

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

**PTE-N Nr. 8**

BMBF geförderte FuE zu  
„Nukleare Sicherheitsforschung“

Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2013

Projektträger Karlsruhe  
Wassertechnologie und Entsorgung  
PTKA-WTE

**März 2014**

## **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>7</i>
<b>2</b>	<b>Formalisierte Zwischenberichte .....</b>	<b>13</b>
2.1	Sicherheitsforschung für Kernreaktoren .....	13
2.2	Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung.....	71
2.3	Strahlenforschung.....	119
<b>3</b>	<b>Verzeichnis der ausführenden Forschungsstellen.....</b>	<b>231</b>











# 1 Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen




## 1.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

<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>	📖 14
<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>	📖 16
<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>	📖 18
<b>02 NUK 011D</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D	<b>Technische Universität Hamburg-Harburg</b>	📖 20
<b>02 NUK 011E</b>	Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E	<b>TU München</b>	📖 22
<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>	📖 24
<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>	📖 26
<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>	📖 28
<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>	📖 30

- 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 **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**  32
- 02 NUK 022D** Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer **TU Darmstadt**  34
- 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 **TU Hamburg-Harburg**  36
- 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 **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.**  38
- 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**  40
- 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)**  42
- 02 NUK 028A** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt A: Analyse von Containment-Phänomenen zur Optimierung von Störfallmaßnahmen **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**  54
- 02 NUK 028B** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt B: Druckwasserreaktor-Störfallanalysen unter Verwendung des Severe-Accident-Code ATHLET-CD **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.**  56



- 02 NUK 028C** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt C: Analyse schwerer Störfälle in LWR zur Evaluierung und Optimierung von Severe-Accident-Maßnahmen **Universität Stuttgart**  58
- 02 NUK 028D** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt D: Erweiterung und Validierung des COCOSYS Codes für die Analyse des passiven Containment-Kühlsystems **Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**  60
- 02 NUK 028E** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt E: Verbesserung des Lower Head-Modelles für Melcor und Melcor-Rechnungen zu Fukushima **Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**  62
- 02 NUK 028F** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt F: Beiträge zur Codevalidierung anhand von SWR-Daten und zur Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen **Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**  64
- 02 NUK 028G** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt G: Simulation des Unfalls in Fukushima-Daiichi zur Bewertung von ATHLET-CD (SUBA) **Ruhr-Universität Bochum**  66
- 02 NUK 027A** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt A: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Nachwärmeabfuhr von Brennelementen in ausdampfenden Nasslagern **TU Dresden**  44
- 02 NUK 027B** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt B: Simulation von Strömung und Wärmetransport unter den Bedingungen eines Lagerbeckens **TU Dresden**  46
- 02 NUK 027C** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt C: Analyse und CFD-Modellentwicklung der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.**  48

- 02 NUK 027D** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegetriebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten **Hochschule Zittau/Görlitz**  50
- 02 NUK 027E** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt E: Ortsaufgelöste Temperatur- und Gasphasengeschwindigkeitsmessung zur Analyse der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen **TU Dresden**  52
- 02 NUK 111F** Kooperationsprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer **Universität der Bundeswehr München, Neubiberg**  68

## 1.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung

<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>	📖 72
<b>02 NUK 014A</b>	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	<b>TU Dresden</b>	📖 74
<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>	📖 76
<b>02 NUK 014C</b>	Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente	<b>Universität Leipzig</b>	📖 78
<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>	📖 80
<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>	📖 82
<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>	📖 84
<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>	📖 86
<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>	📖 88
<b>02 NUK 019F</b>	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F	<b>Rheinische Friedrich-Wilhelms- Universität Bonn</b>	📖 90

<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>	📖 92
<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>	📖 94
<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>	📖 96
<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>	📖 98
<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>	📖 100
<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>	📖 102
<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>	📖 104
<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>	📖 106
<b>02 NUK 021D</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D	<b>Rheinisch-Westfäli- sche Technische Hochschule Aachen</b>	📖 108
<b>02 NUK 021E</b>	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E	<b>Rheinisch-Westfäli- sche Technische Hochschule Aachen</b>	📖 110
<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>	📖 112
<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>	📖 114
<b>02 NUK 033</b>	TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte	<b>Physikalisch- Technische Bundes-</b>	📖 116

### 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> | 📖 120 |
| <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>        | 📖 122 |
| <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>  | 📖 124 |
| <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>           | 📖 126 |
| <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>                                      | 📖 128 |
| <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>                          | 📖 130 |
| <b>02 NUK 005A</b> | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität  | <b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>                                 | 📖 132 |
| <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>        | 📖 134 |
| <b>02 NUK 005D</b> | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz zur Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit   | <b>Universität Rostock</b>   | 📖 136 |

<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>	📖 138
<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), Oerschleißheim</b>	📖 140
<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>	📖 142
<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>	📖 144
<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>	📖 146
<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>	📖 148
<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 Kernver- fahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Dresden</b>	📖 150
<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>	📖 152
<b>02 NUK 016A</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt A	<b>Universitätsmedizin der Johannes Guten- berg-Universität Mainz</b>	📖 154
<b>02 NUK 016B</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B	<b>Klinikum der Uni- versität München</b>	📖 156
<b>02 NUK 016CX</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C	<b>BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsfor- schung GmbH, Bre- men</b>	📖 158
<b>02 NUK 016D</b>	Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D	<b>TU Darmstadt</b>	📖 160

- 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 **GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt** 162
- 02 NUK 017B** 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 **TU Darmstadt** 164
- 02 NUK 017C** 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 **TU Darmstadt** 166
- 02 NUK 017D** 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 **TU Darmstadt** 168
- 02 NUK 017E** 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 **TU Darmstadt** 170
- 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 **Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main** 172
- 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 **Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg** 174
- 02 NUK 024A** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1 **Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter** 176
- 02 NUK 024B** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2 **Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg** 178
- 02 NUK 024C** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; **Klinikum der Universität München** 180

- Teilprojekt 3
- 02 NUK 024D** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4 **Universitätsklinikum Essen** 182
- 02 NUK 024E** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5 **Charité - Universitätsmedizin Berlin** 184
- 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** 186
- 02 NUK 025BX** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2 **Hochschule Albstadt-Sigmaringen** 188
- 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** 190
- 02 NUK 026A** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A **Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg** 192
- 02 NUK 026B** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B **Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz** 194
- 02 NUK 026C** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C **Universität Ulm** 196
- 02 NUK 026D** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D **Universitätsmedizin Rostock** 198
- 02 NUK 026E** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E **Universität Leipzig** 200
- 02 NUK 026F** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F **Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München** 202



<b>02 NUK 030A</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt A	<b>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg</b>	📖 204
<b>02 NUK 030B</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B	<b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b>	📖 206
<b>02 NUK 030C</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C	<b>Friedrich-Schiller-Universität Jena</b>	📖 208
<b>02 NUK 030D</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D	<b>Leibniz Universität Hannover</b>	📖 210
<b>02 NUK 030E</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E	<b>TU München</b>	📖 212
<b>02 NUK 030F</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F	<b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>	📖 214
<b>02 NUK 030G</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G	<b>Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.</b>	📖 216
<b>02 NUK 030H</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H	<b>Universität Bremen</b>	📖 218
<b>02 NUK 030I</b>	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I	<b>Hochschule Ravensburg-Weingarten</b>	📖 220
<b>02 NUK 031A</b>	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A	<b>Universität der Bundeswehr München</b>	📖 222
<b>02 NUK 031B</b>	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B	<b>Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München</b>	📖 224
<b>02 NUK 031C</b>	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt C	<b>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg</b>	📖 226
<b>02 NUK 031D</b>	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D	<b>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt</b>	📖 228



## **2 Formalisierte Zwischenberichte**

### **2.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren**

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 484.253,45 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. Schlüter	

## 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 abdeckenden Ergebnisse liefern und daher zu verbessern sowie zu validieren sind. Im Rahmen des Vorhabens sollen die bei kondensationsinduzierten Druckstößen auftretenden Phänomene beschrieben 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 befindenden 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 der Technischen Universität München, dem Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT sowie den Institut für Hydromechanik und Wasserbau und 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).

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**

APS: Durchführung des 2. Druckstoßseminars am 13./14.11.2013 beim TÜV Nord, Hamburg.

AP2: Fertigstellung des Versuchsstandes. Durchführung von Experimenten zu kondensationsinduzierten Druckstößen. Qualitative Dokumentation der Ergebnisse (Druckschlag Ja/Nein, Anzahl der Schläge pro Experiment), da durch Ausfall des Messdatenerfassungs-Rechners keine Aufnahme der transienten Drücke über den Transientenrekorder möglich war. Reparatur des defekten Messdatenrechners (Ersatz des Netzteils, Schwierigkeiten bei Beschaffung und Austausch aufgrund des Alters des Geräts). Die Ergebnisse können qualitativ mit den beiden folgenden Abbildungen dargestellt werden, die auch auf dem Seminar beim TÜV Nord und dem Projekttreffen im Dezember 2013 vorgestellt wurden. Die höchste Wahrscheinlichkeit für CIWA-Schläge liegt in diesen Experimenten bei  $Fr=0,6$ .

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP2: Nach Instandsetzung der Messdatenerfassung Wiederholungsversuche mit Aufzeichnung der transienten Druckverläufe.

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

Vortrag auf 2. Druckstoßseminar der CIWA-Projektgruppe beim TÜV Nord in Hamburg.

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 496.419,92 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Neuhaus	

### 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 Technischen 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, AP4, AP5 sowie APS.

AP2: Im Berichtszeitraum wurden die Versuche an den Versuchsanlagen von UMSICHT, der TUHH und der UniBW fortgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden in Emails, im Rahmen des 2. CIWA-Druckstoß-Seminars in Hamburg sowie bei zwei Projekttreffen in München diskutiert. Bei diesen Gelegenheiten hat sich der TÜV NORD aktiv an der Interpretation der Ergebnisse und der weiteren Planung der Versuchsreihen beteiligt sowie bei der (phänomenologischen) Auswertung der Versuche zu den Kondensationsschlägen mitgewirkt.

- AP4: Das an der TUM entwickelte Hybrid-Oberflächenenerneuerungsmodell wurde in DYVRO implementiert. Dabei lag ein Hauptaugenmerk auf die richtige Berechnung der Dissipation, der turbulenten kinetischen Energie und der turbulenten Reynolds-Zahl, da diese Parameter Eingangsgrößen für das Hybrid-Oberflächenenerneuerungsmodell darstellen. Im Unterschied zu 3D-CFD-Codes, bei denen diese Größen vom Programm zur Verfügung gestellt werden, müssen sie in 1D-Codes mit geeigneten Gleichungen modelliert werden. Es wurden bei der Umsetzung in DYVRO die gleichen Modelle gewählt, wie sie auch in dem 1D-Thermohydraulik-Code ATHLET verwendet werden. Auf dem Projekttreffen am 3./4. Juli in München wurde eine Validierungsmatrix vereinbart, in der festgelegt wurde, welche Versuche von den einzelnen Projektpartnern mit den unterschiedlichen Programmen nachgerechnet werden. Es wurde festgelegt, dass TÜV NORD 3 Versuche von UMSICHT, 3 Versuche der TUHH, 3 B-Versuche und einen A-Versuch der UniBW-Anlage simuliert. Zudem erklärte sich TÜV NORD bereit, optional mit der im Rahmen des CIWA-Projektes modifizierte ATHLET-Version Versuche der TUHH nachzurechnen. Da der A-Versuch an der UniBW-Anlage einer anderen Phänomenologie folgt als die anderen im Rahmen von CIWA durchgeführten Experimente, wurden zunächst mit DYVRO Validierungsrechnungen gegen den in der Literatur beschriebenen Versuch „Wasserkanone“ vorgenommen, da dieser Ähnlichkeit mit dem A-Versuch der UniBW-Anlage aufweist, insgesamt aber ein einfacheres Szenario darstellt. In diesem Zuge wurde eine weitere Optimierung der Numerik vorgenommen und geeignete Einzeleffektmodell-Kombinationen zur Erfassung der physikalischen Vorgänge identifiziert. Im Anschluss wurden verschiedene Modelle für die UniBW-Anlage erstellt und die vorgesehenen Validierungsrechnungen vorgenommen. Hierbei konnten wichtige Erkenntnisse im Umgang mit der Modellierung auf der Meso- und Makroskala gewonnen werden. Zudem wurden die Modelle für die Anlagen TUHH und UMSICHT erstellt sowie ein eigenes Modell zur Nachrechnung der B-Versuche der Uni-BW-Anlage. Sämtliche in der Validierungsmatrix vorgesehenen Rechnungen wurden mit DYVRO durchgeführt und ausgewertet. Weiterhin wurden zwei Experimente (130130-06 und 130424-10), die an der TUHH-Anlage durchgeführt wurden, mit dem modifizierten ATHLET-Modell simuliert. Hierzu wurde ein ATHLET-Modell erstellt, das alle für die Simulation bzw. Validierung notwendigen Anlagenteile enthält. Die Berechnungsergebnisse wurden mit den Messungen verglichen und bewertet und einzelne Variationsrechnungen zur Klärung von Abweichungen durchgeführt. Die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen von den Projektpartnern eingesetzten Codes wurden anschließend im Rahmen eines Methodenvergleiches gegenübergestellt. Hierzu wurde es notwendig, zusätzlich einen in der Literatur beschriebenen Versuch an der Testanlage PMK-2 (Experiment 5) mit DYVRO nachzurechnen, da dieser im Rahmen des CIWA-Projektes von der TUM mit CFD simuliert worden war.
- AP5: Die Software-Qualifizierung liegt konzeptionell in der Hand des TÜV SÜD. In Zusammenarbeit zwischen TÜV SÜD und TÜV NORD wurde ein Qualifizierungsplan aufgestellt. Die abschließenden Arbeiten hinsichtlich der konkreten Qualifizierung von DYVRO wurden durch den TÜV NORD vorgenommen.
- AP-S: Das 2. Druckstoßseminar hat am 13./14.11.2013 stattgefunden. Alle Projektpartner sowie Gastredner der GRS haben hochwertige Beiträge beigesteuert. In Rückmeldungen der Teilnehmer, Vertreter aus Industrie und Forschung, wurden insbesondere das hohe fachliche Niveau und die Darstellung in der Tiefe gelobt.

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

Die fachlichen Arbeiten in den einzelnen Arbeitspaketen sind abgeschlossen. Zurzeit erfolgt die Erstellung des Verwendungsnachweises.

