören insbesondere die Regulation der Reparaturprozesse und der Zellzyklus-Kontrolle bei Exposition im Niedrigdosisbereich (diesem Thema widmen sich die Teilprojekte (TP) 1, 5 und 7). Weiterhin fehlen belastbare Aussagen zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen zwischen der Strahlenexposition, sensiblen in vitro Markern und Langzeitschäden (TP2) sowie zu metabolischen Markern mit prädikativem Potential (TP3). Eine epidemiologische Kohorten-Studie untersucht, in welchem Umfang Kinder durch den stetig zunehmenden, diagnostischen Einsatz der Computertomographie von malignen Spätschäden betroffen sein könnten (TP6). Im Dachprojekt werden im Rahmen eines Fall-Kontroll-Ansatzes bei Probanden mit Sekundärmalignomen die vorher etablierten, biologischen Verfahren getestet (TP7).

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- TP1: Untersuchung der molekularen Strahlenresponse: Expression von DNA-Reparaturgenen und DNA-schadensabhängiges Signaling im Bezug zur intrinsischen Strahlensensitivität (Univ.-Prof. Dr. Bernd Kaina)
- TP2: Biologische Dosimetrie nach Radiotherapie mit unterschiedlichen Dosen und Zielvolumina (Univ.-Prof. Dr. Heinz Schmidberger)
- TP3: Metabolische Marker der Strahlenresistenz und Bezug zu gentoxischen Endpunkten (Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Müller-Klieser)
- TP5: Untersuchungen zur Rolle des IGF-I Rezeptors bei der intrinsischen Strahlensensitivität (Univ.-Prof. Dr. Mathias Schreckenberger, Univ.-Prof. Dr. Matthias M. Weber)
- TP6: Kohorten-Studie KiCT: Epidemiologische Kohortenstudie unter Computertomographie (CT)-exponierten Kindern (Univ.-Prof. Dr. Maria Blettner, Lucian Krille)
- TP7: Fall-Kontroll-Studie KIKME: Identifizierung genetischer Prädispositionen der spontanen und strahleninduzierten Karzinogenese bei Malignomerkkrankungen im Kindesalter (Univ.-Prof. Dr. Heinz Schmidberger, Dr. Manuela Marron)
- TP8: Gesamtkoordination sowie Aus- und Weiterbildung in der Strahlenforschung (Dr. Manuela Marron)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

TP1: In der resistenten Glioblastomzelllinie LN-229 wurden im Zeitverlauf nach Bestrahlung molekulare Mar-

ker von Autophagie und Seneszenz nachgewiesen. Durch Experimente mit spezifischen Inhibitoren von definierten Autophagie-Phasen wurde gezeigt, dass der gesamte Prozess der Autophagie durch die Bestrahlung aktiviert wird. Aus den Ergebnissen mit der LN-229 Zelllinie geht hervor, dass der Prozess der „Mitotischen Katastrophe“ durch die Bestrahlung ebenfalls aktiviert wird und als ein Vorstadium der Apoptose/Nekrose gesehen werden kann. Die „Mitotische Katastrophe“ wird zum Teil durch Autophagie gehemmt, was die späte Apoptose/Nekrose nach ionisierter Strahlung erklären kann.

- TP2: Nach Etablierung der Referenzkurven für das gammaH2AX-Assay und zytogenetische Analysen wurden beide Assays erfolgreich für Analysen genomischer Strahlenschäden in peripheren Lymphozyten von Krebspatienten nach Radiotherapie angewendet. Nach der 1. Fraktion der radio-therapeutischen Behandlung wurde ein Anstieg der Anteile strahlengeschädigter Zellen und gammaH2AX-Foci sowie chromosomaler Aberrationen pro Zelle in Abhängigkeit der äquivalenten Ganzkörperdosis beobachtet. Zum Ende der Bestrahlungsserie wurde eine Akkumulation chromosomaler Aberrationen in gleicher Abhängigkeit festgestellt. In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Probenentnahme konnten anhand der detektierten Frequenzen strahleninduzierter gammaH2AX-Foci und chromosomaler Aberrationen äquivalente Ganz- sowie Teilkörperdosen auf Basis der Kalibrierungskurven berechnet werden.
- TP3: Es wurden an 33 Glioblastomen und 57 Rektalkarzinomen metabolische Messungen mit Hilfe von imBI („induced metabolic Bioluminescence Imaging“) durchgeführt. Die Tumoren erwiesen sich erwartungsgemäß als überwiegend hochglykolytisch. Die Auswertung von Patientendaten wurde weitergeführt und die Immunfluoreszenzfärbungen gegen glykolytische Marker (MCT-1/MCT-4) an den Biopsien getestet.
- TP5: Es wurden Inkubationsversuche mit humanen Karzinomzelllinien und verschiedenen Konzentrationen an IGF und einem spezifischen IGF-1R Kinase Inhibitor durchgeführt. Durch Messung der Proliferation und des Zelltods zeigte sich eine höhere Strahlenverträglichkeit bei intaktem IGF-1R.
- TP6: Die Rekrutierung der Kliniken wurde fortgeführt. Dabei zeigt sich wie in der letzten Berichtsperiode, dass wegen der langwierigen Verhandlungen mit den Kliniken der ursprüngliche Erhebungszeitplan verzögert ist. Die angestrebte Kohorte wird voraussichtlich erst zum Ende des Projekts erhoben sein. Mit der Vorbereitung der Auswertung wurde begonnen.
- TP7: Nach fünf Anläufen wurde die molekular-epidemiologische Fall-Kontroll-Studie KIKME von der Ethikkommission final genehmigt. Der umfangreiche Fragebogen und die Kultivierung der Zelllinien wurden entwickelt und erprobt. Eine Kooperationsvereinbarung mit der Unfallchirurgie wurde abgesprochen und mit der Rekrutierung der Kontrollen dort begonnen.
- TP8: Das 6. Kooperationstreffen und der 4. Zwischenbericht wurden erfolgreich abgeschlossen. Mit zahlreichen Teilnehmern fand der 2. Workshop zur Strahlenforschung in Mainz statt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- TP1: Analysen zur Klärung der Mechanismen zwischen Autophagie, Seneszenz und „Mitotischen Katastrophe“, insbesondere den Einfluss der Autophagie auf die Induktion der „Mitotischen Katastrophe“, Ausarbeitung einer Strategie zur Erhöhung der Zelltodraten durch eine Kombination der Behandlung von Autophagiehemmung und der Bestrahlung.
- TP2: Weiterhin Rekrutierung und Untersuchung von Tumorpatienten mit unterschiedlichen Tumorentitäten vor und nach der Radiotherapie und Vergleich verschiedener Bestrahlungstechniken.
- TP3: Fortsetzung der imBI-Messungen an den 33 Glioblastomen und 57 Rektaltumoren, Abgleich der Ergebnisse mit den Patientendaten und weitere Untersuchung des Expressionsniveaus von Monocarboxylat-transportern (MCT-1/MCT-4) und Glukosetransportern (GLUT-1/GLUT-3) mit Immunfluoreszenz.
- TP5: Implantation der Karzinomzelllinie im Nacktmausmodell sowie DNA- Doppelstrangbruch- und Apoptosemessung bestrahlter Zellen in vitro und ex vivo.
- TP6: Fortführung und Intensivierung der Rekrutierung von Kliniken, Datenerhebung in den teilnehmenden Kliniken aus RIS und PACS, Abschluss Vorbereitung der Auswertung und Erprobung der Dosimetrie-strategie mit dem Partnern aus München.
- TP7: Weitere Rekrutierung von Kontrollen aus der Unfallchirurgie und Erhalt des GPOH-Votums, um weiterer Probanden mit Krebs im Kindesalter über das Deutsche Kinderkrebsregister zu rekrutieren.
- TP8: Aktualisierung der Webpage, Planung und Durchführung des 8. Kooperationstreffens, Erstellung des 6. Zwischenberichtes, Durchführung des nächsten ISIMEP Kolloquiums.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Knizhnik, W. P. Roos, T. Nikolova, S. Quiros, K-H Tomaszowski, M. Christmann, B. Kaina (2013): Survival and death strategies in glioma cells: autophagy, senescence and apoptosis triggered by a specific temozolomide-induced DNA damage. PLoS One, (in press).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Klinikum der Universität München, Lindwurmstr. 2a, 80337 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 016B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 285.788,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schneider	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zur strahlenepidemiologischen Bewertung der Strahlenempfindlichkeit von Kindern wurde am Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik eine bundesweite Kohortenstudie zur Strahlenexposition von Kindern in der Computertomographie geplant. In der Abteilung Radiologie im Dr. von Haunerschen Kinderspital, Klinikum der Universität München, soll eine Datenbasis zur Erfassung der kumulativen Strahlenbelastung von Kindern erstellt sowie eine Methodik zur rechnergestützten Dosisrekonstruktion entwickelt werden. Da die etablierten Dosisrekonstruktionsverfahren bei Kindern aus der Erwachsenenradiologie abgeleitet wurden und damit auf Neugeborene, Säuglinge und Kleinkinder nicht anwendbar sind, ist die Entwicklung einer neuen Methodik zur Dosisrekonstruktion in der pädiatrischen Computertomographie unter besonderer Berücksichtigung strahlenempfindlicher Risikoorgane von essentieller Bedeutung. Da hier insbesondere das Konversionsfaktoren-Konzept Anwendung findet und die Expositionsbedingungen bei der pädiatrischen Computer-tomographie mit modernen CT-Scannern bei der Ermittlung der bisher publizierten Konversionsfaktoren nicht adäquat berücksichtigt wurden, werden anhand von Monte-Carlo-Simulationen neue Konversionsfaktoren bestimmt und in den risikoorganassoziierten Dosisrekonstruktionsalgorithmus implementiert.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Entwicklung einer Patientendatenbank zur Erfassung der kumulativen Strahlenexposition pädiatrischer Patienten
- AP2: Entwicklung eines Algorithmus zur Analyse der DICOM-Datensätze und der Bilddatensätze zur rechnergestützten Erfassung anthropometrischer und anatomischer Merkmale pädiatrischer Patienten
- AP3: Entwicklung eines Algorithmus zur Rekonstruktion der bei der pädiatrischen CT vor allem in strahlenempfindlichen Risikoorganen applizierten Strahlendosen
- AP4: Ermittlung neuer Konversionsfaktoren unter Berücksichtigung der in der pädiatrischen CT verwendeten Scantechniken

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: (a) Die Patientendatenbank des DvHK umfasst derzeit rund 4.000 CT-Untersuchungen von Kindern und Jugendlichen bis zum vollendeten 17. Lebensjahr von den Standorten München-Großhadern und München-Innenstadt. (b) Da die Datenbasis des Dr. von Haunerschen Kinderspitals die Grundlage zur Durchführung einer als Goldstandard dienenden Dosimetrie bilden soll, wurde eine Klassifikation sämtlicher erhobener Bilddatensätze nach anatomischer Region und CT-Scanverfahren durch visuelle Beurteilung vorgenommen.
- AP2: Die Anwendung des Dosisrekonstruktionsalgorithmus auf die CT-Datensätze erfordert die Definition anatomischer Landmarken, als welche nun aufgrund ihrer geringen interindividuellen Varianz definitiv die Abschnitte des Achsen skeletts festgelegt wurden. Anatomische Landmarken wurden in-

zwischen bei ca. 1.500 Patienten anhand visueller Auswertung der Bilddatensätze identifiziert.

- AP3: Folgende weitere rechnergestützte Analysen der Bilddatensätze und der zugehörigen DICOM-Daten mit dosimetrischer Relevanz wurden vorgenommen: (a) Bestimmung der anatomischen und metrischen Abweichung zwischen Scanogramm-Länge und wahrer Scan-Länge sowie der hierbei applizierten Strahlendosen anhand visueller Auswertung bei ca. 1.400 Patienten in Ergänzung zur automatischen Analyse. (b) Bestimmung der anatomischen Lokalisation der Einzelschichten bei HRCT-Untersuchungen und der assoziierten Strahlendosen anhand visueller Auswertung bei ca. 200 Patienten. (c) Volumetrie der Brustdrüse bei rund 500 Patienten zunächst ab dem 8. Lebensjahr.
- AP4: Nachdem die strahlenphysikalischen Eigenschaften des Formfilters des am DvHK eingesetzten CT-Scanners ermittelt werden konnten, wurden exemplarisch gerätespezifische Konversionsfaktoren für den am Dr. von Haunerschen Kinderspital betriebenen CT-Scanner Philips Aura ermittelt. Die Validität der Methodik wurde anhand einer umfangreichen Nachberechnung etablierter Konversionsfaktoren verifiziert.
- AP5: Zur Dosisrekonstruktion im Rahmen des Gesamtprojektes wurde mit der Entwicklung eines gemäß dem Informationsgehalt der Patientendatensätze abgestuften Dosisrekonstruktionsverfahrens begonnen; im Rahmen eines „Ampelschemas“ soll am Dr. von Haunerschen Kinderspital eine Referenzdosimetrie als Goldstandard und die Abschätzung der dosimetrischen Unsicherheiten bei Näherungsverfahren erfolgen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Bereitstellung der Patientenlisten mit sämtlichen CT-Untersuchungen seit ca. 2003
- Entwicklung des „Ampelschemas“ zur informationsadaptierten Dosisrekonstruktion
- Weiterentwicklung des rechnergestützten Dosisrekonstruktionsalgorithmus
- Validierung der rekonstruierten Organ- und Effektivdosen

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Seidenbusch M, Schneider K.: Neue Konversionsfaktoren für die Dosisrekonstruktion in der Computertomografie. Fortschr Röntgenstr 2010; 182

Seidenbusch M, Schneider K.: New conversion coefficients for reconstruction of radiation doses applied during paediatric computertomographic (CT) examinations. *Pediatr Radiol* 2011; 41: S61

Seidenbusch M, Schneider K.: Neue Konversionsfaktoren für die Dosisrekonstruktion in der pädiatrischen Computertomographie. Fortschr Röntgenstr 2011; 183

Schneider K, Becker HC, Stahl R, Seidenbusch M.: Kumulative Strahlenbelastung Neugeborener in der Radiologie durch konventionelle und computertomographische Diagnostik. Fortschr Röntgenstr 2011; 183

Schneider K, Seidenbusch M.: Änderung der bildgebenden Diagnostik im Verlauf der letzten 10 Jahre. In: Schneider K, Seidenbusch M (Hrsg): 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie, Tagungsband II: Dosis in der Pädiatrischen Radiologie, 2011, ISBN 978-3-00-035718-3.

Seidenbusch M.: Dosisbegriff und Dosismessung in der konventionellen Radiologie. In: Schneider K, Seidenbusch M (Hrsg): 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie, Tagungsband II: Dosis in der Pädiatrischen Radiologie, 2011, ISBN 978-3-00-035718-3.

Seidenbusch M.: Dosisbegriff und Dosismessung in der Computertomographie. In: Schneider K, Seidenbusch M (Hrsg): 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Pädiatrische Radiologie, Tagungsband II: Dosis in der Pädiatrischen Radiologie, 2011, ISBN 978-3-00-035718-3.