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

T. Neuhaus, Modellierung der Teilphänomene eines CIWH im 1D-Code DYVRO, 2. CIWA Druckstoßseminar, Hamburg, November 13.-14., 2013

T. Neuhaus, Validierungsrechnungen zu CIWH mit dem Code DYVRO, 2. CIWA Druckstoßseminar, Hamburg, November 13.-14., 2013

F. Blömeling, Methodenvergleich zwischen CFD- und 1D-Codes, 2. CIWA Druckstoßseminar, Hamburg, November 13.-14., 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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 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

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 Programmmodul für die Anwendung in kerntechnischen Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren qualifizierend bewertet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2.4: Am 09.08.2013 und am 03.12.2013 haben wir jeweils an einem Versuch der Reihe A am Versuchsstand der UniBW mit Einspeisung von unterkühltem Wasser über einen Windkessel (Separator) teilgenommen.

AP5.1: Mit den Verbundpartnern wurde eine Matrix zur Validierung des von TUM entwickelten CIWA-Programmmoduls unter Verwendung der 1-D Codes ATHLET und DYVRO abgestimmt und festgelegt. Die Validierungsmatrix beinhaltet Nachrechnungen von Versuchen, die innerhalb des Förderverbundprojekts durchgeführt wurden. Darüber hinaus soll durch Nachrechnungen von Versuchen an der TUHH-Anlage die grundsätzliche Eignung der 3-D Codes OpenFOAM und ANSYS-CFX zur Beschreibung inhomogener Zwei-Phasen-Strömungen mit Potenzial für CIWH überprüft werden.



AP5.2: Die von uns entwickelte und an ersten Verifikationstests erfolgreich erprobte Programm-schnittstelle CPI wurde einschließlich der hierzu erstellten Dokumentation der TUM zur Weiterentwicklung (außerhalb des CIWA-Projekts) übergeben.

AP5.3: Mit dem 1-D Systemcode ATHLET wurden sowohl mit der aktuell verfügbaren Standardversion als auch mit einer Version unter Einbindung des entwickelten CIWA-Programmmoduls jeweils Nachrechnungen von zwei Versuchen der Versuchsreihe A an der Anlage der UniBW durchgeführt (Nr. A-22 und Nr. A-40). Hierzu wurde ein ATHLET-Modell entwickelt, das den gesamten äußeren Kreislauf der Versuchsanlage nachbildet. Analog zum Versuch wurde in der Simulation ausgehend von einer Teilfüllung des horizontalen Testrohres nach dem Öffnen des Kugelhahnventils das unterkühlte Wasser durch die Kreislaufpumpe in die obere Testsektion gefördert. Im Gegensatz zur ATHLET-Standardversion wurden mit der modifizierten Version mit CIWA-Programmmodul ein vollständiges Kollabieren der Dampfblase im oberen Teil des Windkessels und ein entsprechender Druckstoß berechnet. Die Amplitude des berechneten Druckstoßes liegt in der Größenordnung der Messwerte. Bezüglich Zeitpunkt und Impulsdauer des Druckstoßes sowie Frequenz der anschließenden Druckschwingungen zeigen die Berechnungen jedoch Abweichungen zum Experiment, deren Ursachen noch zu klären sind.

Ferner haben wir die Nachrechnung eines Versuches an der Anlage der TUHH mit dem 3-D Code ANSYS-CFX gestartet. Bei der Durchführung zeigte sich, dass trotz begrenztem Modellumfang (nur horizontale Testsektion nachgebildet) die Berechnung einer Zwei-Phasen-Strömung mit Potenzial für CIWA mit ANSYS-CFX in der erforderlichen, relativ feinen Diskretisierung äußerst zeitintensiv und numerisch nicht immer stabil ist. Aus diesem Grund war die Versuchsnachrechnung am Ende des Berichtszeitraums noch nicht abgeschlossen.

Mit den Arbeiten zur Erstellung eines fachlichen Abschlussberichts zum AP5 wurde begonnen. Die Gliederung dieses Fachberichtes wurde mit TÜV-Nord abgestimmt.

AP6.1: Mit der Erstellung von Textbeiträgen zum CIWA-Abschlussbericht wurde begonnen.

Im Berichtszeitraum wurde jeweils mit fachlichen Beiträgen am 2. CIWA-Druckstoßseminar vom 13.11.-14.11.2013 in Hamburg und an zwei CIWA-Projektkonferenzen jeweils in München sowie an diversen Abstimmungsgesprächen mit den Projektpartnern teilgenommen.

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

AP5.3: Der fachliche Arbeitsbericht zu AP5 wird fertiggestellt.

AP6.1: Die Textbeiträge zum Abschlussbericht des CIWA-Projekts werden fertiggestellt.

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

Dr. W. Münch: „Software-Qualifizierung für kerntechnische Anwendungen“; Beitrag auf dem 2. CIWA-Druckstoßseminar am 13.–14.11.2013 in Hamburg beim TÜV Nord

H. Swidersky, T. Thiele: „Berechnung von Rohrleitungsbelastungen durch Füllvorgänge“; atw - International Journal for Nuclear Power Vol. 58 (2013) Issue 7

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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:

- Statistische Auswertung und Interpretation der durchgeführten Versuche.
- Aufbereitung der Messdaten zur Nachrechnung mit diversen Simulationsprogrammen bei den Verbundpartnern.
- Einbau eines transparenten Rohrabschnitts.
- Highspeed-Videoaufnahmen an zwei Positionen entlang der Teststrecke.
- Interpretation der optischen Aufnahmen inkl. Ansatzentwicklung zur Modellbildung.

Simulationsvorhaben:

- Implementierung von Randbedingungen für OpenFOAM (Zulauf und Separatoren).
- Simulation eines instationären, isothermen Einlaufvorgangs mit OpenFOAM und Validierung anhand von Highspeed-Videoaufnahmen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Erstellung des Abschlussberichts.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag im Rahmen des 2. CIWA Druckstoßseminars: Experimentelle Untersuchungen von Kondensationsschlägen, C. Urban, M. Schlüter, 13.11.2013

Vortrag im Rahmen des 2. FSP Workshops Klimaschonende Energie- und Umwelttechnik (TUHH): Kondensationsschläge in horizontalen Rohrleitungen, C. Urban, M. Schlüter, 09.12.2013

Eingereicht: Vortrag zum Jahrestreffen der Fachgruppe Mehrphasenströmungen und Wärme- und Stofftransport: Kondensationsschläge in horizontalen Rohrleitungen, C. Urban, M. Schlüter, 24.03.2014

In Bearbeitung: Investigations on the stochastic nature of condensation induced water hammer, International Journal of Heat and Mass Transfer, Einreichung Januar 2014.

N. Schimansky, Aufbau einer Versuchsanlage zur Brechungsindexanpassung bei der optischen Untersuchung von Mehrphasenströmungen in horizontalen Rohrleitungen, Bachelor-Arbeit, TU Hamburg-Harburg 2013

F. Selle, Experimentelle Analyse und Modellierung von Kondensationsschlägen in horizontalen Rohren, Bachelor-Arbeit, TU Hamburg-Harburg 2013

P. Srajbr, Numerische Simulation der Phasenverteilung von instationären Schichtströmungen in horizontalen Rohrleitungen mit OpenFOAM, Master-Arbeit, TU Hamburg-Harburg 2013

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 der Oberflächenerneuerungstheorie, wurde abgeschlossen. Die in der Validierungsmatrix festgehaltenen Versuche, aller drei Partneranlagen, wurden erfolgreich nachgerechnet.

AP5.2.2: Die Weiterentwicklung und Dokumentation der „CIWA Parallel Interface“ erfolgt nicht mehr beim Projektpartner TÜV SÜD, sondern wurde von TUM übernommen.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zu AP1:

Die Implementierung und Optimierung des Hybrid-Modells in 1D wurde abgeschlossen. Das ursprüngliche Hybrid-Wärmeübergangsmodell wurde bereits von uns für CFD-Programme entwickelt und musste für die Implementierung in dem Systemcode ATHLET 22A angepasst werden. Die Implementierungsarbeiten des Modells in den CFD-Codes ANSYS CFX und OpenFOAM wurden ebenfalls erfolgreich abgeschlossen. Die Integrierung der zwei einzelnen Oberflächenerneuerungsmodelle in einem Hybridmodell, anhand der turbulenten Reynoldszahl, erwies sich als richtig.

Es wurden alle 33 Experimente, der PMK2-Versuchsanlage aus Budapest, mit dem veränderten ATHLET Systemcode nachgerechnet. Ein Versuch derselben Anlage wurde, zum Methodenvergleich zwischen ANSYS CFX und OpenFOAM, inklusive dem neuentwickelten Modell, durchgeführt

Jeweils drei Versuche, mit unterschiedlichen Anfangs- und Randbedingungen, der Partneranlagen, TUHH, UniBW und UMSICHT, wurden mit der veränderten ATHLET-Version durchgeführt. Dabei wurde eine Rückwirkung in den Computersimulationen aufgrund, einerseits der Unterkühlung und andererseits der Turbulenz, auf die Strömungsformentwicklung, ähnlich zu den Versuchen bemerkt. Die Validierung der zusammengesetzten Systeme, aus ATHLET und CFD-Code jeweils mit dem neuen Hybridmodell, wurde anhand der ausgewählten Messdaten, qualitativ, erfolgreich abgeschlossen.

Die ATHLET-Nachrechnungen wiesen Kondensationsschläge in den Größenordnungen der gemessenen Ereignisse, auf. Aufgrund der 1D Strömungsmodellierung konnten bestimmte komplexe Phänomene nicht wiedergegeben werden, jedoch das Gesamtverhalten der simulierten Versuchsanlagen, wurde mit der veränderten ATHLET-Version gut bestimmt.

Drei Versuche, mit unterschiedlichen Anfangs- und Randbedingungen, der Partneranlage aus TUHH, wurden mit OpenFOAM simuliert. Die CFD-Simulationen der PMK2- und der TUHH-Versuchsanlage, die mit OpenFOAM durchgeführt wurden, haben keine Druckschläge wiedergegeben.

Die hochaufgelösten Simulationsergebnisse der CFD-Nachrechnungen verschaffen einen tiefen Einblick in die Strömungsentwicklung und der Dampfblaseneinschließung. Der Erkenntnisgewinn dieser Simulationsarten kann zu der Verbesserung der Vermeidungsstrategien dienen.

Zu AP5.2.2:

Die Entwicklung und Dokumentation der „CIWA Parallel Interface“ vom Projektpartner TÜV SÜD wurde von TUM übernommen. Änderungen und Anpassungen wurden an der Schnittstelle durchgeführt um sie unter jeder Linux-Distribution kompilierbar zu machen. Ein Beispieldatensatz wurde, für eine gekoppelte 1D-CFD-Rechnung, erstellt.

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

Teilprojektziel 02 NUK 011E wurde erfolgreich abgeschlossen, keine Weiterarbeiten geplant.

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

Ein Vortrag zum Thema: VALIDATION OF AN HYBRID SURFACE RENEWAL THEORY BASED HTC MODEL FOR THE SIMULATION OF CONDENSATION INDUCED WATER HAMMER, wurde auf der ICONE21 gehalten.

Es wurde ein Konferenzbeitrag an die kommende KTG-Jahrestagung 2014 verschickt.

Eine Bachelor-Arbeit mit dem Titel „Simulation kondensationsinduzierter Druckstöße mit dem 1D-System-Code ATHLET“ wurde von F. Dobmeier angefertigt.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		<b>Förderkennzeichen:</b> 02 NUK 018A
<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

AP1.3: Aufbauend auf den Ergebnissen einer Machbarkeitsanalyse erfolgte eine konkrete konstruktive Ausarbeitung des Kleinversuchsstandes (KVS). Zweck des KVS ist die dynamische Nachbildung von Gammastrahlungsverteilungen an der RDB-Außenseite eines Druckwasserreaktors, wie sie im Falle einer Kernschmelze auftreten können. Aus folgenden sieben Hauptkomponenten besteht der Kleinversuchsstand: Grundgestell mit Schaltkästen, Steuersystem, Quellenverfahrensystem, verfahrbare Stoffbarriere, Wasserbarrieren, Druckluftsystem, Messsystem. Das Quellenverfahrensystem besteht im Wesentlichen aus acht Linearantrieben. Mit diesen werden acht Cs137-Quellen gezielt verfahren und damit Quelltermverlagerungen nachgebildet, wie sie im Falle einer Kernschmelze durch Materialverlagerungen auftreten. Durch eine nachfolgend angeordnete und verfahrbare Stoffbarriere werden kernschmelzspezifische Gammastrahlungsverteilungen nachgebildet. Dazu wird mittels einer Linearachse während einer Versuchsdurchführung eine Konturenplatte quer zur Strahlungsrichtung automatisiert bewegt. In die Konturenplatte sind die Negative von Gammastrahlungsverteilungen eingearbeitet. Mittels der Wasserbarrieren und des Druckluftsystems ist es möglich, einen abfallenden Kühlmittelfüllstand in Kern- und Ringraum eines RDB sowie das Sieden des Kühlmittelinventars zu simulieren. Das Messsystem besteht aus acht übereinander festinstallierten Szintillationszählern und dient der Messung der simulierten Gammastrahlungsverteilungen. Innerhalb des verfahrbaren Grundgestells sind das Steuersystem sowie weitere peripherer Geräte angeordnet. Zum Schutz des Bedienpersonals ist der KVS mit Bleiglas ummantelt und wird während der einzelnen Versuchsdurchführungen durch eine räumliche Trennung fernbedient. Die Abmessungen des Kleinversuchsstandes betragen ca. 2,0 x 1,4 x 0,8 m (Höhe x Breite x Tiefe).

Für das im Simulationssystem „Dynstar“ programmtechnisch umgesetzte Modell für Strahlungstransportrechnungen und Simulationen von Gammastrahlungsverteilungen erfolgten eine Validierung sowie die Erstellung einer Dokumentation zur Funktionsweise.

AP1.4: Ausgehend von den Rechercheergebnissen der Arbeitspunkte AP1.1 und AP1.2 wurden verschiedene Methoden zur Kernzustandsdiagnose sowie ein Konzept für ein übergeordnetes Gesamtmodell entwickelt und erste Analysen hinsichtlich der Kriterien „Identifikationsgenauigkeit“ und „Robustheit“ durchgeführt. Innerhalb des Gesamtmodells werden gemessene Gammastrahlungssignale vorverarbeitet bzw. aufbereitet und nachfolgend den Methoden zur Kernzustandsdiagnose zugeführt. Für die Vorverarbeitung wird die Historie des Kerns (verwendeter Brennstoff, Abbrand, etc.) sowie die Zeit vom Abschalten des Reaktors bis zum Einsetzen der ersten Phase eines Kernschmelzunfalls analysiert. Nachfolgend können die zu messenden Spaltprodukte und ein geeigneter sog. Methodenblock gewählt werden. Das Konzept beinhaltet mehrere Methodenblöcke, welche alle denselben Aufbau besitzen, jedoch auf unterschiedliche Datenbasen basieren. Jeweils ein Methodenblock besitzt mehrere diversitäre und unabhängig arbeitende Methoden zur Kernzustandsdiagnose. Hierbei kommen konventionelle wie auch moderne (Soft Computing) Methoden zum Einsatz. Im Ergebnis erster Analysen konnte für die Methoden eine gute Identifikationsgenauigkeit von Kernzerstörungszuständen nachgewiesen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.3: Im weiteren Projektverlauf erfolgen die Bestellung notwendiger Komponenten sowie der Aufbau des KVS. Ferner sind Inbetriebnahmeversuche zu planen sowie die Inbetriebnahme des KVS durchzuführen. Weiterhin ist eine Dokumentation zur Funktionsweise des KVS zu erstellen.

AP1.4: Das Gesamtmodell sowie die darin enthalten Methoden zur Kernzustandsdiagnose sind mit Hilfe realitätsnaher Datenbasen (erzeugt durch den Kleinversuchsstand sowie Monte-Carlo-Simulationen beim Projektpartner) hinsichtlich Identifikationsgenauigkeit und Robustheit weiter zu analysieren. Des Weiteren sollen zusätzliche diversitäre Methoden zur Kernzustandsdiagnose erarbeitet werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Schmidt, S.; Kratzsch, A.; Fiß, D.: Analyse des Potentials von Soft Computing-Methoden für die Klassifikation von signifikanten Kernzerstörungszuständen während schwerer Störfälle in Druckwasserreaktoren. 23. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 04.-06. Dezember 2013

Schmidt, S.: Entwicklung eines Konzepts für die Diagnose des Kernzustandes während schwerer Störfälle in Druckwasserreaktoren. Doktorandenseminar Kompetenzzentrum Ost für Kerntechnik 2013, Dresden, 12. Dezember 2013

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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**

AP1.2: Die Rechenmodelle für den Reaktorkern und den Transport zum RDB sind getestet und funktionieren. Rechnungen mit dem Reaktorkern lassen sich nun für zwei verschiedene Abbrandstufen (zu Beginn und gegen Ende eines Zyklus) durchführen.

AP1.3: Die Berechnung des Gammastrahlungsfeldes durch aktivierte Reaktorkomponenten, welches als Grundlage für alle Sensitivitätsanalysen benötigt wird, wurde fortgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP1.3: Berechnung der Quellverteilung im Kern nach einer Reaktorschnellabschaltung für verschiedene Füllstände und Kerndeformationen; anschließend Berechnung der daraus resultierenden Gammastrahlungsfelder außerhalb des RDB.

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

Keine.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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 Verbundprojekt bearbeitet der LRST die folgenden Arbeitspakete:

- AP1: Konzeptionierung und Koordination
- AP2: Bereitstellung von Versuchseinrichtungen
- AP3: Durchführung kleinskaliger Versuche
- AP4: Durchführung großskaliger Versuche

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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 605.403,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Steiger	

### 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

*Weiterentwicklung des bestehenden Streulichtphotometers:*

Im zweiten Halbjahr sollte das Streulichtphotometer fertiggestellt und unter realen Bedingungen getestet werden (Autoklaventest). Im Anschluss soll es zur weiteren Nutzung an LRST übergeben werden.

*Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:*

Parallel dazu sollte das Konzept für das Feuchtemesssystem entwickelt werden. Zur Unterstützung der Konzeptphase soll ein Testaufbau aufgebaut werden um Erfahrungen mit den Schlüsselkomponenten des Systems zu bekommen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

*Weiterentwicklung des bestehenden Streulichtphotometers:*

Im Berichtszeitraum wurde das Streulichtphotometer fertig montiert. Es wurden zwei hermetisch dichte Umhausungen integriert. In diesen Umhausungen befindet sich das eigentliche Spektrometer (Lichtquelle und Detektor). Sie ermöglichen konstante Bedingungen während einer Messung und verhindern, dass z. B. die im Gerät befindliche Luftfeuchtigkeit einen Einfluss auf die Messung hat. Die Fasern wurden in einen Welschlauch eingezogen und dieser ebenfalls hermetisch verschlossen. Dadurch wird eine Überwachung des Druckes innerhalb des Welschlauchs möglich. Undichtigkeiten

des im Containment befindlichen Teils des Wellschlauches können so erkannt und der Benutzer informiert werden.

In der Woche von 29.07.13 – 02.08.13 wurde zusammen mit Herrn Krupa (RWTH Aachen, LRST) und Herrn Kyriou (RWTH Aachen, CCES) das Gerät im IPM in Betrieb genommen. Mit einem Referenzspektrometer wurde eine Kalibrierung des Wellenlängenbereichs vorgenommen. Später wurden Dichtigkeitsuntersuchungen des Wellschlauches durchgeführt. Zum Schluss kam ein Aerosolgenerator zum Einsatz. Da jedoch die Messtrecke nicht homogen mit Aerosol „befüllt“ werden konnte, waren keine Aerosolmessungen möglich. Es konnte jedoch der Einfluss von Aerosolen in der Messtrecke beobachtet werden.

Beim Projekttreffen in Eschborn am 07.10.13 wurden die Zielspezifikationen festgelegt. Jeder Projektpartner stellte seinen Stand der Arbeiten dar und weitere Schritte wurden definiert. Nähere Angaben sind dem Protokoll zu entnehmen.

Im Anschluss an das Projekttreffen wurde bei Becker Technologies ein Autoklaventest durchgeführt (07.10.13-11.10.13). Ziel war es, das Spektrometer unter realen Bedingungen zu testen. Es wurden Temperatur und Drucktest jeweils mit und ohne Aerosol durchgeführt. Alle Tests wurden bestanden. Genauere Angaben zu den Tests sind dem Jahresbericht zu entnehmen. Am Ende der Tests wurde das Gerät an Herrn Krupa (RWTH Aachen, LRST) übergeben.

*Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:*

Während des Berichtszeitraums wurde ein Versuchsaufbau mit Lichtquelle, Spektrometer, optischem Multiplexer und Testzelle aufgebaut. Bei der Testzelle handelt es sich um ein kleines Messvolumen in dem definierte Druck-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse eingestellt werden können. Bei der ersten Inbetriebnahme des zugekauften Spektrometers stellte sich jedoch heraus, dass es nicht zufriedenstellend arbeitete. Deswegen wurde es Anfang Dezember zur Überprüfung eingeschickt.

Der Messkopf wurde konstruiert und alle nötigen Teile bestellt. Er ist im Containment hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt. Es können starke Säuren oder Laugen in wässriger Lösung auf ihn einwirken. Deshalb ist der Messkopf aus „einfachen“ Komponenten aufgebaut, um diesen problemlos und kostengünstig bei etwaigen chemischer Angriff austauschen zu können. Verschiedene optische Konzepte wurden diskutiert. Am Ende wurde eine Lösung mit rückseitenverspiegelter Linse favorisiert. Damit ist beispielsweise eine Reinigung möglich, ohne die Spiegelschicht zu belasten. Durch den eingeschränkten Wellenlängenbereich ist es auch möglich, handelsübliche Fasern zu verwenden, welches ebenso zu einer kostengünstigen Lösung beiträgt.

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

*Vervollständigung des bestehenden Streulichtphotometers:*

Beim Autoklaventest stellte sich heraus, dass die Bediensoftware des Aerosolspektrometers nicht dauereinsatzfest ist. Während der Laufzeit des Programms „läuft“ der Hauptspeicher voll und führt letztlich zum Softwareabsturz. Ebenso wurde beobachtet, dass es eine temperaturabhängige Dichtigkeit des Wellschlauches gibt. Betroffen ist der Übergang vom Wellschlauch in den Messkopf. Durch geeignete Dichtungen wird das Problem behoben. Beide Nacharbeiten werden bis zum Projekttreffen im Februar 2014 am IPM durchgeführt.

*Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:*

Nach der Reparatur des Spektrometers sollen weitere Feuchtemessungen durchgeführt werden. Untersucht wird der Einfluss von Druck und Temperatur auf die Feuchtemessung. Ebenso sollen Genauigkeitsabschätzungen gemacht werden.

#### **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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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**

Die theoretischen Untersuchungen zum Auswertalgorithmus wurden abgeschlossen. Es wurde eine automatische Regularisierung (ohne Zutun eines Anwenders) implementiert, die auf dem Diskrepanzprinzip für Tikhonov-Regularisierung beruht.

Für die Inversionsalgorithmen wurde eine graphische Oberfläche (GUI) erstellt, die es einem Anwender erlaubt, interaktiv verschiedene Inversionsmethoden zu testen. Zudem wurden in Zusammenarbeit mit den Partnern Schnittstellen zur Auslesung der Detektorsignale erstellt.

Weiterhin wurden Untersuchungen zur Fehlerpropagation in FASP-Experimenten begonnen. Dazu wurden Daten im Computer künstlich verrauscht, und die Robustheit der numerischen Verfahren und der Inversion selbst systematisch untersucht. Verschiedene in der Literatur gebräuchliche Parametrisierungen der Größenverteilung wurden benutzt und verglichen.

Die Arbeiten zur Erweiterung der Mie-Theorie wurden begonnen. Im Laufe dieser Arbeiten wurden verschiedene Modelle für nicht-sphärische Partikel betrachtet und untersucht.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die automatische Bestimmung des Regularisierungsparameters soll auf Robustheit untersucht, und abgeschlossen werden. Für die erweiterte Mie-Theorie werden Formeln implementiert, und diese getestet. Die Software soll erweitert, und an realen Messdaten getestet werden. Insbesondere soll die GUI mit den Partnern abgestimmt werden. Zusätzlich zu den vorgesehenen Arbeitspaketen sollen Brechungsindizes für verschiedene Aerosole durch Auswertung von Experimenten bestimmt werden. Diese Daten sind für die Mie-Inversion notwendig. Fehlerschranken aus den Experimenten sollen in die numerischen Experimente einfließen. Diese sollen in die Funktionalformulierung einfließen, und es werden erste numerische Experimente durchgeführt.

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

T. Kyrion, M. Frank: Overview on Mie Inversion Techniques, Report

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 427.668,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Dreizler	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die TU Darmstadt entwickelt unabhängig ein laserbasiertes Absorptionsspektrometer zur Messung von gasförmigen Wasser während Störfallsimulation in der nuklearen Sicherheitsforschung. Das Konzept nutzt die sehr hohe spektrale Auflösung kontinuierlich abstimmbarer Diodenlaser und ermöglicht damit eine außergewöhnlich hohe chemische Selektivität mit sehr geringen Querempfindlichkeiten zu anderen möglicherweise im Messvolumen vorhandenen Gasspezies. Insbesondere in Mehrphasensystemen verspricht dies auf Grund der hohen Trennschärfe zwischen gasförmigem und flüssigem Wasser eine selbstkalibrierende Absolutmessung der H<sub>2</sub>O-g-Konzentration.

Die vorgesehenen Arbeiten zielen auf die Adaption der direkten Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (direkt-TDLAS) für die absolute Quantifizierung gasförmigen Wassers 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.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die externe Steuer- und Betriebseinheit sowie der interne Lasermesskopf werden von der TUD eigenständig entwickelt sowie aufgebaut. Die mechanisch-optischen Schnittstellen orientieren sich dabei an denen des von IPM betriebenen Photometers. Die Kopplung des TDL-Spektrometers erfolgt auf Basis der bereits bestehenden Erfahrungen des IPM und in Anlehnung an den aktuell in der Testphase befindenden FASP-Spektrometerkopf.

Hiermit sollen in ersten Vergleichsmessungen an kleinskaligen Laborsystemen die unterschiedlichen technologischen Ansätze zur absoluten H<sub>2</sub>O-g-Bestimmung (d. h. Steam-FASP und TDLAS) qualitativ und quantitativ gegenübergestellt werden. Auch konventionelle Feuchtemesssysteme werden in Einzelfällen zu Vergleichszwecken eingesetzt. Die Robustheit der einzelnen Messsignale gegenüber Transienten und Störeinflüssen soll im direkten Vergleich bestimmt werden.



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

Anhand der ausgearbeiteten Zielspezifikationen wurden die Anforderungen an den Sensor spezifiziert und weitere Prototypen des Lasermesskopfes gebaut, getestet und optimiert. Dabei standen besonders die mechanische Robustheit des Laserkopfes sowie eine möglichst exakte Laserstrahlführung im Fokus der Arbeiten. Der erste Prototyp für Autoklaven-Versuche in einem kleinskaligen Test-Containment befindet sich in der Fertigung.

Die Kopplungsschnittstelle zur Durchführung der Glasfasern sowie der Spülgasversorgung durch die Containment-Wand wurde konstruiert. Nach Beschaffung der Spezial-Durchführungen für die NIR-Glasfasern werden diese derzeit auf Dichtigkeit, Temperaturbeständigkeit und Laserlichtdämpfung geprüft und charakterisiert. Zur Systemüberwachung der Kopplungsschnittstelle hinsichtlich Temperatur und Dichtigkeit sind verschiedenste Temperatur- und Druck-Messstellen vorgesehen. Die hierfür notwendige Druck- und Temperatursensorik befindet sich derzeit in der Beschaffung.

Der anhand der Linienselektion ausgewählte Laser wurde beschafft, charakterisiert und in ersten Vorversuchen die Eignung für die geplante Messaufgabe verifiziert. Die Unsicherheiten der verfügbaren Spektraldaten konnte durch eigene Bestimmungen der Linienparameter bereits von 20 % auf ca. 9 % reduziert werden. Eine neu konstruiert Hochtemperatur-/Hochdruck-Referenzgaszelle wird in den nächsten Monaten zu einer weiteren Verbesserung der Liniendatenqualität beitragen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im nächsten Schritt werden alle beschafften Komponenten, wie Durchführungen und Laser, insbesondere im Zusammenbau charakterisiert, bevor sie Mitte des ersten Halbjahres 2014 einsatzbereit für die ersten Autoklaven-Versuche sein werden. Die Daten aus dem Autoklaven-Test werden ausgewertet und zur weiteren Verbesserungen und Optimierung des Lasermesskopfs und an den Versorgungssystemen genutzt.