Schneider K, Seidenbusch M.C.: New conversion coefficients for dose reconstruction in high resolution computed tomography (HRCT) of the chest in neonates and infants. *Insights Imaging* 2012; 3 (Suppl 1): S268

Seidenbusch MC, Griese M, Reiter K, Schneider K.: Das Lungenhistogramm – ein neu erfundenes Rad als einfaches diagnostisches Hilfsmittel in der Kinderradiologie (ISIMEP-Projekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 02NUK016A). Fortschr Röntgenstr 2012; 184

Seidenbusch MC, Schneider K.: Zur Strahlenexposition von Kindern in der pädiatrischen Radiologie. Einfluss der Formfilterung auf die Dosisrekonstruktion in der pädiatrischen Computertomografie (CT). Fortschr Röntgenstr 2012; 184

Seidenbusch MC, Schneider K.: Zur Strahlenexposition von Kindern in der pädiatrischen Radiologie. Anthropometrische Merkmale von Kindern und den zur Dosisrekonstruktion verwendeten mathematischen Phantomen. Fortschr Röntgenstr 2012; 184

<b>Zuwendungsempfänger:</b> BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung GmbH, Achterstr. 30, 28359 Bremen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 016CX</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2012 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 52.133,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Zeeb	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Epidemiologische Kohorten-Studie, die untersucht, in welchem Umfang Kinder durch den stetig zunehmenden, diagnostischen Einsatz der Computertomographie von malignen Spätschäden betroffen sein könnten (Studienzentrum Nord, Bremer Institut für Präventionsforschung und Sozialmedizin, Prof. Dr. med. Hajo Zeeb).

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Kohorten-Studie KiCT:

Epidemiologische Kohortenstudie unter Computertomographie (CT)-exponierten Kindern – Studienzentrum Nord (Prof. Dr. med. Hajo Zeeb, Steffen Müller)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

- Rekrutierung der fünften Klinik im nordwestdeutschen Raum
  - Einholen des Votums der Ethikkommissionen, Beurteilungen der Datenschutzbeauftragten zum Studienprotokoll/Datenschutzkonzept, Unterzeichnung der Kooperationsvereinbarung
- Durchführung und Koordinierung der RIS- und PACS Erhebungen von Frühjahr bis Herbst 2012
  - Abschluss der Erhebungen an vier Standorten (Lübeck, Göttingen, Hannover, Oldenburg)
  - Die PACS Erhebung an der Medizinischen Hochschule Hannover wird im Januar 2013 final abgeschlossen
- Probleme bei der Anbahnung der Datenerhebung am Standort Bremen aufgrund von mangelnder Kooperationsbereitschaft der IT-Abteilung trotz bestehender Absprachen (Kooperationsvereinbarungen)
- 16.912 RIS-Datensätze sowie 1.511 Untersuchungen aus dem PACS System konnten bislang erhoben werden (4 Kliniken, Stand Oktober 2012)

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Abschluss der PACS Erhebung am Standort Hannover im Januar 2013
- Erneute Kontaktaufnahme und Kommunikation mit der zuständigen IT-Abteilung der fünften Klinik wird angestrebt, um die Realisierung der Datenerhebung am letzten Standort zu erreichen
- Homogenisierung der Daten (u. a. Plausibilitätschecks)
- Datentransfer und Pooling am Gesamtstudienzentrum in Mainz
- Auswertung der Daten sowie die Erstellung von Publikationen

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Eingeladener Vortrag: „Epidemiologie Kinder-CT“, Hajo Zeeb; 16. Fortbildungsseminar der Arbeitsgemeinschaft Physik und Technik (APT) der Deutschen Röntgengesellschaft „Von der Forschung in die diagnostische Praxis“, 15.-16. Juni 2012, Helmholtz-Zentrum, München

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 016D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2010 bis 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 532.606,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Löbrich	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Kenntnisse über die Prozesse der malignen Transformation von Geweben sind maßgebend für die Festsetzung von Dosisgrenzwerten im Strahlenschutz. Hoher Forschungsbedarf besteht zu den Mechanismen der Prozessierung von Strahlenschäden im Niedrigdosisbereich, zur individuellen Suszeptibilität gegenüber ionisierender Strahlung sowie zu individuellen Faktoren, die die Strahlenempfindlichkeit von Tumor- und Normalgeweben beeinflussen können. Das übergeordnete Ziel des ISIMEP – Forschungsverbundes (an den Standorten Mainz, Darmstadt, Bremen und München) ist die Untersuchung der Rolle der individuellen Strahlensensibilität bei der Entstehung maligner Tumoren. Für eine individuell erhöhte Strahlensensibilität werden in Bezug auf die Kanzerogenese intrinsische genetische Faktoren maßgeblich verantwortlich gemacht, die die zellulären Schutz- und Reparaturmechanismen und damit die genomische Stabilität beeinflussen. Damit könnte eine Kenntnis von Faktoren der individuellen Strahlenempfindlichkeit auch zu einer Individualisierung des Strahlenschutzes führen. Der Forschungsschwerpunkt der TU Darmstadt (TP4 und TP7) liegt auf der Identifizierung und Charakterisierung von genetischen Prädispositionen, welche für eine spontane oder strahleninduzierte Karzinogenese bedeutend sind. Hierzu werden Zelllinien von Probanden mit Sekundärmalignomen, welche im Rahmen eines Fall-Kontroll-Ansatzes rekrutiert wurden und werden, mittels vorher etablierter, biologischer Verfahren untersucht. Zu den offenen Forschungsfragen in diesem Zusammenhang gehören insbesondere die Regulation der Reparaturprozesse und der Zellzyklus-Kontrolle bei Exposition in hohen und niedrigen Dosisbereichen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

*AP1 (TP4):* Es soll untersucht werden, inwieweit die Checkpoint-Sensitivität in der normalen Bevölkerung variiert und wie sich genetisch, im Hinblick auf eine Krebsentstehung vorbelastete Personen davon abheben. Dafür sollen Methoden etabliert werden, die es ermöglichen, genetische Prädispositionen anhand der individuellen Checkpoint-Sensitivitäten zu erkennen. Hierfür sollen zunächst geeignete Verfahren zur Messung der Checkpoint-Sensitivitäten größerer Kohorten etabliert werden. Anhand der optimierten Messverfahren sollen im Anschluss Zelllinien gesunder Probanden, Zelllinien von Probanden mit bekannter genetischer Prädisposition und Zelllinien von Probanden mit einem Primär- bzw. Sekundärmalignom verglichen werden.

*AP2 (TP7):* Anhand des DNA-Doppelstrangbruch (DSB)-Reparaturverhaltens sollen genetische Prädispositionen der Karzinogenese identifiziert werden. Dazu sind DSB-Reparaturstudien nach Röntgenbestrahlung im hohen und niedrigen Dosisbereich (1 Gy, 100 mGy, 10 mGy) geplant. In einem vorherigen Schritt soll eine bereits etablierte, auf  $\gamma$ H2AX-Focimessung basierende Methode für die Anforderungen des vorliegenden Projektes optimiert werden. Dies ist erforderlich, da (i) voraussichtlich relative kleine Effekte zwischen zwei Populationen zu erwarten sind und deshalb die Notwendigkeit besteht, größere Kohorten zu untersuchen und (ii) die Messung der DSB-Reparatur nach niedrigen Dosen durch die geringe DSB-Induktion ein hohes Standardisierungsniveau der Methode verlangt. Mittels der optimierten Messverfahren sollen verschiedene Gruppen (gesunde, bekannte genetische Prädisposition, Probanden mit einem Primärmalignom, Probanden mit Sekundärmalignomen) verglichen werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

*Arbeitspaket 1 (TP4):* Die Optimierung der Versuchsbedingungen zur sensitiven Messung des G2/M-Checkpoints wurde im Berichtszeitraum erfolgreich abgeschlossen. Dadurch konnte im Vergleich zu früher angewandten Methoden eine höhere Standardisierung hinsichtlich des Kultivierungs- und Färbevorgangs erreicht werden, was nicht zuletzt in einer verbesserten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse resultierte. Die immunfluoreszenzmikroskopischen Experimente wurden im aktuellen Berichtszeitraum mit allen vorliegenden Zelllinien der GenKIK-Studie sowie den Zelllinien mit bekannter genetischer Prädisposition resultierend aus einem heterozygoten Defekt des BRCA1- oder BRCA2-Gens durchgeführt. Das automatische Scanning der verwendeten 24-Well-Platten und die darauf folgende Bildanalyse und Zelldetektion ist fast vollständig abgeschlossen und gegenwärtig erfolgt die Auswertung der ermittelten Rohdaten. Vorläufige Analysen der bisherigen Checkpointmessungen deuten darauf hin, dass sich einzelne Zelllinien hinsichtlich ihres Zellzyklusregulationsverhaltens teils erheblich voneinander unterscheiden.

*Arbeitspaket 2 (TP7):* Im aktuellen Berichtszeitraum wurden die Experimente zur Messung des DSB-Schadensniveaus nach niedrigen Dosen ionisierender Strahlung in den verfügbaren GenKIK-Zelllinien abgeschlossen und in digitaler Form archiviert und aufbereitet. Parallel wurde die auf dem Programm ImageJ basierende Fokusedetektion weitergehend getestet und optimiert. Die Experimente zur Messung der DSB-Reparaturkapazität nach einer hohen Dosis IR in den GenKIK-Zelllinien wurden, nach der Etablierung der Kultivierung und Färbung in 24-Well-Zellkulturplatten mit Glasboden im letzten Berichtszeitraum, durchgeführt und ebenfalls abgeschlossen. Mit der Auswertung wurde parallel begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

*Arbeitspaket 1 (TP4):* Die Auswertung der schon erfolgten G2/M-Checkpoint-Messungen wird weiter fortgeführt und die Daten in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) auf ihre statistische Signifikanz hin überprüft. Sobald die Rekrutierung der gematchten Kontrollpatienten im Rahmen der KIKME-Studie angelaufen ist, die entsprechenden Zellkulturen etabliert wurden und uns als Zelllinien vorliegen, werden diese unter Verwendung des optimierten Verfahrens auf ihre G2/M-Checkpoint-Sensitivität hin untersucht. Die gewonnenen Daten sollten darauf folgend sowohl hinsichtlich der interindividuellen Variation innerhalb der Kontrollgruppe untersucht, als auch mit den Resultaten der vorangegangenen Experimente (GenKIK-Zelllinien, heterozygote BRCA-Zelllinien) verglichen werden.

*Arbeitspaket 2 (TP7):* In den nächsten Wochen soll der laboratorische Teil des ersten Projekts (Bestrahlung mit niedrigen Dosen) mit der Datenerhebung von Zelllinien mit bekannter heterozygoter genetischer Prädisposition (Brca1+/-, Brca2+/-) abgeschlossen werden. Ebenfalls soll zeitnah die Entwicklung des Auswerteprogramms für die Fokusedetektion abgeschlossen werden. Die erhaltenen Daten zur Reparatur nach niedrigen und hohen Dosen sollen anschließend unter Berücksichtigung aller epidemiologischen Informationen statistisch ausgewertet werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.590.730,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Fournier

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem hier vorgestellten Projekt soll die Langzeitwirkung von niedrigen Dosen dicht-ionisierender Strahlung ( $\alpha$ -Strahlung, beschleunigte Ionen) untersucht werden. Hierbei sollen sowohl genetische Effekte als auch die für den therapeutischen Nutzen wichtigen Mechanismen der Entzündungshemmung untersucht werden. Dazu ist geplant, eine Radon-Expositions-kammer zu bauen, in der Zellkulturen und Kleintiere (Mäuse) mit  $\alpha$ -Teilchen bestrahlt werden können. In Tierexperimenten soll die Verteilung der  $\alpha$ -Emitter physikalisch und biologisch untersucht werden. Durch die Analyse von Chromosomenaberrationen sollen die Induktion von Schäden sowie mögliche Langzeitfolgen der Strahlenexposition abgeschätzt werden. Die entzündungshemmende Wirkung von Radon soll mit der von Röntgenstrahlung verglichen werden. Zur Aufklärung der zellulären und molekularen Wirkungsmechanismen sollen sowohl Aspekte der humoralen als auch der neuronalen Signalvermittlung zwischen den relevanten Zelltypen betrachtet werden. Da die entzündungshemmende Wirkung des Radons um Wochen verzögert auftritt und dann Monate lang anhält, soll auch ein möglicher Einfluss auf die Schmerzwahrnehmung über entsprechende Ionenkanäle in der Zellmembran untersucht werden. Um die entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung in chronisch entzündlichen Geweben nachvollziehen zu können, sollen die Untersuchungen auch in präklinischen, transgenen arthritischen Mäusen durchgeführt werden. Ziel ist es, für den Strahlenschutz relevante Erkenntnisse zu langlebigen radioaktiven Isotopen zu erlangen und Verbesserungen bei der therapeutischen Anwendung von Radon und niedrig-dosierter Strahlentherapie zu erarbeiten.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konstruktion einer Radonkammer, physikalische Dosimetrie für die Bestrahlungsexperimente.
- AP2: Biologische Dosimetrie, Schadensinduktion durch Radon in Zellkulturen und Gewebe.
- AP3: Abschätzung des Strahlenrisikos durch Untersuchung chromosomaler Aberrationen.
- AP4: Untersuchung von zellulären und molekularen Interaktionen in Blutgefäßen und im Knochen.
- AP5: Intrazelluläre Signaltransduktion (insbesondere NF $\kappa$ B), Regulation von Adhäsionsmolekülen.
- AP6: Untersuchung entzündungshemmender Reaktionen durch cholinerge Mechanismen.
- AP7: Inhibition der Schmerzentstehung durch Veränderung der Aktivität von Ionenkanälen.
- AP8: Diskontinuierliche Dosis-Effekt-Beziehung (DNA-Reparatur, Stressantwort, ROS).
- AP9: Untersuchung immunologischer Gefahrensignale und entzündlicher Reaktionen im Tiermodell.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Es wurde die Radonexpositions-kammer aufgebaut und befindet sich im Moment in der Phase der Inbetriebnahme (u. a. Einstellung der Regelparameter, Test der Hard- und Software auf korrekte Funktion).
- AP3: Es wurden murine Knochenmarkszellen isoliert, mit Röntgenstrahlen bestrahlt und in vitro kultiviert.

Zunächst wurde der Einfluss der Bestrahlung auf die Zellproliferation bestimmt. Ausgehend von diesen Messungen wurden 10 und 22 Stunden nach der Exposition Dosiseffektkurven (0-3 Gy) für die Erzeugung von Chromosomenschäden erstellt (Giemsa-Färbung). Weiterhin wurde der Datensatz zur Induktion von Aberrationen in menschlichen Lymphozyten (mFISH-Färbung) komplettiert.

- AP4: (a) Entzündungshemmende Strahlungseffekte (Zelltod, Phagozytose & Adhäsion): Es wurde der Einfluss verschiedener Strahlenarten auf die Phagozytose von apoptotischen Zellen untersucht. Beim Vergleich von Röntgen- und UVB-Strahlung traten deutliche Unterschiede in der Freisetzung des anti-inflammatorischen Zytokins IL-10 auf. Mit dem Bead-basierten Protein-Array-System wurden erste Bestrahlungsexperimente durchgeführt. Versuche zur Adhäsion unter dynamischen Bedingungen zeigten, dass strahleninduziert die Adhäsion stärker reduziert war als unter statischen Bedingungen (Röntgenstrahlung und Kohlenstoffionen). In den Kammern für die  $\alpha$ -Bestrahlung wurden erstmals Primärzellen kultiviert.
- (b) Differenzierung von Osteoblasten (OBs) und Osteoklasten (OCs): Erste Röntgenexperimente im Hinblick auf die Veränderung der Differenzierung von mesenchymalen Stammzellen (MSCs) und OBs zeigten: (a) bestrahlte OBs zeigen eine verstärkte Mineralisierung mit zunehmender Dosis, was auf eine beschleunigte Differenzierung hinweist, (b) bestrahlte MSCs zeigen ein umgekehrtes Verhalten während des Differenzierungsprozesses in OBs. Die Kultivierung von Th17-Zellen und OCs sowie Tests zum Nachweis der Differenzierung und Aktivität wurden optimiert. In Zusammenarbeit mit AP5 wurde begonnen, die Aktivierung von NF- $\kappa$ B in bestrahlten OCs zu untersuchen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Fertigstellung der Inbetriebnahme, erste Testmessungen mit Radon ab Mitte Februar. Nach Start des Experimentierbetriebes soll eine verlässliche Dosimetrie erstellt werden und Testmessungen in Zellkulturen erfolgen. Beschaffung geeigneter Messtechnik zur Messung der Zerfallsprodukteverteilung in Gewebe.
- AP3: In weitergehenden in vitro Studien zur Induktion von Aberrationen in murinen Knochenmarkszellen soll die hoch-auflösende mFISH Technik verwendet werden. In Zusammenarbeit mit AP4 und 9 soll mit der Patientenstudie begonnen werden: in Blutproben von 2 Patienten aus Bad Steben (vor Therapiebeginn sowie am Ende der Therapie) sollen Chromosomenschäden in Lymphozyten gemessen werden.
- AP4: (a) Die Vergleichsexperimente zwischen Photonen, Kohlenstoffionen und UVB-Strahlung zur Phagozytose sollen abgeschlossen und andere Zelltypen als Phagozyten eingesetzt werden. In den Experimenten zur Adhäsion sollen detaillierte Dosis-Wirkungsbeziehungen erstellt werden. Durch Bestrahlung der Lymphozyten (und nicht der Endothelzellen) soll geklärt werden, inwieweit eine Bestrahlung der Lymphozyten zur Reduktion der Adhäsion in vivo beiträgt. Die Anheftung von Primärzellen (Endothelzellen oder Makrophagen) an die Mylarfolie der Kammern für die  $\alpha$ -Bestrahlung soll durch unterschiedliche Beschichtungen verbessert werden. (b) Die am Differenzierungsprozess von MSCs und OBs beteiligten Faktoren sollen mittels PCR Methode und ELISA untersucht werden. Der Einfluss von Strahlung auf die Differenzierung von TH17 Zellen und OCs (sowie deren knochenresorbierende Aktivität auf Knochenplättchen) soll mit den etablierten Assays quantitativ untersucht werden. Der Transport von Patientenblut (AP9) zwischen den Instituten soll erfolgen, um den Einfluss von TH17 Zellen an Entzündungsreaktionen von Patienten zu untersuchen. In Zusammenarbeit mit AP7 sollen bereits begonnene Arbeiten zur Aktivierung von Ionenkanälen auf Zelltypen ausgedehnt werden, die potentiell im Zusammenhang mit entzündungshemmender Wirkung von Strahlung stehen (Lymphozyten, OCs, OBs).

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- Groo A. et al.: "Impact of ionizing radiation on differentiation and proliferation of human Osteoblasts". GSI annual report 2012, in press
- Klinger J. et al.: "Inhibitory effect of ionizing radiation on cellular adhesion of lymphocytes to endothelial cells under dynamic conditions". GSI annual report 2012, in press
- Klinger J. et al.: "Comparison of anti-inflammatory effects between UV and ionizing radiation in co-cultures of macrophages and lymphocytes". GSI annual report 2012, in press
- Maier A. et al.: "Radon exposure setup for cells and small animals – preparation for experiments on inflammation related effects". GSI annual report 2012, in press

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 195.960,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Thiel	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Arbeiten dienen zur Untersuchung der Wirkung von Radonstrahlung auf zelluläre Prozesse. Damit soll prinzipiell die molekulare Wirkung von schwach-ionisierender Strahlung bei der Behandlung von Entzündungsprozessen verstanden werden. Die Arbeiten sind Teil des Projektes: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Elektrophysiologische und fluoreszenzoptische Messungen an Zellen unter Einfluss von ionisierender Strahlung.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde die Reaktion eines wichtigen Kaliumkanals in A459 Zellen auf Strahlung untersucht. Die Daten zeigen im Wesentlichen, dass der Kanal bei niedriger Dosierung von Röntgenstrahlung in einem Zeitbereich von wenigen Minuten nach Bestrahlung aktiviert wird. Die Aktivierung des Kanals führt zu einer Hyperpolarisation der Zellen. Die Stärke der zellulären Reaktion hängt davon ab, ob der entsprechende hIK Kanal in den A459 Zellen exprimiert ist. Zum andern ist die Reaktion dann sehr hoch, wenn der Kanal vor Applikation der Strahlung nur wenig aktiv war. Die experimentellen Daten bestätigen durch Veränderung der cytoplasmatischen Pufferkonzentration, dass sowohl das cytosolische  $\text{Ca}^{2+}$  wie auch cytosolische Sauerstoffradikale bei der Kanalaktivierung beteiligt sind. Die Art der Verschaltung der einzelnen Signalwege ist noch nicht geklärt.

Ein wichtiges Werkzeug bei der Beantwortung der Frage nach der physiologischen Bedeutung einer Aktivierung von hIK Kanälen durch Strahlung ist die Empfindlichkeit des Kanals gegenüber spezifischen Blockern (Clotrimazol, TRAM-34), die den Strahleneffekt inhibieren. Durch Einsatz der Blocker war es möglich zu zeigen, dass die Aktivierung des hIK Kanals essentiell für die Regulation des Zellzyklus und für die Migration von Zellen ist. Wird der strahlenempfindliche Kanal blockiert, dann vermindert sich die Zellteilung. In FACS-Messungen zeigt sich, dass bei Inhibierung des Kanals weniger Zellen in die S-Phase gehen. In parallelen Migrationsassays zeigt sich, dass eine Inhibierung des strahlenempfindlichen Kanals weniger Zellmigration in sogenannten Scratch-Assays messbar ist.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die oben beschriebenen Ergebnisse sind sehr vielversprechend und werden weiter geführt, um die Signalkette zwischen Strahlung und Kanalaktivierung bzw. Zellmigration detaillierter zu verstehen. Für diesen Zweck wird der Messaufbau verbessert, um an den reaktiven Zellen direkt Kanalaktivität Signalbotenstoffe ( $\text{Ca}^{2+}$  und Radikale) messen zu können. Die ersten Versuche zum selben Thema wurden auch schon erfolgreich an Lymphozyten durchgeführt. Diese Zellen exprimieren ebenfalls den hIK Kanal und sind zentral an Immunreaktionen in Zellen beteiligt. Wenn sich die Pilotexperimente bestätigen, könnte es durchaus sein, dass niedrig dosierte Strahlung vor allem wegen der Reaktivität des hIK Kanals in diesen Zellen einen Einfluss auf das Immunsystem hat.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Veröffentlichungen: Keine

Vorträge:

Gerhard Thiel: Ionizing irradiation causes rapid and cell specific activation of two types of  $\text{K}^+$  channels and hyperpolarization in A549 cells; Tagung Gesellschaft für Biol. Strahlenschutz (GBS) München; Sept. 2012

Gerhard Thiel: Up-regulation of  $\text{K}^+$  channels by ionizing radiation and its consequence on cell development; Universitätsklinikum Jena, Dez. 2012

Postervorstellung: Tagung Gesellschaft für Biol. Strahlenschutz (GBS) München; Sept. 2012

Christine Gibhardt: ROS mediated signal cascade leads to potassium-channel activation and membrane hyperpolarization

Bastian Roth: Ionizing irradiation causes rapid and cell specific activation of two types of  $\text{K}^+$  channels and hyperpolarization in A549 cells

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 213.924,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Layer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Projekt GREWIS sollen die genetische und die entzündungshemmende Wirkung von dicht ionisierender Strahlung, insbesondere von Radon, untersucht werden. Neben Röntgen- und Alpha-Bestrahlungen sowie Experimenten mit Ionenstrahlen sollen Zellkulturen und Tiere in einer Radon-Kammer exponiert werden, da die Radon-Exposition im Bereich des Strahlenschutzes sowie in der Therapie entzündlicher Erkrankungen eine wesentliche Rolle spielt. Chromosomenaberrationen in peripheren Lymphozyten und hämatopoietischen Stammzellen der Maus sollen als genetische Indikatoren analysiert und mit menschlichen Daten aus der Tumor- und Rheumatherapie verglichen werden. In Zell- und Tierversuchen soll die entzündungshemmende Wirkung von Radon mit molekularbiologischen Mitteln untersucht, und mit Therapie-Daten verglichen werden (siehe Antrag). Im vorliegenden Teilprojekt C (AP6) soll der Einfluss des so genannten *cholinergic anti-inflammatory pathway* (CAIP) auf das Entzündungsgeschehen nach Radonbehandlung an Zell- und Tiersystemen, die auch in AP5 zum Einsatz kommen, untersucht werden. Die Befunde müssen eng mit denjenigen aus den anderen Teilprojekten, insbesondere TP4, 5 und 9 verglichen und ausgewertet werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konstruktion einer Radonkammer sowie physikalische Dosimetrie für die Bestrahlungsexperimente (GSI)
- AP2: Biologische Dosimetrie, Untersuchung der Schadensinduktion durch Radon in Zellkulturen und Gewebe (TUD)
- AP3: Abschätzung des Strahlenrisikos durch Untersuchung chromosomaler Aberrationen (GSI)
- AP4: Untersuchung von zellulären und molekularen Interaktionen in Blutgefäßen und im Knochen (GSI)
- AP5: Intrazelluläre Signaltransduktion im Zusammenhang mit NF- $\kappa$ B und der Regulation von Adhäsionsmolekülen (TUD)
- AP6: *Untersuchung entzündungshemmender Reaktionen durch cholinerge Mechanismen (TUD)*
- AP7: Inhibition der Schmerzentstehung durch Veränderung der Aktivität von Ionenkanälen (TUD)
- AP8: Untersuchung der diskontinuierlichen Dosis-Effekt-Beziehung (DNA-Reparatur, Stressantwort, ROS) (GUF)
- AP9: Untersuchung immunologischer Gefahrensignale und entzündlicher Reaktionen im Tiermodell (UKER)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wir haben 1) begonnen, die Expression cholinergischer Komponenten in primären humanen Osteoblasten zu analysieren, und haben 2) eine Micromass-Kultur etabliert, mit deren Hilfe cholinerge Mechanismen der Knorpel- und Knochenbildung untersucht werden sollen.

Zu 1): Wir haben alle maßgeblichen cholinergen Komponenten in humanen Osteoblasten per RT-PCR untersucht. Die Osteoblasten wurden bis zur Passage 4 gezüchtet, mRNA wurde isoliert und sodann mit AMV-Transkriptase revers in cDNA umgeschrieben. Primers für Cholinesterasen (AChE und BChE), ChAT (Cholineacetyltransferase, welche den Neurotransmitter Acetylcholin synthetisiert), muskarinische und nikotinische Ach-Rezeptoren wurden mithilfe des konventionellen Primer3-Programms entworfen. Die Resultate zeigten eindeutig die Expression aller genannten cholinergen Komponenten, was die Bedeutung des cholinergen Systems für die Differenzierung der Osteoblasten mindestens schon andeutet.

Zu 2): Ein drei-dimensionales, hoch dichtes Micromass-Zellkultursystem wurde aus Extremitäten-Blastenzellen sowohl aus Hühner-, wie aus Mausembryonen etabliert, welches deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Monolayer-Kulturen zeigt. Mit diesen hoch anerkannten Systemen lassen sich die Bildung von Knorpel- und Knochenstrukturen bestens in der Zellkultur nachahmen und verfolgen. Sie eignen sich insbesondere für die molekulare Untersuchung des Einflusses von Strahlungseinflüssen (hier Radonstrahlung), also nicht nur des cholinergen anti-inflammatorischen Signalwegs (CAIP; wie in diesem AP6), sondern werden auch für andere APs im GREWIS-Projekt eingesetzt werden.

Methoden: Micromass-Kulturen wurden aus mesenchymalen Zellen der Gliedmaßenanlagen von Hühnerembryonen (Stadium HH20-22, Hamburger Hamilton). Die Blasteme wurden aseptisch isoliert und zu Einzelzellen dissoziiert und sodann in multiple-well-Platten gezüchtet. Die Kulturen wurden für mehr als 2 Wochen gezüchtet, um die Kulturdauer auszutesten. Eine ähnliche Methode wurde für die Züchtung entsprechender Zellen aus E11-12 alten Mäusembryonen angewandt, allerdings mit notwendigen Modifikationen; insgesamt ist die Züchtung von Micromass-Kulturen aus Mauszellen deutlich schwieriger. Cholinesterase-Aktivitäten wurden in den Kulturen mit der Karnovsky-Roots-Technik sichtbar gemacht. Es wurden unterschiedliche Expressionsmuster von AChE und BChE beobachtet, wobei die AChE mit fortgeschrittener Differenzierung korrelierte. Die Hemmung der AChE führte zu Störungen in der Knorpelbildung, die durch Alzianblau-Färbung kenntlich gemacht wurden. Dies dokumentiert eine wesentliche Rolle des cholinergen Systems bei der Knorpelbildung. Weitere Studien zur Rolle verschiedener Zytokine und Differenzierungsfaktoren (bFGF, BMPs, etc.) und ihrer Regulation durch das cholinerge System sind in Zusammenarbeit mit anderen APs im Gange.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

(i) Monate 12-24:

- Bestrahlungen der verschiedenen Zellkultursysteme (Röntgen, Alphastrahlung, Radon).
- Analyse der Expression cholinergischer Komponenten nach Bestrahlung

(ii) Monate 24-36:

- Analyse der Expressionsmuster cholinergischer Komponenten im transgenen Arthritis-Mausmodell.
- Analyse der Expression cholinergischer Komponenten nach Bestrahlung der transgenen arthritischen Mäuse.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 242.016,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Cardoso	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Projekt Grewis sollen die genetische und die entzündungshemmende Wirkung von dicht ionisierender Strahlung - insbesondere von Radon - untersucht werden. Neben Röntgen- und Alpha-Bestrahlungen sowie Experimenten mit Ionenstrahlen sollen Zellkulturen und Tiere in einer Radon Kammer exponiert werden, da die Radon-Exposition im Bereich des Strahlenschutzes sowie in der Therapie entzündlicher Erkrankungen eine wesentliche Rolle spielt. Chromosomenaberrationen in peripheren Lymphozyten und hämatopoetischen Stammzellen der Maus sollen als genetische Indikatoren analysiert und mit menschlichen Daten aus der Tumor- und Rheuma-Therapie verglichen werden. In Zell- und Tier-Versuchen soll die entzündungshemmende Wirkung von Radon mit molekularbiologischen Mitteln untersucht werden und mit Therapie Daten verglichen werden (siehe Antrag).