In einer neu konstruierten Referenzmesszelle soll die Liniendatenbestimmung verbessert werden, um die Unsicherheiten in der Bestimmung der Wasserdampfkonzentration weiter zu minimieren.

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

Jan Köser, Andreas Dreizler, Björn Alexander Krupa, Steven Wagner, Volker Ebert, „Open-path TDL-hygrometer for nuclear safety simulation experiments“, Annahme als Poster-Beitrag zur „FLAIR 2014 - Field Laser Applications in Industry and Research“, Internationale Konferenz, May 5-9, 2014 - Hotel Demidoff, Pratolino (FI), Italien,

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

- Bundbuchsen für die Flanschanschlüsse an den Rohrleitungssegmenten verklebt, anschließend Dichtigkeitstests durchgeführt
- Montage der Druckleitung am Behälter
- Federisolatoren und Kompensatoren für die Pumpenlagerung ausgelegt und bestellt
- Aufstellen der Pumpe im Technikum der TUHH und Montage der Federisolatoren/Kompensatoren
- Aufbau eines Schaltschranks zum Anschluss der Pumpe an die Hausleitung
- Beauftragung des Anschlusses an die Hausleitung
  - Anschluss an die bestehende Hausleitung aufgrund der hohen Leistungsaufnahme nicht möglich, Verlegen einer weiteren Leitung durch den Technischen Betriebsdienst ist erst im 1. Quartal 2014 möglich
- Abwassereinspeisung für das Einleiten von 35 m<sup>3</sup> Wasser mit dem technischen Dienst in enger Abstimmung beauftragt, zusätzlicher Abwasseranschluss in die Infrastruktur der TUHH ist erstellt
- Rohrbündelwärmetauscher ausgelegt, als Sonderanfertigung in Auftrag gegeben, Trägerkonstruktion zum Befestigen innerhalb des Containers beauftragt (Schweißkonstruktion)
- Anschluss an den Kühlkreislauf beauftragt
  - Anschluss an den bestehenden Kühlkreislauf aufgrund der 45 kW Abwärmemenge nicht möglich, ein weiterer Kühlturm wird derzeit vom technischen Betriebsdienst erneuert
- Versuchsträger (Ventile) in Zusammenarbeit mit KSB ausgewählt
- Einbau der Induktiven Durchflussmessgeräte
- Laseroptisches Messsystem erhalten (High Speed Laser) und in Betrieb genommen
- Unterwasser PIV erhalten
- Zusätzliche Anlage mit DN15-Rohrleitung für sofortigen Versuchsbeginn und als Vorversuchsanlage ausgelegt und errichtet
- Versuchsmatrizen detailliert und festgelegt

### 4. Geplante Weiterarbeiten

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

- Fertigstellung der Versuchsanlage mit elektrischem Anschluss bis Ende März 2014
- zeitgleich: Durchführung von Vorversuchen gemäß der Testmatrix an der DN15 Anlage
- Ermittlung der Strömungsstruktur in der Technikumsanlage gemäß der Testmatrix
- numerische Ermittlung der Strömungsstruktur im Vorlagebehälter mittels OpenFOAM

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Gemeinsame Publikation zur Zusammenfassung der Literaturrecherche befindet sich in der Vorbereitung.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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

AP2: Es erfolgte die hydraulische und konstruktive Auslegung der modularen Laborversuchsanlage welche für die experimentellen Versuche im HZDR-Labor eingesetzt werden wird. Die Konstruktionszeichnungen wurden erstellt, Komponenten wurden zur externen Fertigung in Auftrag gegeben und der Aufbau der Anlage wurde durchgeführt. Die notwendige Sensorik für die Instrumentierung der Anlage wurde installiert. Aufgrund von Verzögerungen bei der Lieferung von wichtigen Komponenten der Laboranlage (Separatorsegmente und Wärmetauscher) konnte die vollständige Fertigstellung und Inbetriebnahme des Versuchsstandes im Berichtszeitraum jedoch noch nicht erfolgen.

Die Erarbeitung und Erstellung von Testmatrizen für die Durchführung der einzelnen Versuche wurde in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern durchgeführt.

Zur Vorbereitung der tomographischen Messungen bei den durchzuführenden Experimenten wurden tomographische Testmessungen sowohl an der zu untersuchenden Kreiselpumpe als auch an der Armatur, jeweils im nichtdurchströmten Zustand, durchgeführt.

AP4: Es wurde mit der Entwicklung von speziellen Algorithmen zur Auswertung der tomographischen Untersuchungen begonnen. Hierbei waren neben der Bestimmung von Gasgehalten in tomographischen Messdaten die Entwicklung von Algorithmen zur Datenerfassung und Auswertung für die winkelaufgelöste Tomographie von rotierenden Objekten ein Schwerpunkt.

AP6: Zur Modellbildung anhand von Literaturdaten, wurde eine Aufbereitung der recherchierten Literaturdaten durchgeführt, um eine Datenbasis für die Modellbildung zur Verfügung zu stellen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Endgültige Fertigstellung und Inbetriebnahme der modularen Laborversuchsanlage

AP4: Fortsetzung der Algorithmenentwicklung

AP6: Durchführung der experimentellen Untersuchungen anhand der erstellten Testmatrizen und Modellbildung anhand der Versuchsergebnisse

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 443.808,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Blömeling

### 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

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeitspakete AP2 und AP7 bearbeitet.

AP2: Mit der Erarbeitung von Testmatrizen hat die TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG die Planung und den Aufbau der Versuchsanlagen der Projektpartner TUHH sowie FZDR unterstützt. Im Rahmen des Projekttreffens am 17.09.2013 wurden die Erfahrungen aus eigenen Vorarbeiten und während der Literaturrecherche gesammelte Erkenntnisse über Modellversuche sowie deren Skalierungskonzepte vorgestellt. Des Weiteren wurden die Ziele der Experimente, aufgeteilt auf die drei Hauptkomponenten der Untersuchungen, weiter spezifiziert. Diese drei Komponenten sind die Armaturen, die Pumpen und die An-

saugbecken mit der Wirbelbildung an der Oberfläche. Auch die Parameterbereiche (z. B. Gasgehalt, Volumenstrom, Temperatur oder Zirkulation) der geplanten Experimente wurden hierbei festgelegt. Im Rahmen der geplanten numerischen Untersuchungen fokussiert sich der TÜV NORD auf die Wirbelbildung an Ansaugstutzen. Hierbei werden die Experimente mit einer Variation des Volumenstroms und der Zirkulation mit einer konstanten Temperatur von 30 °C durchgeführt. Wichtigste Ziele sind die Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder und -gradienten insbesondere in der Nähe der Oberfläche.

Des Weiteren wurde die Bildung der relevanten Kennzahlen zur Pumpenansaugung sowie zur Wirbelbildung für die experimentellen und numerischen Untersuchungen vereinbart. Hierbei wurde u. a. festgelegt, dass die dimensionslosen Kennzahlen sich auf den Durchmesser des Saugstutzens und nicht auf den Einlauftrichter beziehen.

- AP7: Im Rahmen des AP7 werden numerische Berechnungsmodelle für Oberflächenwirbel entwickelt und implementiert. Während unserer Vorarbeiten (im Rahmen des Forschungsprojekts GUMP) wurde ein kombiniertes Verfahren zur Untersuchung der Oberflächenwirbel entwickelt. Das Verfahren basiert auf der Kombination von numerischen Ergebnissen mit dem analytischen Wirbelmodell von Burgers & Rott. Es wurde erfolgreich zur Berechnung der tangentialen Geschwindigkeitsverteilung, der Luftkernlänge des Wirbels und zur Bestimmung der kritischen Überdeckung eingesetzt. Im AP7 werden analytische Modelle untersucht, welche auch die vertikale- und radiale Geschwindigkeits- sowie die Druckverteilung realitätsnah berechnen können. Die Implementierung dieser komplexen Modelle befindet sich in Vorbereitung. Des Weiteren wurde ein numerisches Programm zur Berechnung von rotationssymmetrischen Potenzialströmungen zur Unterstützung der Anwendung von analytischen Wirbelmodellen entwickelt.

Am 10.12.2013 wurde ein Treffen mit der TUHH zur Besprechung und Harmonisierung der geplanten numerischen Simulationen organisiert. Hierbei wurden die Erfahrungen und Empfehlungen des TÜV NORD zu CFD Simulationen der Oberflächenwirbelbildung vorgestellt. Auf der Basis des Versuchsaufbaus unter Berücksichtigung dieser Empfehlungen wurde der Rahmen der ersten OpenFOAM Simulationen von der TUHH sowie der begleitenden ANSYS CFX Analysen von TÜV NORD festgelegt.

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

- AP2: Die Erarbeitung von Testmatrizen wurde in dem Berichtszeitraum nicht abgeschlossen. Der Abschluss dieses Arbeitspakets ist Ende Januar vorgesehen. Des Weiteren wird auch eine Anpassung der Testmatrizen nach der Inbetriebnahme der Anlage erfolgen. Hierfür wird der TÜV NORD den Aufbau der Versuchsanlagen weiterhin begleiten.
- AP7: Im kommenden Halbjahr werden die Weiterentwicklung und Implementierung von numerischen Berechnungsmodellen für Oberflächenwirbel fortgesetzt. Hierfür ist die Erweiterung des kombinierten Verfahrens mit einem komplexen Wirbelmodell vorgesehen. Des Weiteren wurde ein numerisches Programm vom TÜV NORD zur Berechnung von rotationssymmetrischen Potenzialströmungen entwickelt. Die weitere Verbesserung sowie die Anwendung dieses Programms sind ebenfalls geplant. Darüber hinaus werden anhand der ersten Versuchsergebnisse die Validierungsanalysen der entwickelten Modelle begonnen.

#### **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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 2.751.350,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Hamberger	

## 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

Im Rahmen des Arbeitspakets 5 werden vier Versuchsträger in verschiedenen Größenordnungen von typischen Armaturen für nukleare Kraftwerke zur Untersuchung von unterschiedlichen Belastungsarten auf Schieber, Ventile und Rückschlagarmaturen entwickelt.

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit von Armaturen werden folgende Belastungstests durchgeführt:

- Ermittlung der Eigenfrequenz
- Zyklustest (1000 mal öffnen und schließen)
- Rohrleitungslasten
- Rohrbruchtest
- Thermoschockverhalten



- Schmutzpartikeltest
- Seismische Belastung (statisch auf einem Rütteltest)

Aus den Ergebnissen werden Berechnungsmodelle und Auslegungsempfehlungen für Armaturen unter sicherheitstechnischen Aspekten abgeleitet.

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

Arbeitspaket 5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen

- Die konstruktiven Arbeiten für alle Versuchsträger sind abgeschlossen. Alle erforderlichen Arbeitsunterlagen zum Start der Produktion sind erstellt. Fünf Armaturentypen laufen bereits in der Fertigung. Die letzte Variante wird in Kürze gestartet.
- Die kleinste Armatur mit der Nennweite DN 25 ist mittlerweile fertig gestellt und die ersten Versuche auf dem Prüfstand werden durchgeführt.
- Derzeit laufen für die großen Armaturen die Detailplanungen der Tests auf den Prüfständen sowie die Beschaffung und Vorbereitungen der erforderlichen Komponenten für die Versuchsaufbauten wie Flansche, Rohrverbindungen und sonstiges Zubehör.
- Den Projektpartnern werden für die Prüfstände am HZDR und an der TUHH geeignete Armaturen zur Verfügung gestellt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Nachstehend sind die nächsten Schritte zusammengefasst:

- Umsetzung von Maßnahmen zur Beschleunigung der Herstellungsprozesse zur Reduzierung des zeitlichen Verzugs bei der Fertigstellung der Versuchsträger.
- Fertigstellung und Prüfung aller Prototypen.
- Finale Koordination der Versuche mit den Prüfstandbetreibern.
- Beschaffung aller erforderlichen Komponenten und Zubehörteile für die Prüfstände.
- Installation der Versuchsträger auf dem Prüfständen und Beginn der Tests.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 027A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt A: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Nachwärmeabfuhr von Brennelementen in ausdampfenden Nasslagern		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2013 bis 30.09.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 574.986,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hurtado	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt soll gesicherte Kenntnisse über die Wärmetransportprozesse für den Fall eines langsam ausdampfenden bzw. vollständig ausgedampften Brennelement-Lagerbeckens sowohl innerhalb der Brennstabbindel von Brennelementen (BE) als auch in den Zwischenräumen zwischen den BE liefern, um damit die Entwicklung der axialen und radialen Stabtemperaturprofile bei unterschiedlichen Störfallszenarien prognostizieren zu können. Dafür soll ein Integralexperiment aufgebaut werden, welches die thermohydraulischen Vorgänge in einem repräsentativen Ausschnitt des BE-Lagerbeckens ganzheitlich umfasst. Aufbauend auf den Experimenten soll ein Lagerbecken-Modul für den Thermohydraulikcode ATHLET entwickelt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

- AP0: Systemanalyse, Literaturstudium, Festlegung von Szenarien (TUD-WKET, TUD-ISM, HZDR, HSZG)
- AP1: Auslegung, Errichtung und Inbetriebnahme der Integralversuchsanlage, Durchführung und Bewertung der Experimente (TUD-WKET, TUD-ISM, HZDR, HSZG)
- AP2: Erprobung spezieller Instrumentierungen, fluiddynamische Einzeleffektexperimente an BE-Dummy (TUD-ASP, HSZG)
- AP3: Anwendung von CFD-Codes; 3-D-Modellierung von BE im BE-LB und der Atmosphäre über den BE (TUD-ISM, HZDR)
- AP4: Anwendung von Integralcodes; Entwicklung spezieller Module für ATHLET und COCOSYS (TUD-WKET, TUD-ISM, HZDR, HSZG)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP0: - Einarbeitung in die bereits durchgeführten ADELA I/II-Experimente durch Studium der zugehörigen Anlagendokumentationen und der Zwischen- und Abschlussberichte.  
 - Begonnenes Literaturstudium hinsichtlich Störfallszenarien in Lagerbecken und der Kompaktlagerbeckenproblematik. Derzeitig zunächst die Recherche insbesondere der U.S. amerikanischen Literatur (NUREG).  
 - Einrichtung eines gemeinsamen Netzwerkes „SINABEL“ für alle Projektpartner. Zugriffsberechtigungen wurden für Fachbetreuer und Doktoranden erteilt.  
 - Beginn der Erstellung einer gemeinsamen Literaturdatenbank (aller Projektpartner) mit der Software Jabref.
- AP1: Diskussion bezüglich der Konzeption der neuen Anlage (siehe auch Projekttreffen am 11.12.2013) für folgende Punkte: Nachzubildendes BE, Dimensionierung der Spalte zwischen dem BE und den Randelementen, Leistungsprofilierung der Heizelemente, Abstandhalter, Wärmebrückenproblematik/Isolierung
- AP2: keine Beteiligung von TUD-WKET
- AP3: keine Beteiligung von TUD WKET
- AP4: noch nicht begonnen (geplanter Zeitraum 11/14-07/17)