In unserem Teilprojekt (AP5) soll die Rolle des Transkriptionsfaktors NF- $\kappa$ B in der Vermittlung von anti-inflammatorischen Effekten nach Bestrahlung untersucht werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Konstruktion einer Radonkammer sowie physikalische Dosimetrie für die Bestrahlungsexperimente (GSI)  
 AP2: Biologische Dosimetrie, Untersuchung der Schadensinduktion durch Radon in Zellkulturen und Gewebe (TUD)  
 AP3: Abschätzung des Strahlenrisikos durch Untersuchung chromosomaler Aberrationen (GSI)  
 AP4: Untersuchung von zellulären und molekularen Interaktionen in Blutgefäßen und im Knochen (GSI)  
 AP5: *Die Rolle von NF- $\kappa$ B bei der anti-inflammatorischen Wirkung von Strahlung (TUD)*  
*NF- $\kappa$ B Expression in Knochen-resorbierenden Osteoklasten, Makrophagen, Endothelzellen: auf RNA-Ebene (mittels RT-PCR) und auf Protein-Ebene (mittels Western Blot/FACS Analyse); Einfluss von Strahlung auf die Expression von NF- $\kappa$ B; Aktivierung von NF- $\kappa$ B nach Bestrahlung; Transport in den Zellkern (mittels Immunfluoreszenz); Bindung an DNA Konsensus-Sequenzen, mittels EMSA (,electrophoretic mobility shift assay') und für das Gesamt-Genom mittels Chromatin-Immunpräzipitierung; Ausdehnung der Untersuchungen zur Aktivierung von NF- $\kappa$ B auf primäre menschliche Zellen (einschließlich Patientenproben) und auf Gewebe des RA Mausmodells; NF- $\kappa$ B Inhibierung durch Einschleusen des NEMO-Peptids in die Zellen (nach Choi u. a. 2003) oder durch NF- $\kappa$ B Knock-Down mittels siRNA; Auswirkung auf die genannten anti-entzündlichen Prozesse; Untersuchung von Expression und Aktivierung von NF- $\kappa$ B im cholinergen Signalweges*  
 AP6: Untersuchung entzündungshemmender Reaktionen durch cholinerge Mechanismen (TUD)  
 AP7: Inhibition der Schmerzentstehung durch Veränderung der Aktivität von Ionenkanälen (TUD)  
 AP8: Untersuchung der diskontinuierlichen Dosis-Effekt-Beziehung (DNA-Reparatur, Stressantwort, ROS) (GUF)  
 AP9: Untersuchung immunologischer Gefahrensignale und entzündlicher Reaktionen im Tiermodell (UKER)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Im Berichtszeitraum wurden:

- Die Expression von Protein der NF- $\kappa$ B Familie in primäre menschliche Osteoblasten und in Endothelzellen auf RNA-Ebene (mittels RT-PCR Analyse in Kooperation mit AP6) und auf Protein-Ebene (mittels Western Blot und In-situ-Immunfluoreszenz Färbungen) untersucht. Mit diesen Experimenten konnten wir nun aufzeichnen welche Proteine der NF- $\kappa$ B Familie in den Endothelzelllinien und Osteoblasten exprimiert sind.
- Ferner, haben wir die Translokation von NF- $\kappa$ B im Zellkern sowie als die Phosphorylierung von NF- $\kappa$ B p65 Untereinheit nach Aktivierung mittels Immunfluoreszenz Färbungen getestet.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Laufe der nächsten sechs Monate werden wir die oben beschriebenen und getesteten Methoden und Reagenzien benutzen um den Einfluss von Strahlung auf die Expression und Aktivierung von NF- $\kappa$ B zu untersuchen und - in einem zweiten Schritt - ob diese Änderung dosisabhängig ist. Unsere Ziele und die geplanten Arbeitsabläufe sind unten schematisch dargestellt:

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 723.992,40 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Löbrich	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Projekt GREWIS sollen die genetische und die entzündungshemmende Wirkung von dicht ionisierender Strahlung, insbesondere von Radon untersucht werden. Die hier vorgeschlagene interaktive Forschungsarbeit wird zu einem besseren Verständnis der Wirkung von Radon beitragen und die Auseinandersetzung von jungen Wissenschaftlern mit den vielseitigen Aspekten der Radon-Problematik fördern. Wir erwarten wichtige Erkenntnisse für den Strahlenschutz von langlebigen radioaktiven Isotopen und Verbesserungen in der therapeutischen Anwendung von Radon und der niedrig-dosierten Strahlentherapie nicht maligner Erkrankungen gewinnen zu können. Neben Röntgen- und  $\alpha$ -Bestrahlungen sowie Experimenten mit Ionenstrahlen sollen Zellkulturen und Tiere in einer Radonkammer exponiert werden, da die Radon-Exposition im Bereich des Strahlenschutzes und in der Therapie entzündlicher Erkrankungen eine wesentliche Rolle spielt. In Zell- und Tier-Versuchen soll die Entzündungs-hemmende Wirkung von Radon mit molekular-biologischen Mitteln untersucht werden und mit Therapie-Daten verglichen werden. GREWIS verfolgt einen neuen Ansatz: wissenschaftliche Techniken und Kenntnisse verschiedener Institute, auch von Fachleuten, die bis jetzt keine Strahlenbiologie betreiben, zusammen zu bringen und zu verknüpfen.

Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit dem Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GSI durchgeführt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Schwerpunkte des Forschungsvorhabens der AG Löbrich an der TUD sind folgende Untersuchungen:

- Bestrahlung von Zellkulturen mit einer  $^{241}\text{Am}$  -Quelle
- Bestimmung von  $\alpha$ -Teilchenspuren in zellulären Monolayern, lateral und in Bestrahlungsrichtung (mit und ohne Kollimator)
- Bestimmung von  $\alpha$ -Teilchenspuren in zellulären Multilayern; Ausdehnung und Reichweite der Spuren
- Etablierung von Auswerte-Algorithmen/Methoden/Konzepten zur Analyse konfokaler/ dekonvulierter Spurstrukturen
- Etablierung von Immunfluoreszenzfärbungen zum biodosimetrischen Nachweis von  $\alpha$ -Teilchen
- Empfindlichkeitsbestimmung: Schadenshintergrund im Gewebe (Foci pro Zelle), untere Nachweisgrenze (Foci pro Zelle)
- Charakterisierung / Zelltypisierung der jeweiligen Organe
- Erstellung von Eichkurven mit Röntgenstrahlen (zur Bestimmung von Äquivalenzdosen)
- Exposition von Mäusen mit Radongas
- Exposition mit unphysiologisch hohen Dosen zur Etablierung des Mausmodells zur Biodosimetrie
- Exposition mit physiologischen Dosen und fraktionierter Bestrahlung entsprechend einer Kuranwendung
- Analyse bestrahlter Mäuse direkt nach Exposition (Induktionspunkte)
- Zeitreihen über Minuten bis wenige Stunden zur Analyse von biologischen Diffusionskoeffizienten
- Zeitanalysen über Tage bis Wochen zur Langzeitwirkung einer Radonexposition

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In diesem Teilprojekt soll die hochsensitive  $\gamma$ H2AX-Foci Methode zur Bewertung der durch eine Radonexposition in verschiedenen Mausgeweben deponierten Strahlendosis eingesetzt werden. Da in diesem Berichtszeitraum die Radonexpositionskammer noch nicht einsatzbereit war, wurden Experimente mit zellulären Monolayern an der  $\alpha$ -Quelle durchgeführt. Da die Zellen hierfür auf Mylarfolie gezüchtet werden müssen, wurde zuvor die optimale Kulturbedingung (Collagen-A-Coating) ermittelt. Anschließend wurden sowohl HeLa-Zellen als auch 82-6-hTERT-Fibroblasten mit unterschiedlichen Dosen  $\alpha$ -Teilchen bestrahlt und die DNA-Schadensverteilung sowie die Schadensanzahl mit der  $\gamma$ H2AX-Foci-Methode in der G1- und der G2-Phase ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die Anzahl der  $\gamma$ H2AX-Foci einer Poisson-Verteilung folgte. Diese diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung von DNA-Schäden war aufgrund des radioaktiven Zerfallsprozesses der  $^{241}\text{Am}$ -Quelle zu erwarten gewesen.

Nach Abschluss der *in vitro*-Vorexperimente mit der  $\alpha$ -Quelle konnten im Berichtszeitraum zwei Experimente mit beschleunigten Ionen am SIS-Beschleuniger der GSI durchgeführt werden. Da die zu bestrahlenden C57BL/6-Mäuse während der Bestrahlungsprozedur narkotisiert und fixiert sein mussten, wurde zuvor in Zusammenarbeit mit Prof. Ralf Galuske von der TU Darmstadt eine Isofluran-Inhalationsnarkosekammer entwickelt, gebaut und getestet. Die Narkosekammer stellte sicher, dass die zu bestrahlenden Mäuse einer konstanten Konzentration des Narkosegases Isofluran ausgesetzt waren bei gleichzeitiger ausreichender Versorgung mit Sauerstoff. Eine schonende Fixierung der Mäuse innerhalb der Narkosekammer stellte sicher, dass die Tiere immer exakt zum Strahlaustrittsfenster hin orientiert blieben, um eine gleichmäßige Bestrahlung des gesamten Körpers sicher zu stellen.

Nach erfolgreichem Abschluss der Narkosetests wurden die Tiere mit niedrigen Fluenzen C- und Ti-Ionen bestrahlt, um eine möglichst vergleichbare Situation zur geplanten Radonexposition zu erreichen. Die niedrigste verwendete Fluenz lag bei  $7,5 \times 10^3$  Ionen pro  $\text{cm}^2$ . Die Mäuse wurden 15 min bzw. 8 h oder 24 h nach Bestrahlung euthanasiert und die zu untersuchenden Organe (Herz, Niere, Lunge, Darm, Milz, Gehirn, Augen) fixiert. Anschließend wurden histologische Dünnschicht-Schnitte der Organe angefertigt und eine  $\gamma$ H2AX-Immunfluoreszenzfärbung durchgeführt. Erste Analysen der gefärbten Schnitte zeigen, dass sogar bei der sehr niedrigen Fluenz von  $7,5 \times 10^3$  Ionen pro  $\text{cm}^2$  Ionendurchgänge durch verschiedene Organe nachweisbar sind (ausgewertet wurden bisher Auge, Gehirn, Leber).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im ersten Halbjahr 2013 sind die biodosimetrischen Auswertungen der Kohlenstoff- und Titan-Ionen bestrahlten Mausorgane geplant sowie im 2. Quartal erste Versuche mit der Radon-Expositionskammer. Die Erfahrungen mit den Ti- und C-Ionen-bestrahlten Mäusen stellen die Grundlage der zukünftigen biologischen Dosimetrie nach Radon-Exposition dar. Für die retrospektive Biodosimetrie werden zurzeit Auswerte-Algorithmen entwickelt und Methoden zur halbautomatischen Analyse dekonvulierter 3D-Bildstapel der  $\gamma$ H2AX-gefärbten Gewebeschnitte.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 280.992,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> PD Dr. Rödel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Für die anti-inflammatorische Wirkung einer niedrig dosierten Strahlentherapie (LD-RT: Low Dose Radiation Therapy) konnten in den vergangenen Jahren eine Reihe zugrunde liegender Mechanismen beschrieben werden. Bemerkenswerterweise zeigten die in diesem Zusammenhang bekannten Effekte nicht-lineare und biphasische Dosis-Effekt-Beziehungen, deren ursächliche Mechanismen noch nicht bekannt sind. In dem Projekt soll entsprechend die Fragestellung, ob und in welchem Umfang die Anwendung von Radon und dicht-ionisierender Strahlung, ebenso wie eine Bestrahlung mit niedrigen Dosen von Röntgenstrahlen, *in vitro* und *in vivo* zu diskontinuierlichen Wirkungsbeziehungen führen und welche zugrunde liegenden molekularen Mechanismen existieren, untersucht werden. Dazu werden als mögliche übergeordnete Regulationsmechanismen die Rolle der DNA-Reparatur, der zellulären Stressantwort und der Aktivität von reaktiven Sauerstoffradikalen bzw. antioxidativen Systemen in der Modulation von Entzündungsprozessen evaluiert. Diese Untersuchungen bilden zudem eine Grundlage für ein vertieftes Verständnis der Modulation von Adhäsionsprozessen (TP Fournier), der NF- $\kappa$ B-Aktivierung (TP Cardoso), des cholinergen System (TP Layer) und von Ionenkanälen (TP Thiel) nach Bestrahlung.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Entsprechend der zuvor formulierten Hypothese ist das Untersuchungsprogramm in folgende Arbeitspakete (AP) gegliedert.

- AP1: Der erste Themenkomplex beinhaltet mechanistische Untersuchungen zur Rolle der DNA-Doppelstrangbruchreparatur für die Ausprägung von diskontinuierlichen Dosis- Wirkungsbeziehungen in Endothelzellen und Leukozyten nach Radon-, Photonen- und Kohlenstoff-Bestrahlung.
- AP2: Gegenstand dieses Themenkomplexes sind Analysen zur Relevanz der zellulären Stressantwort (Hitzeschockproteine, Danger Signale) in Endothelzellen und Leukozyten.
- AP3: In diesem Arbeitspaket wird konsekutiv in Endothelzellen und Leukozyten die Produktion von Reactive Oxygen Species (ROS) und die Rolle antioxidativer Systeme (Gluthation und Glutamylcysteinsynthase) mit der Induktion/Ausprägung von diskontinuierlichen Dosis-Wirkungsbeziehungen und der Modulation von Entzündungsprozessen in Beziehung gesetzt.
- AP4: Unklar ist zudem, in welchem Ausmaß distinkte Dosen an Radon und Röntgenstrahlen zu diskontinuierlichen Dosis-Effekt-Beziehungen *in vivo* beitragen. Gegenstand des Themenkomplexes stellen Untersuchungen zur Relevanz möglicher Schlüsselmechanismen (DNA-Reparatur, Transkriptionsfaktoren, ROS) für nicht-lineare Dosis-Wirkungsbeziehungen im Modell der hTNF- $\alpha$  transgenen Maus dar.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nach Besetzung der Post-Doktoranden Position (Dr. S. Reichert) zum 01.10.2012 konnte vollumfänglich mit der Bearbeitung des AP1 und mit Etablierungsarbeiten für das AP2 begonnen werden.

Dabei zeigte sich im AP1 nach Analyse residueller DNA-Doppelstrangbrüche (Nachweis von Phosphohiston- $\gamma$ H2AX- und 53BP1-Foci) in immortalisierten und stimulierten (TNF- $\alpha$ , Zugabe vier Stunden vor Bestrahlung) EA.hy926 Endothelzellen, nicht jedoch in primär isolierten Nabelschnur-Endothelzellen (HUVEC), eine diskontinuierliche Dosis-Wirkung-Beziehung mit erhöhter Anzahl von  $\gamma$ H2AX-Foci nach Bestrahlung mit einer Dosis von 0,5 Gy. Der Nachweis einer Induktion von Zellzyklus-Arrest und Apoptose ist jedoch noch inkonsistent, von Zelltyp und Stimulationbedingungen anhängig und bedarf weiterer Untersuchungen.

Für die Analyse der zellulären Stressantwort nach niedrig dosierter Bestrahlung (AP2) wurden bereits geeignete Detektionsantikörper für Hsp70, Hsp90 und HMGB1 für Immunoblot- und Immunfluoreszenzanalysen etabliert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten in AP1 werden von Herrn Dr. Reichert selbständig, dem Zeitplan entsprechend weitergeführt und auf Untersuchungen an Lymphozyten aus dem peripheren Blut (PBMC) erweitert. Im Rahmen des AP2 werden Dosis und Zeitkinetiken erstellt und die funktionelle Bedeutung von Hsp und HMGB1 mittels RNA-Interferenz (siRNA) evaluiert. Parallel dazu werden die Methoden zur Bearbeitung von AP3 (Nachweis von Reaktiven Sauerstoff- (ROS) und Stickstoffmetaboliten (NOS) etabliert und für Endothelzellen und Lymphozyten optimiert.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Rödel F., Frey B, Manda K, Hildebrandt G, Hehlhans S, Keilholz L, Seegenschmidt H, Gaipf U, Rödel C.: Immunomodulatory Properties and Molecular Effects in Inflammatory Diseases of Low-dose X-Irradiation. *Front Oncol* 2012;2:120.

Frey B, Stache C, Rubner Y, Werthmüller N, Schulz K, Sieber R, Semrau S, Rödel F, Fietkau R, Gaipf US.: Combined treatment of human colorectal tumor cell lines with chemotherapeutic agents and ionizing irradiation can in vitro induce tumor cell death forms with immunogenic potential. *J Immunotoxicol* 2012;9:301-13.