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP0: - Fortsetzung und Auswertung des Literaturstudiums  
 - Einarbeitung in den Systemcode ATHLET  
 - Teilnahme am „Short Courses of Multiphase Flow“ in Zürich zur Vertiefung der Kenntnisse hinsichtlich Mehrphasenströmungen und der Wärmeübertragung mit Phasenänderung und zum Austausch neuester Erkenntnisse auf diesen Gebieten. Weitere Schwerpunkte: Phänomene bei Störfällen, Wärmeübergang bei Brennstabbündeln, System Codes und deren Anwendungsgrenzen
- AP1: - Folgetreffen aller Projektpartner bei TUD-WKET in der zweiten Januarhälfte zur Auslegung der geometrischen und thermohydraulischen Auslegungsparameter  
 - Beginn der konstruktiven Planung der Anlage  
 - Beschaffung der Mess- und Steuerungstechnik

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 027B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt B: Simulation von Strömung und Wärmetransport unter den Bedingungen eines Lagerbeckens		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2013 bis 30.09.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 348.852,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Fröhlich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Gesamtvorhabens ist die Gewinnung gesicherter Kenntnisse über die Wärmetransportprozesse für den Fall eines teilweise bzw. vollständig ausgedampften Brennelement-Lagerbeckens (BE-LB). Mittels Experimenten und Simulation erfolgt die Prognose unterschiedlicher Störfallszenarien. Im vorliegenden Teilprojekt werden CFD-Simulationen des experimentell untersuchten Brennstabündels unter Berücksichtigung aller wesentlichen Mechanismen durchgeführt. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Wärmetransport durch Konvektion und Leitung im Gas, der Wärmeleitung innerhalb der Brennstäbe (BS) sowie dem Strahlungsaustausch. Simulationen des Brennelement Dummys der HS Zittau-Görlitz (07NUK027D) dienen der Validierung der numerischen Methode und sind prototypisch für Brennelemente von Druckwasserreaktoren. Die gewonnenen Ergebnisse der Modellierung eines Brennelementes liefern eine Datenbasis für das HZ Dresden Rossendorf (07NUK027C), während dort durchgeführte Simulationen des Containments als Randbedingungen in die eigenen Simulationen zurückfließen. Simulationen des am WKET durchgeführten Integralexperimentes (IE) (07NUK027A) an einem für Siedewasserreaktoren typischen Brennelements dienen zur Verifizierung der dort gewonnenen Daten und als Basis für die Weiterentwicklung der Integralcodes (07NUK027A).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- 2.1 Simulation Wärmetransport im BE-Dummy
  - BED1 Geometriemodellierung und Gittererzeugung Einzelexperiment (EE)
  - BED2 Simulation EE, Transition, Turbulenzerzeugung durch Abstandhalter
  - BED3 Variantenrechnung EE
- 2.2 Simulation Integralexperiment
  - INT1 Diskussion geometrische und thermohydraulische Auslegungsparameter
  - INT2 Geometriemodellierung und Gittererzeugung IE
  - INT3 Produktionsrechnung IE für verschiedene Betriebspunkte
  - INT4 Auswertung und physikalische Interpretation (mit WKET und HZDR)
  - INT5 Validierung des gesamten Simulationsmodells am Integralexperiment in Koop. mit WKET
  - INT6 CFD Modellierung des BE für Szenarien mit stationären Randbedingungen
  - INT7 Szenarien mit instationären Randbedingungen
- 2.3 Modulentwicklung für Integralcodes
  - MOD1 Bereitstellen Simulationsdaten EE für Modulentwicklung
  - MOD2 Bereitstellen Simulationsdaten IE für Modulentwicklung
  - MOD3 Sensitivitätsstudien nach Bedarf, Bestimmung von Modulunsicherheiten

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

Das Arbeitspakt BED1 wurde begonnen im Austausch mit HS Zittau-Görlitz. Ein separater Termin am 04. Februar 2014 an der HS Zittau-Görlitz dient der Diskussion bisheriger Experimente und der Abstimmung im Rahmen von SINABEL geplanter Arbeiten.

Die Mitwirkung an der Auslegung des IE (INT1) wurde ebenfalls begonnen und wird in einem Treffen der Projektpartner speziell zu diesem Thema am 28. Januar 2014 am WKET weiter vorangetrieben.

In Vorbereitung auf die anstehenden numerischen Simulationen des EE (BED2) und des IE (INT2), insbesondere zur Klärung der möglichen Regime und zur Analyse verschiedener Einflussfaktoren wurden erste Abschätzungen sowie numerische Simulationen mit vereinfachten Testfällen durchgeführt. Ergebnisse dieser Vorbetrachtungen sind beispielsweise Aussagen zur notwendigen räumlichen Auflösung des Simulationsgebietes und zur Wahl der numerischen Verfahren (Turbulenzmodell etc.). Außerdem wurde mit der Analyse des Einflusses unterschiedlicher Randbedingungen am oberen Ende der Brennelemente und Brennstäbe auf die Strömung in den BE- und BS-Zwischenräumen sowie des Anteils der Wärmestrahlung zwischen den BE und BS und der axialen Wärmeleitung in den BS am Gesamtwärmetransport begonnen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Modellentwicklung des BE Dummys der HS Zittau Görlitz (BED1) wird zügig vorangetrieben und im ersten Halbjahr 2014 abgeschlossen. Darauf folgen erste Simulationen des EE (BED2) mit Vergleich und Validierung der erzielten Ergebnisse anhand experimenteller Ergebnisse der HS Zittau-Görlitz.

Ergebnisse des EE dienen dem Teilprojekt des Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (07NUK027C) als Validierungsdaten für die Modellierung des BE als poröser Körper.

Das Paket INT1 wird in Zusammenarbeit mit den übrigen Teilprojekten weiterhin unterstützt. Mit der Fortführung der begonnenen Analyse von Einzeleffekten mittels vereinfachter Modelle wird weiter an einem aufwandsoptimalen Modell für die Simulation des Integralexperiments gearbeitet.

Eine studentische Hilfskraft konnte für das Projekt gewonnen werden, die sich im Weiteren speziell mit der Analyse der Wärmestrahlung in der untersuchten Konfiguration beschäftigen wird. Es ist die Anfertigung einer Belegarbeit aus dem Aufgabenfeld des Projektes vorgesehen.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.; Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 027C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Codes; Teilprojekt C: Analyse und CFD-Modellentwicklung der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2013 bis 30.09.2017		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 348.892,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Krepper

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zur Berechnung der axialen und radialen Stabtemperaturprofile bei unterschiedlichen Störfallszenarien sowie zur Beurteilung der Kühleffektivität unterschiedlicher Mechanismen im Brennelement-Lagerbecken (Zirkulationsströmungen, Verdampfung, Dampfaufstieg, Kaltgas-einbruch, Strömungsinstabilitäten, Gasphasenturbulenz) werden im vorliegenden Teilprojekt CFD-Methoden mit dem Ansatz des porösen Körpers angewendet. Die notwendige Validierung der zu entwickelnden Modelle erfolgt sowohl an integralen als auch kleinskaligen Experimenten mit einem hohen Instrumentierungsgrad, die in anderen Teilprojekten des Verbunds durchgeführt werden. Der Modellansatz des porösen Körpers wird speziell mit Hilfe der Versuche an der TU-Dresden und den CFD-Simulationen für ein einzelnes Brennelement im HZDR sowie an der TUD-ISM entwickelt und parametrisiert.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Arbeiten beginnen mit einem ausführlichen Literaturstudium. Als Ergebnis werden konkrete Störfallszenarien herausgearbeitet und kritische Konstellationen identifiziert. Hierfür und für die Identifizierung des interessanten Parameterbereichs werden die an der TU-WKET durchgeführten ADELA-Experimente analysiert.

Die Strömung in einem Brennelement wird auf der Grundlage des Ansatzes des porösen Körpers simuliert. Hierzu werden die Größen des Modells des porösen Körpers abgeleitet, die die Strömung im Einzelbrennelement in guter Näherung wiedergeben.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird ein CFD-Modell für eine Anordnung mehrerer Brennelemente in einem Lagerbecken sowie der Raum darüber erstellt. Unter Anwendung des erarbeiteten CFD-Modells werden die ausgewählten Störfallszenarien simuliert, die von einer konkreten Beladungsstruktur und Kühlsituation ausgehen.

Schließlich werden Schnittstellen für die Modellierung mit Lumped Parameter Codes bestimmt. Die Anwendung dieser Codes für diese Aufgabe ist zwar weniger zuverlässig aber dafür weniger aufwendig und kann deshalb flexibler durchgeführt werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Laut Arbeitsplan wurde zunächst eine Literaturrecherche zu bisherigen Arbeiten durchgeführt. Kaliatka et al. (2010, 2013) berichten über die Anwendung von Systemcodes und Lumped Parameter-Codes zur Behandlung der Probleme in Brennelementlagern am KKW Ignalina (Litauen), das mit RBMK-Reaktoren ausgerüstet ist. Das KKW wurde 2009 endgültig abgeschaltet. Die Brennelemente sind in 12 verbundenen Abklingbecken gelagert. Es wurden verschiedene Szenarien des Ausfalls des Kühlsystems untersucht. Die Ergebnisse lassen sich auch auf die Situation an SWR übertragen. Das Absinken des Wasserspiegels, der Anstieg der Hüllrohrtemperaturen, beginnende Oxidation mit Luftsauerstoff sowie beginnende Wasserstoff-Zirkon-Reaktionen konnten simuliert werden.

Trotz der flexiblen Einsatzfähigkeit können mit Lumped Parameter Codes wichtige Strömungsphänomene, wie Vermischung, natürlicher Konvektion und Schichtung nur unzureichend modelliert werden. Es wird zwar die natürliche Konvektion im Brennelement berücksichtigt, aber für die Strömungspfade um die Lagergestelle werden vereinfachte Annahmen getroffen. Damit ist die Auswirkung der räumlichen Anordnung von Brennelementen in Lagerbecken auf die Wärmeabfuhr mit Lumped Parameter Codes nur bedingt berechenbar. Eine Alternative kann nur der Einsatz von CFD-Codes oder zumindest die Kopplung von Lumped Parameter Codes mit CFD-Codes sein.

Boyd (2000) veröffentlichte die Berechnung des dreidimensionalen natürlichen Konvektionsfeldes in und um ein BE-Lagerbecken, das Lagergestell und innerhalb des Containments mit dem kommerziellen CFD-Code FLUENT. Das mit BE beladene Kompaktlagergestell wurde als poröser Körper betrachtet. Durch die Untersuchungen konnte der Zusammenhang zwischen Alter der Brennelemente und maximaler Temperatur bestimmt werden. Es wurden Sensitivitätsstudien zur Lage der BE, Belüftung des Containments uvm. durchgeführt. Ye et al. (2011) veröffentlichten CFD-Untersuchungen, bei denen der Einfluss der Position der Einlassöffnung für gekühltes Beckenwasser in ein Brennelementlager auf die Temperaturverteilung unter regulären Betriebsbedingungen untersucht wurde. Auch Hung et al. (2013) berichteten von CFD-Untersuchungen des Versagens der Kühlung in einem Brennelementlager, wobei Siedevorgänge berücksichtigt wurden.

Die zitierten Publikationen zeigen, dass bereits eine Reihe von CFD-Untersuchungen nach dem hier beantragten Konzept des porösen Körpers durchgeführt und damit die Tragfähigkeit des Konzepts demonstriert wurde. Eine Reihe weiterer wichtiger Szenarien wurde jedoch noch nicht behandelt (z. B. Wasserschloss, Leckagen). Es fehlte einerseits der Vergleich zu Lumped Parameter-Codes. Andererseits wurde auch kein Vergleich zu Experimenten durchgeführt. In den meisten Fällen wurden nur einphasige Strömungen betrachtet.

In weiteren Treffen der Projektpartner werden Referenzgeometrien hinsichtlich Containment, Lagerbecken, Lagergestell und Brennelemente vereinbart. Zu untersuchende Störfallszenarien werden abgestimmt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 027D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegetriebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2013 bis 30.09.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 434.394,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Kästner	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Anhand von kombinierten Experimenten und Simulationen sollen gesicherte Kenntnisse über die Wärmetransportprozesse für den Fall eines teilweise bzw. vollständig ausgedampften BE-LB (Brennelement-Lagerbecken) sowohl innerhalb der Brennstabbündel von BE (Brennelemente) als auch in den Zwischenräumen zwischen den BE geliefert werden, um damit über die Modellbildung und -anwendung die Entwicklung der axialen und radialen Stabtemperaturprofile bei unterschiedlichen Störfallszenarien prognostizieren zu können.

Der zur Verfügung stehende 16x16 DWR-Brennelement-Dummy stellt für die Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG) die Basis der fluiddynamischen Untersuchungen zu den dichtegetriebenen vertikalen Austauschbewegungen von Gasen in Stabbündelgeometrien dar.