Frischholz B, Wunderlich R, Rühle PF, Schorn C, Rödel F, Keilholz L, Fietkau R, Gaipf US, Frey B.: Reduced secretion of the inflammatory cytokine IL-1 $\beta$  by stimulated peritoneal macrophages of radiosensitive Balb/c mice after exposure to 0.5 or 0.7Gy of ionizing radiation. *Autoimmunity* 2012 epub ahead of print.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 017G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.02.2012 bis 31.07.2015	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 292.116,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> PD Dr. Gaipf	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die entzündungshemmende und –modulierende Wirkung von Radon und X-rays (Low Dose Radiation Therapy, LDRT) soll *in vitro* und *in vivo* untersucht werden. Der Fokus vom Teilprojekt G liegt auf der Analyse von immunologischen Gefahrensignalen und der Modulation der Entzündung in humanen Tumornekrosefaktor- $\alpha$  (hTNF- $\alpha$ ) transgenen Mäusen (entwickeln eine chronische Polyarthrit) und in Patienten mit entzündlichen Erkrankungen nach Therapie mit LDRT oder Radon. Ein Hauptziel ist der Vergleich des spezifischen Immunstatus von Patienten, welche mit LDRT behandelt wurden mit solchen, welche in Radonbädern oder –stollen  $\alpha$ -Strahlung exponiert wurden. Mittels Mehrfarbendurchflusszytometrie werden Immunzell(sub)populationen im peripheren Blut der Patienten vor, während und nach der Exposition analysiert. Des Weiteren werden Monozyten des peripheren Blutes der Patienten *ex vivo* zu Makrophagen differenziert und deren funktionellen Aktivität (Phagozytose, Zytokinfreisetzungen, Vitalität) nach Exposition mit niedrig dosierter Strahlung unterschiedlicher Qualität bestimmt und verglichen. In Abhängigkeit der Ergebnisse der Immunzellpopulations-Analysen, werden analoge funktionelle Tests mit anderen Immunzellen durchgeführt. Das zweite Hauptziel ist die Aufdeckung der zellulären und molekularen Mechanismen, welche zur Verbesserung des Krankheitsverlaufes der chronischen Polyarthrit in hTNF- $\alpha$  transgenen Mäusen nach Exposition mit X-rays und Radon führen. Die Radon-Exposition der Tiere wird beim Verbundpartner Dr. Kraft durchgeführt. Ein Fokus bei den Tiermodellen ist ebenfalls die Analyse von immunmodulierenden Gefahrensignalen und Untersuchungen von Inflammationsgewebe, Osteoklasteninfiltration und Knorpeldestruktion in den Gelenken der Mäuse. Das Biomaterial steht den anderen Projektpartnern für ihre Analysen zur Verfügung.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Arbeitshypothese ist, dass Röntgen- und/oder Radonbestrahlung die Populationen und Funktionen von Immunzellen sowie die Sekretion von Gefahrensignalen und Zytokinen moduliert und somit eine anti-entzündliche Mikroumgebung induziert.

- AP1: Bestimmung des spezifischen Immunstatus von Patienten vor, während und nach der Behandlung mit Röntgenstrahlung oder Radon Exposition.
- AP2: Funktionelle *ex vivo* Analysen von Monozyten/Makrophagen und weiteren Immunzellen von Patienten nach Behandlung mit LDRT oder Radon.
- AP3: Untersuchung des Krankheitsverlaufes der chronischen Polyarthrit an hTNF- $\alpha$  transgenen Mäusen nach Exposition mit X-rays oder Radon.
- AP4: Analyse von immunmodulierend wirkenden Gefahrensignalen im Serum der Mäuse vor, während und nach Exposition mit X-rays oder Radon.
- AP5: Untersuchung von Inflammationsgewebe, Osteoklasteninfiltration und Knorpeldestruktion in Gelenken der hTNF- $\alpha$  transgenen Mäuse vor und nach Bestrahlung mit unterschiedlichen Strahlenqualitäten und –dosen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die AP1-2 bzw. AP3-5 werden jeweils von einem naturwissenschaftlichen Doktoranden bearbeitet. Die Arbeiten

für die AP3-5 begannen 08/2012. Mit den Arbeiten der AP1-2 wurde 02/2012 begonnen. Der Fokus für das letztgenannte Projekt lag in diesem Berichtszeitraum auf **AP1**. In Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Klein (Radonbad, Staatsbad Bad Steben) wurde eine „RAD-ON01“-Studie ausgearbeitet. Der Ethikantrag ist fertiggestellt und wurde bei der Ethik-Kommission der Bayerischen Landesärztekammer zur Prüfung im Dezember eingereicht. Bei positivem Beschluss wird mit der Immunphänotypisierung der Radonbad-Patienten im März 2013 begonnen. Im Labor wurden hierfür die komplexen durchflusszytometrischen Mehrfarben-Messprotokolle für die umfangreiche Immunphänotypisierung der Patienten etabliert. In 15 Messungen können nun aus 1.5 ml Vollblut 32 Immunzell(sub)populationen mit deren Aktivierungszustand bestimmt werden. Die Erstellung von fixen Mess- und Auswerteprotokollen für die Immunphänotypisierung wird eine gleichbleibende Untersuchung für alle Patientenproben während der gesamten Studie erlauben. Zusätzlich soll im Vollblut der Patienten eine Bestimmung der Veränderung verschiedener entzündlicher und anti-entzündlicher Zytokine, mRNA-Transkripte und der Telomerase-Aktivität in den Leukozyten während der Radon-Therapie erfolgen.

**Zu AP2:** Die funktionellen *ex vivo* Analysen von Immunzellen werden fortgesetzt, sobald wir durch die durchflusszytometrischen Immunphänotypisierungen der Radonbad-Patienten Informationen darüber haben, welche Immunzellpopulation durch Radon besonders moduliert werden.

Beim 2. Projekt wurde der Fokus auf das **AP3** gelegt. Es wurde erfolgreich die Zucht der hTNF- $\alpha$  Mäuse etabliert, welche mittlerweile regelmäßig transgene Nachkommen hervorbringt, die zuverlässig genotypisiert werden können. Ein erster Versuch zeigte, dass bereits eine einmalige Bestrahlung mit X-ray von 0.5 Gy zu einer Verbesserung des Krankheitsbildes über mehrere Tage hinweg führt. Auch gibt es Hinweise darauf, dass sowohl eine systemische, als auch eine lokale Bestrahlung betroffener Gelenke zu einer Verbesserung in den behandelten Tieren führt. Zusätzlich wurde begonnen eine Mausosteoklastenkultur zu etablieren, um auch *ex vivo* den Einfluss von LDRT und Radon auf die Aktivierung und Differenzierung der Zellen parallel zu den zukünftigen Gewebeanalysen der Mäusen (AP 5) untersuchen zu können. Zurzeit wird an der Feinabstimmung der Zytokinzusammensetzung sowie weiterer (Serum-)Faktoren gearbeitet, um die Methode reproduzierbar nutzen zu können. Die Grundzüge der Methode sowie die Isolation von Knochenmarksmonozyten wurden bereits etabliert.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im AP1 soll möglichst bald mit der Immunphänotypisierung der Radon-Patienten aus Bad Steben begonnen werden. Bis dahin werden Vollblutproben von gesunden „Normalspender“ (NHD) und von einzelnen Patienten mit bekannter entzündlicher Erkrankung durchflusszytometrisch immunphänotypisiert. Zur Komplettierung der immunphänotypischen Bestimmung sollen die Vorbereitungen für die Analysen der mRNA-Transkripte und der Telomerase-Aktivität aus Vollblut beendet werden. Die Untersuchung der Zytokine wird von den Ergebnissen der durchflusszytometrischen Immunphänotypisierung abhängen und somit zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Die Arbeiten von AP3-5 werden fortgeführt, insbesondere werden hier Augenmerk auf den Vergleich der Auswirkung verschiedenen Strahlendosen (systemisch und lokal) auf den Krankheitsverlauf der hTNF- $\alpha$  Mäuse sowie der Untersuchung von Inflammationsgewebe, Osteoklasteninfiltration und Knorpeldestruktion in den Gelenken der behandelten Tieren, gelegt. Abhängig vom Fortschritt der Radonkammer und der Tierhaltungsgenehmigung vor Ort können auch hier erste Versuche stattfinden. Sobald die Etablierung der Mausosteoklastenkultur abgeschlossen ist, werden erste Versuche mit verschiedenen klinisch relevanten Strahlendosen erfolgen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Ott OJ, Jeremias C, Gaipf US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R. Radiotherapy for achillodynia: Results of a single-center prospective randomized dose-optimization trial. *Strahlenther Onkol.* 2012 Dec 21. [Epub ahead of print].

Frischholz B, Wunderlich R, Rühle PF, Schorn C, Rödel F, Keilholz L, Fietkau R, Gaipf US, Frey B. Reduced secretion of the inflammatory cytokine IL-1 $\beta$  by stimulated peritoneal macrophages of radiosensitive Balb/c mice after exposure to 0.5 or 0.7Gy of ionizing radiation. *Autoimmunity.* 2012 Dec 5. [Epub ahead of print].

Ott OJ, Hertel S, Gaipf US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R. Benign painful shoulder syndrome: Initial results of a single-center prospective randomized radiotherapy dose-optimization trial. *Strahlenther Onkol.* 2012 Dec;188(12):1108-1113.

Rödel F, Frey B, Manda K, Hildebrandt G, Hehlhans S, Keilholz L, Seegenschmiedt MH, Gaipf US, Rödel C. Immunomodulatory properties and molecular effects in inflammatory diseases of low-dose x-irradiation. *Front Oncol.* 2012;2:120. doi: 10.3389/fonc.2012.00120. Epub 2012 Sep 25.

Ott OJ, Hertel S, Gaipf US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R. Benign painful elbow syndrome. First results of a single center prospective randomized radiotherapy dose optimization trial. *Strahlenther Onkol.* 2012 Oct;188(10):873-7.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 024A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 310.026,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hornhardt	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundprojekt sollen in humanen Zelllinien mit genau charakterisierter Strahlenempfindlichkeit veränderte Gene bzw. Proteine erfasst werden. Durch eine integrative Analyse von molekularen Daten verschiedener Ebenen (Genom, Transkriptom, Epigenom, Proteom und Phosphoproteom) sollen deregulierte Netzwerke und deren zentrale Effektorgene/-proteine identifiziert werden. Über funktionelle *in vitro* und *in vivo* Analysen soll die Bedeutung von Kandidatengenomen in der Signalkaskade nach Strahlenschädigung in den verschiedenen Arbeitspaketen näher untersucht werden, dabei insbesondere bereits im Vorhaben 02NUK007C identifizierte Kandidatenproteine. Über zeitaufgelöste Perturbationsexperimente und die Erstellung mathematischer Modelle aus den gewonnenen Daten sollen involvierte Signalkaskaden und potentielle molekulare Angriffspunkte systembiologisch erfasst werden. Mit Hilfe von *in vitro* und *in vivo* (Maus-Xenograft) Experimenten wird dann verifiziert, ob und wie molekular zielgerichtete strahlensensibilisierende und -protektive Substanzen („small molecules“) diese Signalwege beeinflussen. Ziel ist, die molekularen Mechanismen der strahlensensitivitätsmodulierenden Netzwerke und die Wirkung dieser pharmakologischen Substanzen aufzuklären.

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern und 6 Arbeitspaketen (AP): Bundesamt für Strahlenschutz, AG-SG1.1, Koordination und AP1 (Dr. S. Hornhardt, Dr. M. Gomolka), Helmholtzzentrum München, Abteilung für Strahlenzytogenetik, AP2 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. V. Zangen), AP3 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. K. Unger), Charite Berlin, Institut für Pathologie, AP4 (Prof. Dr. Nils Blüthgen), Universitätsklinikum Essen, Institut für Zellbiologie, AP5 (Prof. Dr. V. Jendrossek), LMU München, Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie, AP6 (Prof. Dr. Prof. Dr. K. Lauber).

In dem hier vorliegenden Bericht wird AP1 „Identifizierung und Validierung von Targetproteinen“ beschrieben. Ziel ist, strahlenregulierte Proteine in strahlenempfindlichen und strahlenresistenten Zellen zu identifizieren. Es wird davon ausgegangen, dass sich unterschiedlich strahlenempfindliche Zellen in ihrer Strahlenantwort unterscheiden. Die veränderte Expression der Proteine nach Bestrahlung wird durch Proteomanalyse erkannt. In die Untersuchungen gehen sowohl bereits charakterisierte humane Zellen (02NUK007C), als auch an Kandidatengenomen regulierte Zelllinien und strahlenresistente Zelllinien der Verbundpartner ein.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Identifizierung und Validierung von Targetproteinen

- Proteom-Profile von Zellkulturmodellen strahlenüberempfindlicher normaler Zellen und strahlenresistenter HNSCC-Zellen (BfS/ HMGU/ LMU)
- Validierung regulierter Proteine in Proteinextrakten aus den verschiedenen Zelllinien und zusätzlich in Proteinextrakten aus stimulierten/ nicht-stimulierten Lymphozyten (BfS)
- Proteom-Profile von Modellzelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression von Targets (BfS/ HMGU/ LMU)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Zu 1. Für die Generierung der Proteom-Profile mit Hilfe der 2D-DIGE-Analyse wurden 2 strahlenüberempfindliche und eine resistente normale lymphoblastoide Zelllinie kultiviert, mit 10 Gy (137Cs-Quelle) bestrahlt und 4 h und 24 h post-Bestrahlung für die 2D-Proteomanalyse mit eingegrenzten pH-Bereichen (pH 4-7 und pH 6-11) geerntet, lysiert und die Proteinkonzentration bestimmt (1. biologisches Replikat von 4).  
3 OKF6-Zelllinien (1 strahlenresistente FancA-überexprimierende Zelllinie, 1 Vektorkontrolle sowie 1 Linie ohne Vektor; HMGU) wurden für die Etablierung der 2D-Analyse kultiviert, geerntet und die Proteinkonzentration bestimmt.
- Zu 2. Nach der Proteom-Analyse sollen weitere strahlenregulierte Kandidatenproteine in den o. g. Zelllinien sowie in 11 weiteren lymphoblastoiden Zelllinien, als auch in stimulierten und nicht-stimulierten humanen B-Lymphozyten mittels Westernblot getestet werden. Die Kultivierung und Bestrahlung (1. biologisches Replikat von 4) mit 10 Gy und anschließender Ernte nach 4 h und 24 h der lymphoblastoiden Zelllinien sowie die Proteinbestimmung sind abgeschlossen.
- Zu 3. Die Zelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression sind noch nicht generiert.

Austausch und Planung mit AP2, Datenübergabe des Vorgängerprojektes an AP3 sind abgeschlossen.

Das Kick-Off-Meeting fand am 4. Dezember 2012 im BfS, München-Neuherberg, statt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Posterausstellung bei der 15. Jahrestagung der Gesellschaft für biologische Strahlenforschung (GBS) zusammen mit der 12. Tagung der Deutschen Gesellschaft für DNA-Reparatur (DGDR) vom 17.-20. September 2012 in München:

A. Guertler, N. Kunz, S. Hornhardt, U. Kulka, U. Roessler, A.A. Friedl, M. Gomolka: Radiation response on protein level in lymphoblastoid cell lines with different radiosensitivity

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 024B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 377.780,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Unger	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundprojekt sollen in humanen Zelllinien mit genau charakterisierter Strahlenempfindlichkeit veränderte Gene bzw. Proteine erfasst werden. Durch integrative Analyse von molekularen Daten verschiedener Ebenen (Genom, Transkriptom, Epigenom, Proteom und Phosphoproteom) sollen deregulierte Netzwerke und deren zentrale Effektorgene/-proteine identifiziert werden. Über funktionelle *in vitro* und *in vivo* Analysen soll die Bedeutung von Kandidatengen in der Signalkaskade nach Strahlenschädigung in den verschiedenen Arbeitspaketen näher untersucht werden, dabei insbesondere bereits im Vorhaben 02NUK007C identifizierte Kandidatenproteine. Über zeitaufgelöste Perturbationsexperimente und die Erstellung mathematischer Modelle aus den gewonnenen Daten sollen involvierte Signalkaskaden und potentielle molekulare Angriffspunkte systembiologisch erfasst werden. Mit Hilfe von *in vitro* und *in vivo* (Maus-Xenograft) Experimenten wird dann verifiziert, ob und wie molekular zielgerichtete strahlensensibilisierende und -protektive Substanzen („small molecules“) diese Signalwege beeinflussen. Ziel ist, die molekularen Mechanismen der strahlensensitivitätsmodulierenden Netzwerke und die Wirkung dieser pharmakologischen Substanzen darauf aufzuklären.