Mit Hilfe der Versuchsanlage sollen Erkenntnisse zu Einzeleffekten erworben und die Strömungsverhältnisse in einem realen Prozess, wobei Wasserdampf durch beheizte Stäbe entsteht, durch ein Modellfluid ersetzt werden. Konkret besteht das Ziel darin, Unterschiede bezüglich des vertikalen Transportverhaltens von Luft, Modellfluiden und Wasserdampf im BE-Dummy zu analysieren und die Modellierung/Simulation dieser Prozesse mit geeigneten Codes zu ermöglichen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in 4 Arbeitspunkte. Bei dem Arbeitspunkt AP0 wurden eine Systemanalyse durchgeführt und die Szenarien festgelegt. Durch das Literaturstudium und die ADELA-Experimente sollen neue Erkenntnisse über Strömungsverhalten erworben und anschließend eine Analyse mit folgenden Inhalten und Zielen durchgeführt werden:

- Zusammenstellung von konstruktiven Aufbauten von BE-LB und Analyse der Phänomenologie für verschiedene Ereignisabläufe in BE-LB
- Bestimmung der die BE-LB-Kühlung beeinflussenden Störfallszenarien, um an der Bilanzgrenze Oberkante BE-LB anlagenunabhängige Energietransport-Parameter als generische Randbedingungen für die Modellierung und die Experimente bereitzustellen (gemeinsam mit TUD-WKET)
- Ermittlung möglicher konservativer Szenarien für den Schutzzielnachweis
- Durchführung von Ähnlichkeitsbetrachtungen und daraus abgeleitete Auswahl und Zusammensetzung von Modellgasen zur Nachbildung überhitzter Dampfdichten im Bereich von 0,2 bis 1,0 kg/m<sup>3</sup> (z. B. Helium-Argon-Mischungen) zur Anwendung im Niedertemperaturbereich im DWR-BE-Dummy
- Recherche zur Strömungsmodellierung dichtegetriebener vertikaler Austauschbewegungen von gasförmigen Fluiden (mit und ohne Hindernissen in vertikalen Strömungskanälen)
- Aus den Rechercheergebnissen abgeleitete Auswahl zu bestimmender Messgrößen



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

Für die Einstellung eines Doktoranden ist die Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters ausgeschrieben worden. Die Besetzung der Stelle erfolgte zum 11. November 2013.

Basierend auf den durchgeführten Arbeiten in der Versuchsanlage ADELA-1 an der TU Dresden und dem Literaturstudium sind Randbedingungen ermittelt worden, die nach dem Ähnlichkeitsprinzip eine Übertragbarkeit der dichtegetriebenen vertikalen Austauschbewegung von Heißdampf auf Modellgase in der Stabgeometrie ermöglichen. Hierbei wurde ein Modellgas zur Nachbildung der Dichteschichtung über dem Wasserspiegel ausgewählt. Weiterhin wurden die klassischen Bilanzgleichungen hergeleitet. Dazu erfolgten in der Arbeitsphase AP0 Überlegungen bezüglich der relevanten Kennzahlen.

Die schwere Zugänglichkeit in den BE erschwert das Einsetzen üblicher Strömungsmesstechniken. Aus diesem Grund sollen neue Messverfahren entwickelt werden. Erste Untersuchungen dazu wurden durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Das weitere Literaturstudium soll zu einer Vertiefung der erworbenen Kenntnisse in der Kerntechnik und Strömungstechnik beitragen. Weiterhin sollen die experimentellen Randbedingungen bestimmt werden und Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Messtechnik unterstützt werden.

In den nächsten Arbeitsschritten sollen die Bedingungen im oberen BE-Bereich analysiert und die für die Modellierung relevanten Kennzahlen in Absprache mit der TU-Dresden festgelegt werden. Weiterhin sollen thermo- und fluiddynamische Randbedingungen/Zustände der überströmenden/ruhenden Modell-Raumatmosphäre ausgewählt werden.

Gemeinsam mit der TU Dresden (TUD-WKET) und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) werden die Ergebnisse der kleinskaligen Experimente hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Randbedingungen bewertet, die den Energietransport an der Bilanzgrenze zwischen der Oberkante des BE-Lagerbeckens (BE-LB) und der Atmosphäre in dem großvolumigen Raum darüber (Reaktorhalle/Containment) bestimmen.

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

Im Berichtszeitraum fanden im Rahmen des Projektes zwei Arbeitstreffen (AT) an der TU-Dresden statt: Kick-Off-Meeting am 07.10.2013 und 2. AT am 11.12.2013.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 027E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt E: Ortsaufgelöste Temperatur- und Gasphasengeschwindigkeitsmessung zur Analyse der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2013 bis 30.09.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 316.464,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hampel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundprojektes sollen die Wärmetransportprozesse ausdampfender Brennelemente-Nasslager für verschiedene Störfallszenarien untersucht und modelliert werden. Dazu ist die Kenntnis der Gasphasentemperatur und -geschwindigkeit in den Zwischenräumen einzelner Brennstäbe im Brennelement von essentieller Bedeutung. Aufgrund der erschwerten mechanischen sowie optischen messtechnischen Zugänglichkeit ist die Anwendung konventioneller Messmethoden eingeschränkt. Das Ziel des Teilprojektes ist die Entwicklung eines minimalinvasiven Messsystems zur Bestimmung der ortsaufgelösten Messung der Gasphasentemperatur und -geschwindigkeit für den Einsatz in einem Integralexperiment.

Im Verbundprojekt besteht Zusammenarbeit mit folgenden Einrichtungen:

- Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik, Professur für Wasserstoff- und Kernenergietechnik
- Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Strömungsmechanik
- Hochschule Zittau-Görlitz
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Analyse ADELA-Experimente für spezielle Messtechnik, Literaturstudium

AP2: Selektion / Erprobung von Messverfahren

AP3: Entwicklung und Aufbau der Instrumentierung

AP4: Erprobung und Kalibrierung spezieller Instrumentierung an eigenem Strömungsversuchsstand

AP5: Unsicherheitsanalysen

AP6: Einsatz der Strömungsmessverfahren am Integralexperiment, Datenanalysen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Aus dem ADELA II-Bericht wurden die aufgetretenen Randbedingungen in Form physikalischer Größen entnommen. Dabei sind Maximaltemperaturen von  $\vartheta = 475^{\circ}\text{C}$  in der Dampfatmosphäre aufgetreten. Jedoch sind für die SINABEL-Experimente deutlich höhere Temperaturen zu erwarten, da die Wärmeisolierung des Versuchstandes weiter optimiert werden soll. Weiterhin erfolgte aus dem Dampfmassenstrom eine Abschätzung für den zu erwartenden Geschwindigkeitsbereich.

Als Grundlage für eine Entscheidungsmatrix wurde die Literatur nach möglichen Messmethoden durchsucht. Eine Konkretisierung ist jedoch erst nach endgültiger Festlegung der Anforderungen möglich.

Zur Realisierung der Ortsauflösung wird das Gittersensorprinzip favorisiert. Dabei wird ein Netz aus Drähten mit quadratischen Maschen zweier um  $90^{\circ}$  gegeneinander gedrehten Ebenen aus parallelen Drähten. Die Messpunkte sind durch Integration geeigneter Sensoren an den Kreuzungspunkten definiert. Die Abtastung erfolgt sequentiell, da aufgrund der Beschaffenheit des Gittersensors keine gleichzeitige Messung an allen Kreuzungspunkten möglich ist. Wird das Prinzip der Hitzdraht-Anemometrie gewählt, ist die Anwendung der konventionellen Messmethoden (CTA, CCA) aufgrund der thermischen Trägheit beim Aufheizen der Sensorelemente nur bedingt anwendbar. Daraus resultierend ist eine Reduzierung der Abtastrate und demzufolge der zeitlichen Auflösung der Messung oder die Entwicklung einer neuartigen Messmethode für die Hitzdraht-Anemometrie.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Abstimmung der Randbedingungen als Auslegungsparameter für spezielle Messtechnik mit Projektpartnern und daraus folgend die Reduzierung der in Frage kommenden Messverfahren. Dazu sind weitere Treffen bei WKET und HSZG geplant.

AP2: Entwicklung und Vorversuche zu einer neuen Messmethode für die Hitzdraht-Anemometrie. Weiterhin ist zu prüfen, inwiefern durch die Anwendung alternativer Messverfahren die Messung weiterer Parameter (Phase, Dampfgehalt) möglich ist.

AP3: Konzeption einer Elektronik für die ausgewählten Messverfahren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 028A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt A: Analyse von Containment-Phänomenen zur Optimierung von Störfallmaßnahmen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.034.532,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Allelein

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Durch eine adäquate Modellierung der Vorgänge im unteren Plenum eines Siedewasserreaktors bei einem schweren Unfall und der weitergehenden Modellierung der Phänomene der Gebäudekühlung im Containment eines Leichtwasserreaktors werden Bausteine bereitgestellt um den kompletten Störfallablauf von dem auslösenden Ereignis, über die Kernzerstörung, der Aerosolausbreitung im Containment bis hin zum Quellterm in die Umgebung verlässlicher simulieren zu können. Hierzu sollen vor allem die GRS-Codes ATHLET-CD und COCOSYS, die miteinander koppelbar sind, verwendet werden.

Im Rahmen dieses Teilprojektes wird der Code COCOSYS für die Analyse passiver Containment-Kühlsysteme erweitert und validiert sowie die Unsicherheit von mit COCOSYS durchgeführten Quellterm-berechnungen für deutsche SWR-/KONVOI Anlagen quantifiziert. Des Weiteren soll ein Modell in ATHLET-CD für die Prozesse im unteren Plenum eines SWR bei einem schweren Störfall adaptiert und implementiert werden. Abschließend sollen Möglichkeiten für eine Rückhaltung einer Kernschmelze im Sicherheitsbehälter, aber auch weitere Accident Management Maßnahmen vergleichend betrachtet werden, um Handlungsalternativen für Notfallmaßnahmen aufzuzeigen.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Koordination
- AP2: Entwicklung SWR-Modell für das untere Plenum
- AP3: Weiterentwicklung des COCOSYS-Moduls COMO (AP3.1): Modellverbesserung bzw. -erweiterung (AP3.1), Anbindung an COPOOL (AP3.2), Erhöhung der Rechenstabilität (AP3.3), Validierung von COMO (AP3.4), Anlagenrechnungen (AP3.5)
- AP4: Anwender-Support: Datensatzbereitstellung (AP4.1), Programmunterstützung (AP4.2)
- AP5: Unsicherheitsanalysen für Quelltermberechnungen: Überprüfung wichtiger Module für das Spaltprodukt- und Aktivierungsproduktverhalten (AP5.1), Anpassung und Optimierung von DWR- und SWR-Datensätzen für Untersuchungen des radiologischen Quellterms (AP5.2), Durchführung und Analyse der 'best-estimate'-Rechnungen (AP5.3)
- AP6: Auswahl und Bewertung von AM-Maßnahmen (AP6.1 + 6.2) (Auswirkungen für die Kühlung einer Kernschmelze im Sicherheitsbehälter, Beiträge zu Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des Verbundprojektes sind in den AP1, AP2, AP3, AP4 und AP5 Arbeiten im 2. Halbjahr 2013 durchgeführt worden.

Im Berichtszeitraum haben zum AP1 die folgenden Arbeiten stattgefunden:

- Spezifizierung und Erteilung des Unterauftrags an die GRS

- Festlegung der Störfallszenarien und SAM-Maßnahmen (Projektmeeting in Stuttgart)
- Projekttreffen in Dresden.

Der Unterauftragnehmer GRS hat im AP2 folgende Arbeiten durchgeführt:

UA-AP2.1: Für die Programmversion ATHLET-CD 2.2A wurde ein vorhandener Datensatz dahingehend überarbeitet, dass ein generischer SWR-69-Datensatz an die Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft übergeben werden konnte.

Der für die Optimierung von Störfallmaßnahmen in DWR notwendige Datensatz wird von der GRS auf Basis eines Samples des IKE dahingehend erweitert, dass alle notwendigen Module des Programmteils zur Kernzerstörung überarbeitet und implementiert werden, so dass ein generischer KONVOI-Datensatz für die Analysen zur Verfügung steht. Darüber hinaus werden Teilsysteme der Thermohydraulik erweitert.

Für die Containmentanalysen an der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik (RWTH-LRST) wird ein generischer 80-Zonen KONVOI-Datensatz erzeugt, der hinreichend genau nodalisiert ist, um die Phänomene während eines 50 cm<sup>2</sup>-Lecks im Cold-/Hot-Leg zu untersuchen. Dazu werden auch die notwendigen Einträge aus dem Primärkreis in das Containment in tabellarischer Form auf Basis von ATHLET-CD/COCOSYS-Rechnungen bereitgestellt.

UA-AP3.1: Auswahl AM-Maßnahmen

Die Arbeiten zur Erstellung des Meilensteins M41, für die IKE federführend ist, beinhaltet die Teilnahme am Projekttreffen am 11.09.2013 am IKE, wozu vorab mögliche SAMG und SAMG-Methoden untersucht wurden. Am Meilensteinbericht arbeitet der Unterauftragnehmer GRS mit.

Für die Weiterentwicklung des schon existierenden Gebäudekondensators (AP3) ist die Einarbeitung in COCOSYS und in den Programmcode des COMO Moduls abgeschlossen. CoPool ist im Rahmen von WASA-BOSS in diesem Berichtszeitraum beschafft und installiert worden. Erste Testläufe sind durchgeführt worden.

AP4: Für erste Unsicherheitsanalysen wurde das Szenario Kühlmittelverluststörfall mit einem 50 cm<sup>2</sup> Leck im heißen Strang mit Ausfall der Dampferzeugerwärmeabfuhr (ND-Fall) eines deutschen Druckwasserreaktor zugrunde gelegt. Die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse ist mit dem GRS Programm SUSANA, kombiniert mit COCOSYS und einem generischen 20 Zonen KONVOI Datensatz, durchgeführt worden. Die Auswertung der Ergebnisse wird derzeit durchgeführt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Das nächste Projekttreffen ist für den 31.3-1.4.2014 in Karlsruhe geplant.

AP2: Die Entwicklung eines SWR-Modells für das untere Plenum ist vom Unterauftragnehmer GRS für den nächsten Berichtszeitraum geplant. Die Übergabe des COCOSYS Datensatzes sowie der Einspeisetabellen ist für Januar 2014 geplant.

AP3: Planungsgemäß werden im kommenden Berichtszeitraum die Arbeiten am Quellcode des COMO-Modells fortgesetzt. Konkret wird das Simulationsmodell um Wärmeübergangskorrelationen für Kondensatoren mit senkrechten Rohren ergänzt.