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern: Bundesamt für Strahlenschutz, AG-SG1.1, Koordination und AP1 (Dr. S. Hornhardt, Dr. M. Gomolka), Helmholtzzentrum München, Abteilung für Strahlenzytogenetik, AP2 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. V. Zangen), AP3 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. K. Unger), Charite Berlin, Institut für Pathologie, AP4 (Prof. Dr. Nils Blüthgen), Universitätsklinikum Essen, Institut für Zellbiologie, AP5 (Prof. Dr. V. Jendrossek), LMU München, Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie, AP6 (Prof. Dr. Prof. Dr. K. Lauber).

In dem hier vorliegenden Bericht werden AP2 „Identifizierung von Targetproteinen mittels genomischer und epigenomischer Charakterisierung“ und AP3 „Integrative Datenanalyse“ beschrieben.

Zwischen AP2 und den restlichen Arbeitspaketen besteht ein enger thematischer und methodischer Austausch. Die in AP2 generierten Zelllinien werden an AP1 für die proteomischen Analysen und an AP5 für *in vitro* und *in vivo* Untersuchungen weitergegeben. Die in AP2 generierten Daten werden an AP3 für die integrative Datenanalyse sowie an AP4 zur Systemanalyse von Kandidatengen übermittelt. Die in AP6 generierten strahlenresistenten Zelllinien werden in AP2 Omics-charakterisiert.

Im Berichtszeitraum wurden bereits drei Zelllinien an AP1 für die Proteomanalyse übergeben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP2: „Identifizierung von Targetproteinen mittels genomischer und epigenomischer Charakterisierung“

- Generierung von HNSCC-Tumorzelllinien oder hTERT immortalisierten normalen Zellen mit über- und unterexprimierten Targets (FancA, MCM7 und SerpinB9) (HMGU /LMU)
- „Omics“-Charakterisierung von Zelllinien-Modellen aus AP2.1 mit über- und unterexprimierten Targets (FancA, MCM7 und SerpinB9) (HMGU)
- „Omics“-Charakterisierung von Zellkulturmodellen strahlenüberempfindlicher normaler Zellen und strahlenresistenter Zellen aus dem Hals-Kopf-Bereich (HMGU/ BfS/ LMU)

AP3: „Integrative Datenanalyse“

- Primäranalyse und Organisation der Daten aus der „omics“-Charakterisierung von Zelllinien aus AP2 (HMGU/ BfS/ LMU)
- Integration der Daten der verschiedenen molekularen Ebenen und der Phänotypisierungs Daten aus AP1 und AP2 (HMGU/ BfS/ LMU/ IFZ)
- Berechnung von Korrelationsmatrizen aus Daten der verschiedenen molekularen Ebenen (HMGU)
- Identifizierung der molekularen Regulationsnetzwerke und Zielmoleküle zur Strahlenüberempfindlichkeit/-resistenz (HMGU/ CUB)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2:

Im Berichtszeitraum wurden primäre Zelllinien aus dem Kopf-Hals-Bereich (aus Tumor- und Normalgewebe) für die geplanten Transfektionsexperimente (Über- und Unterexpression von Targetgenen) subkloniert. Die erhaltenen Klone wurden expandiert und kryokonserviert. Erste Experimente zur Charakterisierung der Klone wie Wachstumskurven und immunhistochemische Analyse der Zytokeratinexpression zum Nachweis epithelialer Zellen wurden begonnen.

AP3:

- Die Daten der 2D-DIGE und den miRNA Analysen an den LUCY Zelllinien (BfS) von AP2 wurden an AP3 übergeben und auf einem sicheren Dateiserver abgelegt. Die Daten wurden präprozessiert und die Datenpunkte innerhalb eines Datensatzes und die Datensätze hinsichtlich ihrer Qualität gefiltert.
- Die bereits vorhandenen Phänotypisierungsdaten aus AP2 wurden bereits übergeben und gespeichert und werden mit den zu generierten Daten komplementiert.
- Die Berechnung der Korrelationsmatrizen basiert auf Daten aus AP2, die erst noch generiert werden müssen.
- Die Identifizierung der molekularen Regulationsnetzwerke schließt sich an die Ergebnisse aus 2. und 3. an.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2:

Die Klonierung primärer Zelllinien aus dem Kopf-Hals-Bereich und die Charakterisierung der generierten Subklone werden weitergeführt. In Abstimmung mit dem IFZ und der LMU wird eine definierte Anzahl an Zelllinien aus dem Kopf-Hals-Bereich für die Analysen in den verschiedenen APs ausgewählt. Es werden dann Zellkultursysteme etabliert, die eine induzierbare Targetgenexpression ermöglichen und so durch die funktionelle Analyse der Targetgene deren Effekt auf die Strahlenempfindlichkeit der Zellen erfassen.

AP3:

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Klinikum der Universität München, Marchioninstr. 15, 81377 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 024C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 328.608,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Lauber	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundprojekt sollen in humanen Zelllinien mit genau charakterisierter Strahlenempfindlichkeit veränderte Gene bzw. Proteine erfasst werden. Durch integrative Analyse von molekularen Daten verschiedener Ebenen (Genom, Transkriptom, Epigenom, Proteom und Phosphoproteom) sollen deregulierte Netzwerke und deren zentrale Effektorgene/-proteine identifiziert werden. Über funktionelle *in vitro* und *in vivo* Analysen soll die Bedeutung von Kandidatengenen in der Signalkaskade nach Strahlenschädigung in den verschiedenen Arbeitspaketen näher untersucht werden, dabei insbesondere bereits im Vorhaben 02NUK007C identifizierte Kandidatenproteine. Über zeitaufgelöste Perturbationsexperimente und die Erstellung mathematischer Modelle aus den gewonnenen Daten sollen involvierte Signalkaskaden und potentielle molekulare Angriffspunkte systembiologisch erfasst werden. Mit Hilfe von *in vitro* und *in vivo* (Maus-Xenograft) Experimenten wird dann verifiziert, ob und wie molekular zielgerichtete strahlensensibilisierende und -protektive Substanzen („small molecules“) diese Signalwege beeinflussen. Ziel ist, die molekularen Mechanismen der strahlensensitivitätsmodulierenden Netzwerke und die Wirkung dieser pharmakologischen Substanzen darauf aufzuklären.

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern: Bundesamt für Strahlenschutz, AG-SG1.1, Koordination und AP1 (Dr. S. Hornhardt, Dr. M. Gomolka), Helmholtzzentrum München, Abteilung für Strahlenzytogenetik, AP2 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. V. Zangen), AP3 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. K. Unger), Charite Berlin, Institut für Pathologie, AP4 (Prof. Dr. Nils Blüthgen), Universitätsklinikum Essen, Institut für Zellbiologie, AP5 (Prof. Dr. V. Jendrossek), LMU München, Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie, AP6 (Prof. Dr. K. Lauber).

In dem hier vorliegenden Bericht wird AP6 „Einfluss potenziell radiosensitiverender und radioprotektiver Substanzen“ beschrieben. Ziel ist die Generierung verschiedener radioresistenter HNSCC-Zellklone aus HPV-positiven und -negativen Ausgangszelllinien. Anschließend soll versucht werden, diese mit Hilfe von molekular zielgerichteten Substanzen, die die Signalwege der Strahlenresistenz adressieren, *in vitro* und *in vivo* zu radiosensibilisieren.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket 6: Einfluss potenziell radiosensitiverender und radioprotektiver Substanzen

Generierung von strahlenresistenten HNSCC-Zelllinien für AP1, AP2 und AP4 (HMGU/ LMU)

*In vitro*-Analyse der Strahlenwirkung nach Modulation durch Substanzen, die zielgerichtet in Signalwege angreifen, die im Rahmen des Projektverbundes als potentielle Zielstrukturen für eine therapeutische Manipulation der Strahlenempfindlichkeit identifiziert wurden (LMU/ CUB)

*In vivo*-Analyse der Strahlenwirkung nach Behandlung mit Substanzen, die unter AP6.2. strahlensensitivitätsmodulierende Wirkung gezeigt haben (LMU/ IFZ)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Zu 1. Mit der Generierung radioresistenter HNSCC-Zelllinien wurde begonnen. Hierzu wurden verschiedene kommerziell erhältliche und in der Literatur beschriebene HNSCC-Zelllinien erworben, ihre Kultivierung etabliert und die inhärente Strahlensensitivität (Endpunkt Koloniebildung) bestimmt. Von 2 Linien, die eine besonders hohe Strahlensensitivität zeigten, wurden strahlenresistente Klone hergestellt. Hierzu wurden die Zellen 5x mit 2 Gy bestrahlt und limitierend verdünnt kloniert. Die resultierenden Klone wurden expandiert und werden zurzeit hinsichtlich ihrer Strahlenresistenz in Koloniebildungs- und Viabilitätstests charakterisiert.
- Zu 2. Im Rahmen des Projektverbunds sind bisher noch keine potentiellen Zielstrukturen für eine therapeutische Manipulation identifiziert worden. Zurzeit werden daher Targeted Agents, die von anderen Tumorentitäten her bekannt sind und viel versprechende Ergebnisse gezeigt haben, hinsichtlich ihrer radiosensibilisierenden Eigenschaften auf HNSCC-Zelllinien getestet.
- Zu 3. Die behördliche Genehmigung zur Durchführung der geplanten *in vivo* Experimente wurde eingeholt. Zur Etablierung der heterotopen Xenograft-Modelle, an denen die strahlensensitivitätsmodulierende Wirkung der in 2.) erfolgreich getesteten Substanzen *in vivo* untersucht werden soll, wurden die erworbenen HNSCC-Zelllinien mit AP5 ausgetauscht, und mit der Etablierung wurde begonnen.

Austausch von Zelllinien mit AP2 und AP5.

Das Kick-Off-Meeting fand am 4.Dezember 2012 statt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP6: Das formulierte Arbeitsprogramm wird wie geplant weiter bearbeitet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 024D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 364.656,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Jendrossek	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundprojektes sollen molekulare Zielstrukturen und Signalnetzwerke identifiziert werden, die eine Strahlenüberempfindlichkeit bzw. -resistenz von Tumor- und Normalgewebszellen determinieren, um so neue Ansatzpunkte für die therapeutische Modulation der Strahlenempfindlichkeit zu erhalten. Hierzu werden humane Zelllinien mit definierter Strahlenempfindlichkeit auf verschiedenen molekularen Ebenen (Genom, Transcriptom, Epigenom, (Phospho)-Proteom) untersucht und die erhaltenen phänotypischen und molekularen Daten einer integrativen Datenanalyse unterzogen, um deregulierte Signalnetzwerke und zentrale Effektorgene/-proteine mit Bedeutung für die Strahlenempfindlichkeit zu identifizieren. Als *proof-of-concept* wird die Expression ausgewählter Kandidatengene in definierten Zellsystemen kontrolliert gesteigert bzw. gemindert, um die funktionellen Konsequenzen der veränderten Expression der Kandidatengene für die zelluläre Strahlenempfindlichkeit *in vitro* (Zellkultur) und *in vivo* (Xenograft-Mausmodell) zu verifizieren. Mithilfe zeitaufgelöster Perturbationsexperimente und mathematischer Modelle soll der Einfluss der veränderten Kandidatengen-Expression auf Signalnetzwerke modelliert und auf Basis dieser Modelle neue Angriffspunkte für potentielle radiosensibilisierende/ radioprotektive Substanzen vorher gesagt werden. Die Effektivität potentiell strahlensensitivitäts-modulierender Substanzen wird anschließend *in vitro* und *in vivo* überprüft.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Projekt ist Teilprojekt eines Verbundes dessen 6 Arbeitspakete von 5 Projektpartnern in München (BfS, LMU, HMGU), Berlin (CUB) und Essen (IFZ) gemeinsam bearbeitet werden.

- AP1: Identifizierung und Validierung von Targetproteinen
- AP2: Identifizierung von Targetgenen mittels (epi)genomischer Charakterisierung
- AP3: Integrative Datenanalyse
- AP4: Systemanalyse von Kandidaten-Targets
- AP5: Verifizierung von neuen molekularen Zielstrukturen
- AP6: Einfluss potenziell radiosensitiverender und radioprotektiver Substanzen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im vorliegenden Bericht werden Arbeiten des IFZ zu AP5 und AP6 vorgestellt.

AP5.1: Es wurden vorbereitende Arbeiten zur Untersuchung der Auswirkungen einer veränderten Expression der in AP1 identifizierten potentiell radiosensitivitäts-modulierenden Proteine mittels siRNA durchgeführt. Mittels Genom/Proteomanalysen wurde ein neues Protein mit potentieller Bedeutung für die Radiosensitivität identifiziert und erste Untersuchungen zur Bedeutung einer gesteigerten Expression dieses Proteins auf die Proliferation und das Zellüberleben nach Bestrahlung (0-10Gy  $\gamma$ -Strahlung) im Jurkat T-Lymphomzell-Modell durchgeführt. Außerdem wurden erste Untersuchungen zum Einfluss der veränderten Targetprotein-Expression auf die Art des Zelltodes durchgeführt; dabei wurde der Anteil an apoptotischen bzw. nekrotischen Zellen quantifiziert.

AP5.2: Um die Untersuchungen zu den Auswirkungen einer veränderten Expression potentiell radiosensitivitäts-modulierender Gene/Proteine auf das Tumorstadium und die Strahlenempfindlichkeit zu ermöglichen, wurde ein Antrag auf Genehmigung entsprechender Tierexperimente gestellt: „Evaluierung von potentiell Radiosensitivitäts-modulierenden Zielproteinen für das Tumorstadium und die Strahlenresistenz“. Dieses Tierversuchsvorhaben wurde am 1.10.2012 genehmigt. Im Rahmen der beschriebenen Experimente soll untersucht werden, ob sich durch Änderung der Expression der Kandidatenproteine die Tumorigenität, das Tumorstadium und/oder die Radiosensitivität von Tumorzellen verändern. Zusätzlich wurde ein Mausmodell zur Verifizierung von Radiohypersensitivität *in vivo* etabliert.

Ein erster Austausch von HNSCC-Zelllinien mit AP2 und AP6 ist erfolgt. Xenografttumoren dieser Zelllinien werden durch Injektion einer Tumorzellsuspension in das Subkutangewebe immundefizienter NMRI nu/nu Mäuse generiert (aktueller Versuch). Das Wachstum der experimentellen Tumoren wird kontinuierlich verfolgt (Ermittlung der Wachstumskurven). Es werden folgende Parameter erfasst: i) die Latenzzeit bis zum Anwachsen der Tumoren, ii) die Tumorzinzidenz, iii) die Zeit bis zum Erreichen eines Tumorstadiums von 1000 mm<sup>3</sup>.