AP4: Für den folgenden Berichtszeitraum ist geplant, die UaSA für den 20 Zonendatensatz durch Berücksichtigung der chemischen Reaktionen und die Differenzierung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingabeparameter von der Dreiecksverteilung zu Verteilungen, die durch Experten auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes bestimmt wurden zu erweitern. Außerdem soll der Einfluss der gewählten unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der unsicheren Eingabeparameter auf die Ergebnisse der UaSA ausgewertet werden. D.h. der Einflusses der Dreiecksverteilung auf das Ergebnis wird mit den ‚state-of-the-Art‘ Verteilung verglichen. Im nächsten Schritt soll nach Übergabe des 80 Zonendatensatzes eine vollständige UaSA durchgeführt werden und mit der UaSA des 20 Zonendatensatzes verglichen werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Anlässlich der Jahrestagung Kerntechnik im Mai 2014 wird das Verbundprojekt vorgestellt. Die positive Rückmeldung der Programmkommission liegt vor.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 028B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt B: Druckwasserreaktor-Störfallanalysen unter Verwendung des Severe-Accident-Code ATHLET-CD		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 203.674,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Kliem

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Teilprojekts werden sowohl die physikalischen Modelle und die Datenbasis des Störfallcodes ATHLET-CD an Hand der Ergebnisse von Störfallanalysen bewertet als auch das Verhalten der Reaktoranlage im Verlauf von schweren Störfällen analysiert. Zusätzlich werden die Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen in der Früh- und Spätphase vor einem RDB-Versagen sowie die hierfür heranzuziehenden Einleitungskriterien für einen generischen deutschen Druckwasserreaktor untersucht und analysiert. Ein wichtiges Ziel ist die Ermittlung der maximalen Zeitspanne, die für Maßnahmen und Entscheidungen des Personals zur Verfügung steht, um die Störfallfolgen abzumildern. Dabei werden verschiedene Möglichkeiten für Gegenmaßnahmen vor einem RDB-Versagen analysiert.

Das Projekt wird im gemeinsamen Vorhaben mit der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, der Universität Stuttgart - Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), des Karlsruher Institut für Technologie mit den Instituten für Fusionstechnologie und Reaktortechnik (KIT-IFRT), Kern- und Energietechnik (KIT-IKET), Neutronenphysik und Reaktortechnik (KIT-INR), der Ruhr-Universität Bochum - Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft (RUB-LEE) und der RWTH Aachen - Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik (RWTH-LRST) durchgeführt und ist über einen Kooperationsvertrag mit den weiteren Teilvorhaben des Projektverbundes 02NUK028 verbunden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Rahmen des Verbundprojekts beteiligt sich HZDR an den Arbeitspaketen 3.2, 4.1 und 4.2. Entsprechend Arbeitsplan für das Teilprojekt B sind die Arbeiten wie folgt unterteilt:

- TPB-AP1: Durchführung von Störfallanalysen
- TPB-AP2: Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen für DWR

Das Untersuchungsprogramm beinhaltet die Auswahl geeigneter Störfallsequenzen und Notfallmaßnahmen, die Durchführung von Störfallanalysen für ausgewählte Szenarien, die Bewertung der Modellbasis bis zur Kernzerstörungsphase auf Basis der Ergebnisse sowie eine Bewertung und Optimierung von Notfallmaßnahmen bezüglich ihrer Wirksamkeit.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Auf dem Meeting am 04.-05.11.2013 wurde beschlossen, dass sich HZDR zusätzlich am AP4.4 – Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen) beteiligt. Über die damit verbundenen Änderungen wurde der Projektträger informiert. Im AP4.1 wurde eine Zusammenstellung der für die Störfallanalysen benötigten Daten und Notfallmaßnahmen sowie eine Vorschlagsliste für Störfallszenarien erarbeitet. Diese Informationen wurden auf dem Meeting am 11.09.2013 in Stuttgart vorgestellt und als Diskussionsgrundlage für die Auswahl der zu simulierenden Störfallszenarien verwendet. Auf dieser Basis erfolgte eine Konkretisierung der zu untersuchenden Transienten und Notfallmaßnahmen sowohl für DWR als auch für SWR Anlagen. Für die DWR Simulationsrechnungen wurden der Station Blackout und das mittlere bzw. kleine Leck als Basisszenarien ausgewählt. HZDR beteiligt sich an der Berichterstellung zum Meilenstein MS41.

Im AP3.2 wurden Testrechnungen mit dem IKE Eingabedatensatz für einen generischen KONVOI Reaktor durchgeführt. Entsprechend der Festlegungen auf dem Kick-off Meeting beteiligte sich HZDR an einem ersten ‚Mini-Benchmark‘ zum Test des IKE-Datensatzes. Nach vollständiger Prüfung des Datensatzes wurden eine Reihe von Modifikationen und Erweiterungen am Datensatz vorgenommen. Dies betrifft u. a. die Umstellung vom 5- auf das 6-Gleichungsmodell, das Reibungsmodell, die Berücksichtigung nichtkondensierbarer Gase, das Bortransportmodell sowie Korrekturen und Erweiterungen bei verschiedenen GCSM Signalen (u. a. Notkühlein speisung und Auswertung von Massenbilanzen). Der aktualisierte Datensatz wurde mit zwei Störfallszenarien getestet. Für die bisher durchgeführten Simulationsrechnungen wurde eine ATLAS-Visualisierung erstellt. Die Ergebnisse aller Rechnungen zum 200 cm<sup>2</sup> Leck wurden den Projektpartnern mit einer Technischen Notiz zur Verfügung gestellt. Durch eine detaillierte Auswertung der bis jetzt durchgeführten Simulationsrechnungen konnten Schwachstellen im derzeitigen Datensatz erkannt und konkrete Vorschläge für Modellverbesserungen erarbeitet werden.

Gemeinsam mit dem IKE wurde eine Liste für alle seitens GRS in den generischen KONVOI Datensatz zu implementierenden Modellerweiterungen erarbeitet. Der aktualisierte Datensatz und die Liste wurden der GRS übergeben. HZDR koordiniert alle notwendigen Abstimmungen zur Weiterentwicklung des IKE-Datensatzes durch die GRS.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

In den nächsten 6 Monaten sind folgende Arbeiten geplant:

- die Zusammenstellung der für die Störfallanalysen benötigten Daten, Randbedingungen und Notfallmaßnahmen wird überarbeitet und entsprechend der Festlegungen der letzten beiden Projekttreffen konkretisiert
- nach Übernahme des von der GRS erweiterten Datensatzes werden die implementierten Modellerweiterungen im Detail geprüft
- mit dem geprüften Datensatz werden im Anschluss eigene Testrechnungen durchgeführt
- für ein konkretes Störfallszenarium sollen entweder ein Benchmark oder Sensitivitätsanalysen für ausgewählte Modell- und Anlagenparameter durchgeführt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

P. Tusheva, Y. Kozmenkov, F. Schäfer, S. Kliem, 2013. Technical Note. HLLOCA200 – Comparison between three simulations. (projektinterner Bericht)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 028C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt C: Analyse schwerer Störfälle in LWR zur Evaluierung und Optimierung von Severe-Accident-Maßnahmen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 300.276,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Buck	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens ist es, vor dem Hintergrund der Ereignisse in Fukushima zum einen die Modellierung von Siedewasserreaktor-komponenten sowie der Gebäudekühlung weitergehend zu er-tüchtigen, um somit die Leistungsfähigkeit von Schwerststörfallcodes weiter zu erhöhen, und zum anderen Notfallmaßnahmen anhand von Reaktorrechnungen zu bewerten und zu optimieren. Ziel des Teilvorhabens ist es, Störfallmaßnahmen zu untersuchen, die dazu beitragen können, das Fortschreiten schwerer Unfälle mit Kernschmelzen aufzuhalten oder zumindest deren Folgen abzumildern. Hierzu werden systematische Untersuchungen zum Unfallablauf mit dem Störfallcode ATHLET-CD sowie mit spezialisierten Rechen-modellen des Zuwendungsempfängers durchgeführt. Repräsentativ für die in Deutschland noch betriebenen Reaktoren (DWR-KONVOI und SWR) sollen anhand generischer Szenarien charakteristische Eckpunkte im Ablauf und Möglichkeiten der Kühlung und Rückhaltung durch Einspeisung von Wasser in den Kern sowie durch Kühlung von Kernschmelze im Sicherheitsbehälter durch Flutung der Reaktorgrube (bei SWR) herausgearbeitet werden. Hierdurch soll eine Grundlage für die Verbesserung von Accident-Management-Maßnahmen geschaffen werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Simulation postulierter Störfälle/Unfälle in deutschen Anlagen: Erstellung von ATHLET-CD-Eingabedatensätzen für DWR (1.1) und SWR (1.2), Definition zu untersuchender Störfallsequenzen (1.3), Rechnungen zu ausgewählten Störfallszenarien ohne AM-Eingriffe (1.4), Beitrag zur Bewertung der Modellierungsbasis (1.5).
- AP2: Zusammenstellung geeigneter Störfallmaßnahmen: Recherche (2.1), Selektion (2.2)
- AP3: Möglichkeiten der Kühlung eines geschädigten Kerns durch Einspeisung in den RDB: Abbil-dung/Modellierung zu untersuchender Szenarien und AM-Maßnahmen (3.1), Untersuchung zu Kühlung und Rückhaltung im Kern für DWR und SWR (3.2), Untersuchung zu Kühlung und Rückhaltung im unteren Plenum (3.3).
- AP4: Möglichkeiten der Kühlung und Rückhaltung von Kernschmelze im Sicherheitsbehälter.
- AP5: Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen: Auswertung von Störfallana-lysen (5.1), Bewertung der Maßnahmen (5.2), Ausarbeitung von Empfehlungen (5.3).
- AP6: Dokumentation und Berichte



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Es wurde ein vorläufiger Eingabedatensatz für ATHLET-CD zur Simulation eines generischen Druckwasserreaktors von Typ Konvoi erstellt. Dieser wurde fortlaufend überprüft und weiter entwickelt, u. a. wurde er um die Simulation der Prozesse im unteren Plenum bis hin zum möglichen Behälterversagen erweitert. Der Datensatz wurde auch den anderen Partnern im Verbundprojekt zur Verfügung gestellt.
- AP1.2: Nach erteilter Genehmigung durch den Betreiber (RWE) wurde im Dezember von der GRS ein ATHLET-Eingabedatensatz für eine generische Anlage des Typs SWR-72 verfügbar gemacht. Nach Modifikationen zur Anpassung an die aktuelle ATHLET-Version 3.0A konnten damit erste Testrechnungen erfolgreich durchgeführt werden. Mit der Erweiterung des ATHLET-Datensatzes um die Kernzerstörungsmodellierung (CD-Teil) wurde begonnen.
- AP1.3: Nach der Auswahl der Szenarien (siehe AP2.2) wurden detaillierte Spezifikationen zu Störfallabläufen (einleitendes Ereignis, Ausfall/Verfügbarkeit von Systemen, etc.) erarbeitet.
- AP1.4: Mit dem DWR-Eingabedatensatz für ATHLET-CD (siehe AP1.1) wurden Rechnungen zu einem Störfallszenario mit 200 cm<sup>2</sup> Leck im heißem Strang und Ausfall der aktiven Notkühlsysteme durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit denen der Projektpartner KIT/IRN und FZD verglichen, um zu Projektbeginn eine identische Ausgangsbasis sicher zu stellen. Es wurden ebenfalls erste detaillierte Vergleiche mit Ergebnissen des Integralcodes ASTEC zum selben Störfallszenario ange stellt. Hierbei ergaben sich zum Teil sehr große Unterschiede, sowohl hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs (z. B. Zeit bis Druckbehälterversagen) als auch hinsichtlich wesentlicher sicherheitsrelevanter Größen (z. B. produzierte Wasserstoffmenge).
- AP2.1: Die im vorangegangenen Berichtszeitraum begonnenen Recherchen zu relevanten Störfallpfaden und mitigativen Notfallmaßnahmen wurden abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden in einem Berichts entwurf (siehe AP6.1) dokumentiert.
- AP2.2: Vom IKE wurde im September 2013 ein Projekttreffen organisiert. Hierbei wurden die im Ver bundprojekt zu untersuchenden Störfallszenarien und AM-Maßnahmen festgelegt und die Aufga ben zwischen den Projektpartnern aufgeteilt. Es fand auch eine Abstimmung mit Arbeiten im EU-Projekt CESAM statt.
- AP3.1: Für DWR-Konvoi wurden die Störfallszenarien „mittleres Leck (200 cm<sup>2</sup>)“ und „kleines Leck (50 cm<sup>2</sup>)“ jeweils mit Versagen der Umschaltung auf Sumpfumlauf (Verlust der aktiven Notkühl systeme) implementiert. Als mögliche AM-Maßnahmen wurden Wassereinspeisung über verschie den Systeme (Hochdruck, Niederdruck, Volumenregelsystem) berücksichtigt.
- AP3.2: Für das Szenario „mittleres Leck“ in DWR-Konvoi wurden Simulationen zur Bestimmung der Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen mit später Wassereinspeisung in den RDB (mit unterschied lichen Einspeiseraten über verschiedene Systeme) bei verschiedenen Kernschadenzuständen durchgeführt. Erste Ergebnisse wurden in einem Konferenzbeitrag zusammengefasst, der auf der Jahrestagung Kerntechnik 2014 präsentiert wird.
- AP6.1: Ein Entwurf zum Bericht „Störfallmaßnahmen zur Milderung der Folgen schwerer Reaktorunfälle mit Kernschmelzen“ wurde erstellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: Fertigstellung des Referenzeingabedatensatzes für DWR-Konvoi.
- AP1.2: Fertigstellung des Referenzeingabedatensatzes für SWR-72.
- AP1.4: Rechnungen zu den Störfallszenarien „mittleres Leck“ und „Station Blackout“ für DWR-Konvoi sowie „Station Blackout“ für SWR-72 ohne Berücksichtigung von AM-Maßnahmen.
- AP3.1: Abbildung/Modellierung später Noteinspeisung (nach Beginn Kernzerstörung) für SWR-72.
- AP3.2: Durchführung von Simulationsrechnungen für DWR und SWR zur Bestimmung der Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen mit später Wassereinspeisung in den RDB.
- AP6.1: Fertigstellung des Berichts zu Meilenstein M41 (Katalog möglicher Störfallmaßnahmen).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 028D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt D: Erweiterung und Validierung des COCOSYS Codes für die Analyse des passiven Containment-Kühlsystems		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 236.964,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Cheng	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Hauptzielsetzung dieses Teilvorhabens ist die Erweiterung des COCOSYS-Programms durch Berücksichtigung von Wärmeübertragungsprozessen außerhalb des Containments. Die Vorgehensweise lässt sich wie folgt darstellen:

- Weiterentwicklung geeigneter Modelle, welche die Wärmeübertragungsprozessen außerhalb des Containments beschreiben. Insbesondere werden die Wärmeübertragungsvorgänge von Naturkonvektion von Luft, Wärmestrahlung, und Verdampfung des Wasserfilms berücksichtigt.
- Erweiterung des COCOSYS-Programms durch Implementierung neu entwickelter Modelle.
- Validierung und Anwendung des erweiterten COCOSYS Programms anhand der in AP2 bereitgestellten Daten sowie vorhandener experimenteller Daten aus der Literatur und den internationalen Projektpartnern.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Passive Containment-Kühlsysteme (PCCS) werden sowohl in DWR als auch in SWR verwendet. Das Programm COCOSYS, das von der GRS entwickelt wird, deckt ein weites Spektrum von Vorgängen in Containment ab und findet breite Anwendungen.