AP6.3: Weiterhin wurden ein Xenotransplantationsmodell (NMRI nu/nu Mäuse) zu Testung potentiell Strahlensensitivitäts-modulierender Substanzen im HNSCC-Modell etabliert. Um die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Gabe von im Rahmen der Arbeiten in AP6.2 identifizierten Inhibitoren auf die Effektivität der Strahlentherapie *in vivo* zu ermöglichen, ist ein Antrag auf Genehmigung entsprechender Tierexperimente in Vorbereitung.

Die Einarbeitung der studentischen Hilfskraft Malagorzata Drabczyk in die erforderlichen *in vitro* Analysemethoden zur Messung der Zellproliferation, Zellvitalität, und Zelltodinduktion sowie in die tierexperimentellen Arbeiten ist erfolgt.

Das Kick-Off-Meeting des Verbundes fand am 4. Dezember 2012 im Bundesamt für Strahlenschutz in München statt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Charité – Universitätsmedizin Berlin, Charitéplatz 1, 10117 Berlin		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 024E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 375.564,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Blüthgen	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel ist die Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die der zellulären Strahlenüberempfindlichkeit und -resistenz von Tumor- und Normalgewebe zu Grunde liegen. Dabei soll der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert und zudem die zukunftsweisende Systembiologie in die Strahlenforschung integriert werden.

Das Projekt ist ein Verbundprojekt mit dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), dem Institut für Zellbiologie (IFZ) der Universitätsklinikum Essen, der Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie der Ludwig Maximilians Universität München (LMU), und der Abteilung für Strahlenzytogenetik des Helmholtz Zentrums München (HGMU).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

CUB ist federführend verantwortlich für die systembiologischen Analysen im Konsortialprojekt, das folgende Arbeitspakete umfasst:

- AP4.1: Eingrenzung der zu untersuchenden Pathways/Zeitpunkte: Mit Hilfe von Luminex-Messungen sollen geeignete Pathways und Zeitpunkte identifiziert werden.
- AP4.2: Semi-quantitative Analyse der Signalnetzwerke in ausgewählten Zelllinien: In ausgewählten Zelllinien werden Modelle der Signalnetzwerke erstellt.
- AP4.3: Validierung der Ergebnisse in einem breiteren Panel von Zelllinien. Vorhersagen des Modells werden in verschiedenen Zelllinien getestet.
- AP4.4: Simulation von Perturbation. Basierend auf dem Modell werden unterschiedliche (evtl. Kombinationen) von kleinmolekularen Inhibitoren verwendet.
- AP4.5: Identifizierung transkriptioneller regulatorischer Netzwerke anhand von Genexpressionsdaten. Aus den Genexpressionsdaten werden regulatorische Netzwerke identifiziert mit Hilfe von mathematischen Modellen sowie Wissen aus Datenbanken.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Die Aufgaben der CUB hängen von noch zu generierenden Daten und Lysate aus Zelllinien der Konsortialpartner ab. Deswegen kann mit den Arbeiten erst begonnen, sobald diese vorliegen. SOPs für die Proteomics-Analysen wurden versandt. Vorbereitende Arbeiten wie die Etablierung der Datenerstellungs-, Normalisierungs- und Modellierungspipeline werden durch anderweitig finanziertes Personal durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Sobald die Transkriptomdaten oder Lysate der Zelllinien vorliegen, wird mit den jeweiligen Arbeitspaketen begonnen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 025A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 361.107,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Ritter	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das vorrangige wissenschaftliche Anliegen des Projektes ist es, zu einem besseren Verständnis der zytotoxischen und genotoxischen Wirkung ionisierender Strahlung während der pränatalen Entwicklung des Menschen beizutragen. Als In-vitro-Modell werden humane embryonale Stammzellen (hES-Zellen) verwendet. Im Forschungsvorhaben soll dabei die Wirkung von dünn ionisierender Röntgenstrahlung und dicht ionisierender Teilchenstrahlung in Abhängigkeit von der Dosis untersucht werden. Dicht ionisierende Strahlung hat bei gleicher Energiedosis eine höhere biologische Effektivität als dünn ionisierende Strahlung. Dies führte dazu, dass für  $\alpha$ -Teilchen und schwere Ionen ein Qualitätsfaktor von 20 festgelegt wurde. Detaillierte Messungen an den weltweit einmaligen Beschleunigeranlagen des GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung bieten die einzigartige Möglichkeit, die strahlenbiologische Wirkung dicht ionisierender Strahlen in dem gesamten für den Strahlenschutz relevanten Bereich zu präzisieren.

Weiterhin kann das Projekt zu neuen Erkenntnissen im Bereich der Grundlagenforschung führen. Es ist vor allem von hoher Relevanz für das Verständnis der DNA-Reparaturmechanismen von hES-Zellen. Bisher ist nur wenig über die Reparatur von DNA-Schäden in pluripotenten hES-Zellen oder ihren differenzierten Abkömmlingen bekannt. In vorangegangenen Studien wurde bislang nur die Wirkung von dünn ionisierenden  $\gamma$ - oder Röntgenstrahlen im Ansatz untersucht, jedoch fehlen weitergehende Kenntnisse über die Genauigkeit der Reparaturprozesse in Abhängigkeit von der Dosis und der Strahlenqualität. Neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn leistet das Forschungsvorhaben einen wichtigen Beitrag zur Nachwuchsförderung und zum Kompetenzerhalt in der Strahlenforschung. Die jungen Projektmitarbeiter erhalten eine intensive wissenschaftliche Aus- bzw. Weiterbildung in der Strahlenforschung und in Fortbildungsveranstaltungen wird um potenziellen wissenschaftlichen Nachwuchs geworben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundvorhaben beinhaltet die folgenden Arbeitspakete (Teilprojekte):

- AP1: Untersuchung der Wirkung von Röntgen- und Ionenstrahlen auf pluripotente und differenzierte hES-Zellen (GSI Helmholtzzentrum, Dr. S. Ritter).
- AP2: Bewertung des Einflusses dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die neuronale Entwicklung (Universität Konstanz, Dr. S. Kadereit).
- AP3: Elektrophysiologische Untersuchung kardialer und neuraler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. Dr. C. Thielemann).

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

Umfangreichen Vorarbeiten wurden mit murinen embryonalen Stammzellen durchgeführt. Es wurden strahleninduzierte Apoptose, Chromosomenaberrationen, Zellüberleben und die Expression von Pluripotenzmarkern gemessen. Die Untersuchungen zeigen unter anderem, dass Zellen, die eine Bestrahlung mit Röntgenstrahlen oder Kohlenstoffionenstrahlen ( $LET = 75 \text{ keV}/\mu\text{m}$ ) überleben, Pluripotenzmarker exprimieren und weiterhin die Fähigkeit zur Differenzierung besitzen. Diese Vorarbeiten wurden abgeschlossen und die Daten zusammengefasst.

Unter Anleitung von Frau Dr. Kadereit (AP2) haben Projektmitarbeiter die Kultivierung von hES-Zellen (Linie H9) erlernt und damit begonnen „feeder layer“ Zellen sowie hES-Zellen zu vermehren und einzufrieren. Weiterhin wurde für H9-Zellen ein Protokoll zur Chromosomenpräparation etabliert und die genetische Stabilität der Stammkultur nach einer ca. 6-wöchigen Kultivierung mit Hilfe der Vielfarben Fluoreszenz In-situ-Hybridisierung überprüft. Die Analyse zeigte, dass die Zellen in diesem Zeitraum genetisch stabil sind, weniger als 2 % der Zellen wiesen strukturelle Chromosomenaberrationen auf.

Ergänzend wurde in Zusammenarbeit mit einem italienischen Gastwissenschaftler die sogenannte Q-FISH Methode etabliert, mit deren Hilfe die Telomerlänge in Metaphasezellen bestimmt werden kann. Erste Messungen bestätigten, dass hES-Zellen deutlich längere Telomere aufweisen als differenzierte Körperzellen. Weiterhin wurde ein erstes Experiment am Beschleuniger durchgeführt, um die Ablaufprozesse zu optimieren.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Eine Publikation über die Strahlenreaktion von murinen embryonalen Stammzellen (S. Luft et al.) wird vorbereitet und bei einer Fachzeitschrift eingereicht.

Die Arbeiten mit hES-Zellen werden intensiviert. Es ist geplant, die H9-Zellen genauer zu charakterisieren und erste Bestrahlungen mit Röntgenstrahlen durchzuführen. Insbesondere sollen Zellzyklusprogression, Apoptoserate, Induktion von Chromosomenaberrationen und die Expression von Pluripotenzmarkern untersucht werden.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Konstanz, Universitätsstr. 10, 78464 Konstanz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 025B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 170.268,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Kadereit	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das wissenschaftliche Anliegen dieses Teilprojektes ist es genauer zu untersuchen wie sich dünn ionisierende Röntgenstrahlung und dicht ionisierende Teilchenstrahlung auf die Entwicklung des menschlichen Nervensystems auswirken. Und zu vergleichen, ob in den Auswirkungen der beiden Strahlungsarten Unterschiede bestehen. Von Mausstudien und Versuchen mit Zelllinien ist bekannt, dass geringe Bestrahlung bereits zu Veränderungen in Genexpressionsmustern in Nervenzellen führen. Es soll nun anhand von hES-Zellen und abgeleiteten *in vitro* Nervensystem-Entwicklungsmodellen genau untersucht werden, inwieweit sich Bestrahlung auf die Entwicklung des menschlichen Gehirns auswirkt und welche Effekte man auf die verschiedenen Entwicklungstadien (Entstehung der ZNS Vorläuferzellen, NEPs, Entstehung von neuronalen Vorläuferzellen, Entstehung von Neuronenvorläuferzellen und deren Maturierung zu funktionellen Neuronen) beobachten kann. Besonders die Bestrahlung mit dicht ionisierender Teilchenstrahlung wird in Darmstadt in Zusammenarbeit mit AP1 ausgeführt werden. Desweiteren wird auch, in enger Zusammenarbeit mit AP3, aus hES-Zellen differenzierte Neuronen auf Funktionalität (elektrophysiologische Messungen auf MEAs) nach Strahlungsexposition untersucht.

Dieses Forschungsvorhaben leistet einen erheblichen Beitrag zur Kompetenzbildung und –erhaltung in der Strahlenforschung in Deutschland und fördert aktiv Nachwuchs mit interdisziplinärer Kompetenz in Strahlenforschung, Gehirnforschung, Zellbiologie und Molekularbiologie/Biochemie. Die Ergebnisse werden auf internationalen Kongressen vorgestellt und in hochrangigen Fachzeitschriften veröffentlicht.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundvorhaben beinhaltet die folgenden Arbeitspakete (Teilprojekte):

- AP1: Untersuchung der Wirkung von Röntgen- und Ionenstrahlen auf pluripotente und differenzierte hES-Zellen (GSI Helmholtzzentrum, Dr. S. Ritter)
- AP2: Bewertung des Einflusses dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die neuronale Entwicklung (Universität Konstanz, Dr. S. Kadereit).
- AP3: Elektrophysiologische Untersuchung kardialer und neuraler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. C. Thielemann).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2:

Seit der Beantragungsphase hat sich besonders System 3 (3-dimensionales Neurosphärenmodell aus hESC) als robusteres und für die frühe menschliche Entwicklung relevanteres Modellsystem erwiesen. In diesem System entwickeln sich neurale Zellen vom neuralen Stammzellstadium über neurale Vorläuferzellen bis hin zu neuronalen Vorläuferzellen und ersten Neuronen, in 3-dimensionaler Struktur die Morphogengradientenbildung erlauben. Einfluß von Chemikalien (insbesondere von Nanopartikeln) auf diese Prozesse ist im Detail untersucht und veröffentlicht worden (Hoelting et al., Arch Toxicol. 2012 Dec 2. [Epub ahead of print]). Dabei zeigte sich, dass das System fähig ist, Genexpressions-Änderungen unter Einfluß von Chemikalien im nicht zelltoxischen Bereich zu erfassen und klar einen Unterschied zwischen dem Einfluss von Nanopartikeln und Quecksilber (einem bekannten Toxikant für die Gehirnentwicklung) messen kann. Das System ist weiterhin innerhalb einer erfolgreichen Bachelorarbeit standardisiert worden, so dass Neurosphären einer bestimmten, auch niedrigen, Zellzahl erfolgreich generiert werden können. Dies wird den Vorteil haben, dass bei ersten Versuchen mit Röntgenstrahlen in Konstanz (nötiges Gerät ist vorhanden und benutzbar) mehr Wiederholungsversuche ausgeführt werden können bevor aufwändigere Versuche mit schweren Ionen in Darmstadt ausgeführt werden sollen. Desweiteren wurden die Wachstumseigenschaften der Neurosphären ausführlicher charakterisiert und gezeigt, dass nach 1 Woche in Neurosphärenkultur die Zellen sich nicht mehr viel teilen und anfangen zu neuronalen Vorläufern zu reifen. Es ist auch gezeigt worden, dass sich die Zellen im NEP Stadium einfrieren und problemlos auftauen lassen, was einen Transport nach Darmstadt für die geplanten Strahlenexperimente ermöglichen wird. Nach einem Auftauen formen die Zellen spontan und mit ausreichender Effizienz Neurosphären. Es wurde weitehin mit Kollegen in Dortmund eine Visualisierung von Zellen innerhalb der Neurosphären per Mikroskopie erarbeitet, ohne dass diese in Scheiben geschnitten werden müssen und wichtige 3-dimensionale Informationen verloren gehen. Diese Methodologie kann jetzt angewandt werden um nach Bestrahlung eventuell auftretende morphologische Änderungen innerhalb der Neurosphären zu erfassen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2:

System 1 und 3 werden als kontinuierliches System zusammengefasst werden um den Einfluss von Strahlen auf die verschiedenen Stadien der Entwicklung besser zu charakterisieren. System 1 ist das Vorläuferstadium der für System 3 in Neurosphären angesetzten Zellen. Es bietet sich somit an, beide Systeme als ein kontinuierliches System zu untersuchen und somit alle Stadien der frühen fetalen Gehirnentwicklung direkt in einem Modell abzudecken. Dabei werden in System 1 zunächst die Pax6 positiven Neuroepithelialzellen generiert (d. h. die allerersten Gehirnstammzellen), die dann für System 3 in Suspension umgesetzt werden um Neurosphären zu bilden, in denen sich dann diese frühen Gehirnzellen weiter entwickeln können. Dabei wird das kontinuierliche System 1/3 im adherenten Stadium und im Neurosphärenstadium zu verschiedenen Zeitpunkten mit Röntgenstrahlen bestrahlt werden. Funktionsanalyse (z. B. ändern sich bei den bestrahlten NEP Zellen die Stammzeleigenschaften und können sie schlechter/besser Neurosphären bilden?), Genexpressionsanalysen und Mikroskopie (für Einwirkung auf die Zellpopulationen innerhalb der Neurosphären) werden anschließend ausgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule für angewandte Wissenschaften – Fachhochschule Aschaffenburg, Würzburger Str. 45, 63743 Aschaffenburg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 025C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 3		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2012 bis 31.01.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2012 bis 31.12.2012	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 186.606,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Thielemann	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ein wesentliches Ziel des Projektes ist es, verlässliche Daten zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die frühe pränatale Entwicklung des Menschen zu liefern, um so zu einer realistischen Risikoabschätzung beizutragen. Insbesondere ist eine genauere Kenntnis der Strahlenwirkung auf die frühe Embryonalentwicklung (Präimplantationsperiode, beginnende Organbildung) dringend erforderlich, da die bisherige Risikoabschätzung mit großen Unsicherheiten behaftet ist und ausschließlich auf Tierexperimenten beruht. Als In-vitro-Modell sollen humane embryonale Stammzellen (hES-Zellen) verwendet werden.

Im *biomems* Labor von Frau Prof. Thielemann wurden in den letzten Jahren verschiedene 2D- und 3D-Zellkultursysteme aus primären Kardiomyozyten und Neuronen für toxikologische und strahlenbiologische Studien etabliert und die elektrophysiologischen Reaktion der Zellen mit einer nicht-invasiven Technik (Mikroelektrodenarray) analysiert. Die Analyse der Strahlenreaktion von Kardiomyozyten bildete hierbei den Schwerpunkt, da auf diesem Gebiet bereits umfangreiche Vorversuche in Zusammenarbeit mit der GSI durchgeführt wurden. Diese Methode soll auch im beantragten Forschungsvorhaben eingesetzt werden.

Um die elektrophysiologische Reaktion der Zellen kurz vor bzw. nach einer Strahlenexposition messen zu können, soll für die Dauer der Projektlaufzeit an der GSI ein Messsystem zur Aufnahme und Analyse der Daten aufgebaut werden. Weiterhin wird die Technik zu Kultivierung von humanen Kardiomyozyten und Neuronen auf MEA in Zusammenarbeit mit den anderen Projektteilnehmern etabliert. Es ist geplant, die Funktionalität von Neuronen und Kardiomyozyten, die aus unbestrahlten bzw. bestrahlten pluripotenten hES-Zellen differenziert wurden, näher zu charakterisieren. Im Vergleich dazu sollen bereits differenzierte Zellen bestrahlt und analysiert werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundvorhaben beinhaltet die folgenden Arbeitspakete (Teilprojekte):

- AP1: Untersuchung der Wirkung von Röntgen- und Ionenstrahlen auf pluripotente und differenzierte hES-Zellen (GSI Helmholtzzentrum, Dr. S. Ritter)
- AP2: Bewertung des Einflusses dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die neuronale Entwicklung (Universität Konstanz, Dr. S. Kadereit).
- AP3: Elektrophysiologische Untersuchung kardialer und neuraler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. Dr. C. Thielemann).

### **3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse**

AP3:

Wie bereits in Abschnitt 1 beschrieben wurden im biomems Labor verschiedene 2D- und 3D-Zellkultursysteme aus primären Kardiomyozyten und Neuronen etabliert und die elektrophysiologische Reaktion dieser Zellen mit einer nicht-invasiven Technik (Mikroelektrodenarray) analysiert. Im Rahmen dieses Projekts wurden die ersten Versuche mit primären Neuronen aus der Ratte durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass sich bereits innerhalb der ersten fünf Kultivierungstage ein neuronales Netzwerk ausbildet. Eine elektrische Aktivität in Form von Spikes oder Bursts konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

Als weiterer Vorversuch wurde ein Protokoll für die Präparation und Kultivierung hippocampaler Neurone eines Hühnerembryos (*Gallus gallus*) etabliert. Dabei zeigten sich jedoch Probleme bei der Kultivierung, die insbesondere das Adhäsionsverhalten der neuronalen Zellen auf der mit PDL (Poly-D-Lysin) und Laminin beschichteten Oberfläche des MEA-Chips betreffen. Die Ausbildung eines neuronalen Netzwerks konnte weder morphologisch, noch elektrophysiologisch nachgewiesen werden. Eine Optimierung des Protokolls ist daher erforderlich.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Es ist geplant, Neurone, die aus bestrahlten bzw. unbestrahlten pluripotenten hES-Zellen differenziert wurden, hinsichtlich ihrer Funktionalität genauer zu charakterisieren. Des Weiteren sollen bereits differenzierte Neurone bestrahlt und elektrophysiologisch analysiert werden. Hierfür sollen die Zellen auf Mikroelektroden Array Chips kultiviert, mit Röntgen- oder Ionenstrahlen bestrahlt und anschließend durch extrazelluläre Ableitung die elektrische Aktivität bestimmt werden. Die Zellkulturarbeiten erfolgen in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.

In den kommenden Monaten (März bis August) sind die ersten Röntgenversuche geplant. Die nächsten Strahlzeiten an der GSI sind dann für Herbst 2013 vorgesehen.

### **5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.



### 3 Verzeichnis der ausführenden Forschungsstellen

02 NUK 010G	<b>ANSYS Germany GmbH, Birkenweg 14a, 64295 Darmstadt</b> Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: CFD-Modellentwicklung und Validierung für die 3-dimensionale Simulation von Siedevorgängen in Brennelementen von DWR	38
02 NUK 016CX	<b>BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung GmbH, Achterstr. 30, 28359 Bremen</b> Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C	188
02 NUK 024A	<b>Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter</b> Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1	206
02 NUK 008E	<b>Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Ammerländer Heerstr. 114-118, 26129 Oldenburg</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Individuelle Dosisbestimmung und Berechnung	162
02 NUK 008D	<b>Charité - Universitätsmedizin Berlin, Hindenburgdamm 30, 14195 Berlin</b> Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Reduktion der Strahlenexposition von Patienten auf dem Gebiet der CT-Angiographie, der Abdomen-CT und der Dual Source CT	160
02 NUK 024E	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5	214
02 NUK 003A	<b>Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg</b> Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese	142
02 NUK 003D	<b>Elbe Kliniken Stade-Buxtehude gGmbH, Bremervörder Str. 111, 21682 Stade</b> Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Epigenetische Veränderungen, Schadensinduktion, Prozessierung und Reparatur	148
02 NUK 005A	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich</b> Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität	150
02 NUK 015E	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E	176

- 02 NUK 019C** Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C  100
- 02 NUK 020E** Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexbildung von f-Elementen; Teilprojekt E  114
- 02 NUK 021A** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A  116
- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27 c, 80686 München**
- 02 NUK 009C** Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Thermische Ermüdung in Kraftwerkkomponenten - Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen; TP: Lebensdauerbewertung mit atomistischen und schädigungsmechanischen Werkstoffmodellen  20
- 02 NUK 011A** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A  44
- 02 NUK 022B** Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt B: Extinktionsspektrometer zur Feuchtemessung in gemischtphasigen Systemen für die nukleare Sicherheitsforschung  60
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen**
- 02 NUK 017G** Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt G  204
- 02 NUK 020C** Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexbildung von f-Elementen; Teilprojekt C  110
- Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena**
- 02 NUK 015C** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt C  172
- GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt**
- 02 NUK 001A** Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Dynamik der Reparaturfaktoren an lokalisierten Schäden  134
- 02 NUK 017A** Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt A  192

- 02 NUK 025A Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1 📖 216

**Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden**

- 02 NUK 010A Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Entwicklung von CFD-Modellen für Wandsieden und Aufbau eines Bündeltests mit hochauflösender, schneller Röntgentomographie 📖 26
- 02 NUK 013A Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse 📖 80
- 02 NUK 014B Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente 📖 92
- 02 NUK 015F Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt F 📖 178
- 02 NUK 019D Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D 📖 102
- 02 NUK 021B Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B 📖 118
- 02 NUK 023B Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt B: Untersuchung von Zweiphasenströmungen in einer Kreiselpumpe und in Armaturen mittels tomographischer Bildgebungsverfahren 📖 68

**Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Oberschleißheim**

- 02 NUK 008A Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Physikalisch-technische Optimierung und Quantifizierung von CT-Systemen 📖 158
- 02 NUK 015B Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B 📖 170
- 02 NUK 024B Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2 📖 208

**Hochschule für angewandte Wissenschaften – Fachhochschule Aschaffenburg, Würzburger Str. 45, 63743 Aschaffenburg**

- 02 NUK 025C Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 3 📖 220

<b>Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau</b>		
02 NUK 010C	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen mit optischen Verfahren und Parameterbestimmung für CFD-Rechnungen an kleinskaligen Versuchsständen	30
02 NUK 018A	Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt A: Einsatz von Soft Computing-Methoden für die Kernzustandsdiagnose	54
<b>IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf</b>		
02 NUK 003C	Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Mitochondriale Schäden	146
<b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main</b>		
02 NUK 017F	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt F	202
02 NUK 019E	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E	104
02 NUK 021F	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F	126
<b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz</b>		
02 NUK 013E	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Herstellung und Nutzung von Aktinidentargets	86
<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe</b>		
02 NUK 019B	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B	98
02 NUK 020B	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B	108
<b>Klinikum der Universität München, Lindwurmstr. 2a, 80333 München</b>		
02 NUK 016B	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B	186
02 NUK 024C	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3	210

<b>KSB Aktiengesellschaft, Johann-Klein-Str. 9, 67227 Frankenthal (Pfalz)</b>		
02 NUK 023D	Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt D: Experimentelle Qualifizierung von Armaturen unter Normal- und Störfallbedingungen zur Entwicklung verifizierter Methoden	72
<b>Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover</b>		
02 NUK 015D	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt D	174
02 NUK 021G	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G	128
<b>Materialprüfanstalt Universität Stuttgart, Otto-Graf-Institut, Pfaffenwaldring 32, 70569 Stuttgart</b>		
02 NUK 009A	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren; TP: Strukturmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen	16
02 NUK 009E	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Thermische Ermüdung in Kraftwerkkomponenten - Charakterisierung und Weiterentwicklung von Lebensdauermodellen; TP: Lebensdauerbewertung mit mikromechanischen Werkstoffmodellen	24
<b>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig</b>		
02 NUK 033	TCAP-Neutronenfluenzstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte	130
<b>Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen</b>		
02 NUK 021D	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D	122
02 NUK 021E	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E	124
02 NUK 022A	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie	58
02 NUK 022C	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt C: Entwicklung eines effizienten Auswertalgorithmus zur Mie-Inversion	62

<b>Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum</b>
--

- |             |  |    |
|-------------|--|----|
| 02 NUK 010D | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Übertragung der CFD-Wandsiedemodelle zur Anwendung in Lumped Parameter-Codes zur Beurteilung der RDB-Außenkühlung | 32 |
|-------------|--|----|

<b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 NUK 008F | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen; TP: Strahlenhygienische Bewertung und Optimierung diagnostischer und therapeutischer Verfahren in der Medizin                                       | 164 |
| 02 NUK 008G | Verbundprojekt Innovative Verfahren der biomedizinischen Bildgebung zur Optimierung von medizinischen Strahlenanwendungen - Reduktion der durch computertomographische Untersuchungen hervorgerufenen Strahlenexposition   | 166 |
| 02 NUK 012D | Verbundprojekt Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Abtrennung langlebiger Radionuklide (Partitioning); TP: Spektroskopische Untersuchungen zur Stabilität und Koordination von Aktinidkomplexen mit ausgewählten Extraktionsliganden | 78  |
| 02 NUK 020D | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexbildung von f-Elementen; Teilprojekt D  | 112 |

<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 NUK 010F | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Validierung von Unterkanal- und CFD-programmen anhand von Brennstab-Bündelversuchen | 36  |
| 02 NUK 015A | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A   | 168 |
| 02 NUK 019A | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A             | 96  |
| 02 NUK 020A | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexbildung von f-Elementen; Teilprojekt A  | 106 |
| 02 NUK 021C | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C                         | 120 |

<b>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt</b>
--

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 NUK 001C | Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Mechanismen an komplexen Läsionen            | 138 |
| 02 NUK 009D | Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: TP: Numerische Simulation und experimentelle Charakterisierung des Ermüdungsrisswachstums unter thermozyklischer Beanspruchung | 22  |

<b>02 NUK 016D</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D	190
<b>02 NUK 017B</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt B	194
<b>02 NUK 017C</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt C	196
<b>02 NUK 017D</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt D	198
<b>02 NUK 017E</b>	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt E	200
<b>02 NUK 022D</b>	Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer	64
<b>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden</b>		
<b>02 NUK 002F</b>	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt: Ausbreitungspfade von Radionukliden in Luft, Wasser, Boden; TP: Wechselwirkung von Uran(VI) mit Biofilmen	140
<b>02 NUK 010B</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Turbulenz und Blasendynamik	28
<b>02 NUK 010H</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge	40
<b>02 NUK 010I</b>	Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Darstellung von Siedevorgängen mittels PIV und Optischer-Kohärenz-Tomographie	42
<b>02 NUK 013B</b>	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden	82
<b>02 NUK 014A</b>	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	90
<b>02 NUK 018B</b>	Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt B: Berechnung von Gammastrahlungsfeldern des Reaktorkerns zur nichtinvasiven Zustandsüberwachung	56

<b>Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg</b>
--

- |             |   |    |
|-------------|---|----|
| 02 NUK 011D | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D   | 50 |
| 02 NUK 023A | Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt A: Untersuchung der Wirbelbildung in Pumpenzulaufbecken und der Auswirkung von Gasmitriss auf nachfolgende Anlagenkomponenten | 66 |

<b>Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München</b>
--

- |             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 02 NUK 007E | Verbundprojekt Individuelle Strahlenempfindlichkeit und genomische Instabilität: Einfluss von Rb1 Gen-Variationen auf die Ausbildung akuter Nebenwirkungen und auf das Auftreten bösartiger Strahlenspätchäden nach den bei einer konventionellen Strahlentherapie angewendeten Gamma-Dosen | 156 |
| 02 NUK 010E | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Einfluss von Turbulenz und Sekundärströmungen auf das unterkühlte Strömungssieden in reaktortypischen Konfigurationen  | 34  |
| 02 NUK 013F | Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Ultrasensitive Nachweismethoden für Radionuklide   | 88  |
| 02 NUK 011E | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E   | 52  |

<b>TÜV NORD SysTec GmbH &amp; Co. KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg</b>
--

- |             |  |    |
|-------------|--|----|
| 02 NUK 011B | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B  | 46 |
| 02 NUK 023C | Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt C: Analytische Untersuchungen der Wirbelbildung in Pumpeneinläufen | 70 |

<b>TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Westendstr. 199, 80686 München</b>
---

- |             |   |    |
|-------------|---|----|
| 02 NUK 011C | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C | 48 |
|-------------|---|----|

<b>Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen</b>
---

- |             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 02 NUK 015H | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H | 182 |
|-------------|--|-----|

<b>Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg</b>
--

- |             |   |    |
|-------------|---|----|
| 02 NUK 111F | Kooperationsprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer | 74 |
|-------------|---|----|

	<b>Universität Duisburg-Essen - Universitätsklinikum, Hufelandstr. 55, 45147 Essen</b>	
02 NUK 001B	Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Untersuchungen über Backup Mechanismen des DSB Reparatur	136
02 NUK 005C	Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität; TP: ATM/ATR Signaltransduktionswege und Strahlenempfindlichkeit in Normal- und Tumor-Zellen	152
	<b>Universität Konstanz, Universitätsstr. 10, 78464 Konstanz</b>	
02 NUK 025B	Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2	218
	<b>Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig</b>	
02 NUK 014C	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	94
	<b>Universität Rostock, Ulmenstr. 69, 18057 Rostock</b>	
02 NUK 005D	Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit	154
	<b>Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart</b>	
02 NUK 009B	Verbundprojekt Thermische Wechselbeanspruchung: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen Strömung und Struktur in Leichtwasserreaktoren; TP: Strömungsmechanische Modellierung für gekoppelte Strömungs-Struktur-Simulationen	18
	<b>Universität zu Köln, Albertus-Magnus-Platz, 50931 Köln</b>	
02 NUK 013D	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Gamma-Imaging mit hochsegmentierten Germaniumdetektoren	84
	<b>Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen</b>	
02 NUK 024D	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4	212
	<b>Universitätsklinikum Ulm, Albert-Einstein-Allee 29, 89081 Ulm</b>	
02 NUK 003B	Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Alterungskorrelierte Prozesse der UVA-induzierten Hautkarzinogenese	144
	<b>Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz</b>	
02 NUK 016A	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt A	184

**Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bautzner  
Landstr. 128, 01328 Dresden**

**02 NUK 015G** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G  180