Die jetzige Version des COCOSYS-Programms beschränkt sich im Wesentlichen auf Vorgänge innerhalb des Containments. Die Hauptzielsetzung dieses Teilvorhabens ist die Erweiterung des COCOSYS-Programms durch Berücksichtigung von Wärmeübertragungsprozessen außerhalb des Containments, z. B. Naturkonvektion von Luft, Wärmestrahlung und Verdampfung des Wasserfilms, die für einige fortgeschrittene Druckwasserreaktoren eine entscheidende Rolle spielen, um Nachwärme aus dem Containment abzuführen. Weiterhin soll auch die Modellierung sog. Kondensatoren erweitert und die Möglichkeit, mit solchen Systemen mögliche Unfallabläufe positiv zu beeinflussen, untersucht werden. Das AP besteht aus folgenden Arbeitsschritten:

- Systematische Analyse des Wasserfilmverhaltens unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bedingungen, wie Wärmezufuhr, Luftströmung und geometrische Orientierung. Diese Aufgabe wird mit Hilfe von Literaturrecherche und internationaler Zusammenarbeit – bspw. im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen KIT-IFRT und der Shanghai Jiao Tong

Universität (SJTU) bzgl. der Versuchsanlage WABREC (WATER Behavior in RECTangle Channel) – durchgeführt.

- Entwicklung und Validierung eines neuen Modells zur Simulation des Wasserfilmverhaltens.
- Realisierung eines numerischen Verfahrens zur Simulation kombinierender Wärmeübertragungsprozesse außerhalb des Containments, wie Luft-Naturkonvektion, Wärmestrahlung und Wasserfilmverdampfung.
- Implementierung des numerischen Verfahrens in das COCOSYS Programm.
- Validierung und Anwendung des erweiterten COCOSYS Programms anhand der in AP2 neu bereitgestellten sowie vorhandener, experimenteller Daten.
- Erweiterung der Modellierung sog. Kondensatoren, insbesondere des LRST-Moduls COMO (z. B. für vertikale Rohre) und Implementierung in COCOSYS.
- Integration solcher Kondensatoren in den in AP3 entwickelten Datensätze für SWR und KONVOI und Untersuchung des Kondensatoreinflusses auf den Störfallverlauf.

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

Im Berichtszeitraum sind folgende Arbeiten durchgeführt:

- Erweiterte Literaturrecherche bezüglich des Verhaltens des Wasserfilms während des gesamten Verdampfungsprozesses.
- Entwicklung eines neuen Modells zur Beschreibung des Wasserfilm-Verhaltens, unter Berücksichtigung von Filmunterbrechung und Rinnsal-Verhalten, basierend auf theoretischem Hintergrund und experimentellen Beobachtungen, auch unter Einfluss von Scheerströmung an der Oberfläche des Wasserfilms.
- Implementierung des neuen Modells in das COCOSYS Programm und vorläufiger Test des neuen Programms an einem PCCS eines DWR.
- Transfer von Versuchsdaten aus der WABREC Testanlage von SJTU an KIT-IFRT.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Modifikation des Modells zur Beschreibung des minimalen Filmdicken mit Berücksichtigung von Scheerspannung an der Filmoberfläche.
- Ausarbeitung einer analytischen Methode zur Berechnung der Scheerspannung unter gegen gerichteter laminarer Strömung.
- Bewertung des neuen Modells anhand Testdaten von SJTU, insbesondere Modelle für Filmunterbrechung und „Coverage rate“.
- Verbesserung von Wasserfilm Modelle unter Berücksichtigung von Hystereseverhalten.
- Anwendung des erweiterten COCOSYS Programms auf das PCCS eines generischen Sicherheitsbehälters.

### **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 028E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt E: Verbesserung des Lower Head-Modelles für Melcor und Melcor-Rechnungen zu Fukushima		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 368.530,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Miassoedov	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In MELCOR 1.8.6 soll das sehr einfache Modell zum Verhalten einer Kernschmelze im unteren Plenum durch realistischere Modelle ersetzt werden. Dies geschieht im Rahmen einer Promotion am KIT-IKET. Dies ist Teil der Ertüchtigung des MELCOR-Codes mit dem Ziel, zusammen mit anderen Projekt-Partnern die Notfallmaßnahmen während ausgewählter Störfallszenarien für deutsche noch ca. 10 Jahre zum Betrieb vorgesehene Anlagentypen zu bewerten und zu optimieren.

Weiterhin soll auf der Grundlage der von der Ruhr-Universität Bochum zusammengetragenen Anlage-Daten ein MELCOR-Datensatz des KKW Fukushima erstellt werden, mit dem dann der FUKUSHIMA-Unfall simuliert wird. Die erhaltenen Ergebnisse der Simulation liefern einen Beitrag zur Einschätzung des bisherigen Verständnisses des Unfall-Ablaufes. Der Datensatz wird über das Projekt-Ende hinaus genutzt, um neue Erkenntnisse zu diesem Unfall zu verarbeiten, indem z. B. bei Bedarf das Anlagen-Modell erweitert wird oder die bereits gerechneten Szenarien modifiziert werden. Die Erkenntnisse sollen dann in die Sicherheitsbewertung der deutschen noch in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke einfließen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Verbesserung des Lower Head-Modells für den Störfall-Code MELCOR:

In diesem AP werden neue Modelle für das Verhalten einer Kernschmelze im unteren Plenum des Reaktordruckbehälters über eine Schnittstelle an MELCOR gekoppelt. Diese Modelle werden durchgeführten Experimenten validiert.

Simulation des Unfalls in Fukushima mit MELCOR:

In diesem AP wird im ersten Projekt-Jahr zum Unfall in Fukushima eine Datenbasis durch RUB erstellt. Mit Daten erstellt KIT/IKET einen MELCOR-Datensatz der Anlage und führt Rechnungen durch mit dem Ziel, ein tieferes Verständnis über die Phänomene während des Unfallablaufes zu erlangen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Die im Bericht für den Zeitraum 01.03.2013-30.06.2013 angesprochene Software zur Kopplung des MELCOR-Codes mit extern entwickelten Modellen wurde weiter ertüchtigt, so dass auch synchrone Kopplungsmethoden realisiert werden können. Dadurch konnte die numerische Stabilität wesentlich erhöht werden.

Weiterhin wurde, wie geplant eine Literaturrecherche zu möglichen physikalischen Modellen zur Beschreibung einer Kernschmelze im unteren Plenum durchgeführt. Zurzeit favorisieren wir ein an der KTH Stockholm entwickeltes Modell. Es wurde Kontakt mit den schwedischen Kollegen aufgenommen, um Möglichkeiten einer Zusammenarbeit zum Zwecke der Umsetzung dieses Modells in MELCOR zu prüfen. Über diesbezüglich neue Entwicklungen werden wir den Projektträger jederzeit informieren bzw. die Zustimmung zu möglichen Kooperationen einholen.

Schließlich wurde, wie geplant, ein MELCOR-Modell der LIVE-Anlage erstellt und erste Nachrechnungen von Versuchen mit Wasser als Modell-Fluid durchgeführt. Zurzeit werden die Material-Daten für die üblicherweise als Modell-Fluid verwendeten Salz-Schmelzen in dem Material-Modul von MELCOR hinterlegt.

AP2: Die Arbeiten des KIT-IKET für dieses Arbeitspaket beginnen erst im April 2014.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Es wird weiter an der Hinterlegung der Material-Daten für Salz-Schmelzen im Material-Modul von MELCOR gearbeitet. Damit sollen im Folgenden Berichts-Zeitraum dann auch Rechnungen durchgeführt werden, die als Referenz zur Bewertung späterer Rechnungen mit neu an MELCOR gekoppelten Modellen dienen.

Weiterhin wird die Programmierung des neu anzukoppelnden Modells begonnen.

AP2: Im April wird mit der RUB ausgewertet, welche für die Nachrechnung des FUKUSHIMA-Unfalls verwertbaren Daten beschafft werden konnten. Danach wird mit der Erstellung eines MELCOR-Datensatzes begonnen.

Darüber hinaus hat sich IKET beim Projekt-Treffen im November in Rossendorf verpflichtet, MELCOR-Vergleichsrechnungen zu den von der Universität Stuttgart durchzuführenden ATHLET-CD-Rechnungen zu liefern. Hierzu wird mit der Erstellung des MELCOR-Datensatzes begonnen, sobald die zu verwendenden ATHLET-CD-Datensätze endgültig abgestimmt sind.

### 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 028F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt F: Beiträge zur Codevalidierung anhand von SWR-Daten und zur Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 395.320,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Sanchez Espinoza	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Für die Simulation eines schweren Störfalls in einem Siedewasserreaktor soll die Validierungsbasis des Programms ATHLET-CD erweitert werden. Durch die Nachrechnung einzelner für Siedewasserreaktoren relevanter CORA und QUENCH Experimente werden insbesondere Strukturtemperaturen, Hüllrohroxidation, Wasserstofffreisetzung und Materialverlagerung untersucht. Mit Hilfe der Ergebnisse sollen entsprechende Programmverbesserungen vorgenommen werden. Durch Rechnungen für eine gesamte Anlage sollen Störfallmaßnahmen heraus gearbeitet werden, die im Falle eines schweren Unfalls mit Kernschmelze dazu beitragen können, das Fortschreiten des Unfalls aufzuhalten oder, falls dies nicht möglich ist, zumindest die Freisetzung von Radioaktivität außerhalb der Anlage abzumildern.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Qualifizierung von ATHLET-CD für Siedewasserreaktoren

In diesem Arbeitspaket werden ausgewählte CORA-Versuche für Siedewasserreaktoren mit dem Programmsystem ATHLET-CD zu Validierungszwecken nachgerechnet. Hierfür ist es notwendig, die experimentellen Daten aufzubereiten und sich mit der Durchführung der Experimente zwecks der Modellbildung auseinanderzusetzen (AP1.1).

Darauf aufbauend sind die ausgewählten CORA-Experimente auf geeigneter Weise in ATHLET-CD zu repräsentieren (Inputdeck-Erstellung) und die geeigneten Modelle zur Beschreibung der physikalischen Phänomene auszuwählen (AP1.2).

Danach werden die ATHLET-CD Simulationen der SWR CORA-Experimente durchgeführt und systematisch ausgewährt, wobei der Vergleich der aufbereiteten Messdaten mit den gerechneten Daten ein wesentliches Element der Codevalidierung darstellt (AP1.3). Dabei werden Defizite in einzelnen Modellen identifiziert und Verbesserungen ausgearbeitet.

AP2: Möglichkeiten der Kühlung eines geschädigten Kerns durch Einspeisung in den Reaktordruckbehälter  
Ausgehend von einem ATHLET-Modell eines Siedewasserreaktors werden Modellanpassungen zur Nachbildung des Kerns mit ATHLET-CD-Komponenten anstatt von ATHLET-Komponenten vorgenommen. Der Inputdatensatz ist für die Analyse des Kernverhaltens, wenn ein freigelegter und aufgeheizter Kern mit kaltem Wasser wieder geflutet wird (Phänomene wie beim Kühlmittelverluststörfall) so zu erweitern, dass die Reaktorschutzaktionen zur Aktivierung der Sicherheitssysteme und die Sicherheitssysteme selbst im Datensatz berücksichtigt werden (AP2.1). Störfallsequenzen, die zu Kernschadenzuständen führen, wenn keine Wiederinbetriebnahme oder Reparatur eines Sicherheitssystems bzw. keine Störfallmanagement-Maßnahmen eingeleitet werden, sind mit ATHLET-CD zu simulieren. Dabei ist die Aufmerksamkeit auf die Untersuchung der Kühlbarkeit des teilgeschädigten Kerns durch die Kaltwasser-Einspeisung in den

RDB zu richten und deren Konsequenzen für die Integrität des Reaktordruckbehälters und des Sicherheitsbehälter systematisch und umfassend zu diskutieren (AP2.2).

#### AP3: Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen

In diesem Arbeitspaket werden zuerst in enger Abstimmung mit dem Projektpartner (IKE Stuttgart) die für Siedewasserreaktoren geeignete Störfallmaßnahmen ausgearbeitet und zusammengestellt (AP3.1), welche im AP2.2 bei den ATHLET-CD Simulationen zu berücksichtigen sind. Aufbauend auf den Erkenntnisgewinn durch die zahlreichen ATHLET-CD-Simulationen ausgewählter SWR-Störfallsequenzen werden zusammen mit den anderen Partnern Entscheidungshilfen und Empfehlungen für optimale Notfallmaßnahmen ausgearbeitet (AP3.2).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Mit ATHLET-CD wurden Simulationen für die Experimente CORA 16 und CORA 17 vorgenommen und ausgewertet.
- Bei der Analyse der experimentellen Daten von CORA 17 im Vergleich zu CORA 16 wurde nach intensiver Rücksprache mit den Experimentatoren festgestellt, dass die Daten für die Wasserstoffproduktion in CORA 17 neu kalibriert werden müssen.
- Die Eingabedatensätze wurden in Bezug auf die Darstellung der Geometrie und der Randbedingungen verbessert.
- Die Simulationsergebnisse für Materialtemperaturen, Wasserstoffproduktion und Materialverlagerung vor Beginn der Flutphase konnten damit verbessert werden und sind jetzt zufriedenstellend.
- ATHLET-CD hat Schwierigkeiten, die Wasserstoffproduktion und den Fortschritt der Wasserfront in der Flutphase bei der Simulation des CORA-SWR-Tests quantitativ ausreichend genau zu beschreiben. Zum Teil liegt es an der Versuchsdurchführung und den Besonderheiten der CORA-Anlage wie z. B. das Anheben eines mit Wasser gefüllten Zylinders, um das überhitze Bündel abzuschrecken. Diese Besonderheiten liegen in einem Reaktorkern nicht vor und sind für die Reaktorsimulationen irrelevant.
- Ein wichtiges Defizit in der Modellierung der Abläufe stellen die fehlenden Oxidationsmodelle für die SWR-spezifische Absorber-Elemente dar.
- Die für die Simulation von schweren Störfallsequenzen von Siedewasserreaktoren des Typs 72 benötigten Daten wurden gesammelt, um den übernommenen Datensatz auf Konsistenz zu prüfen bzw. die Erweiterung für andere Störfallsequenzen vorzunehmen.
- Für die Zusammenstellung geeigneter Notfallmaßnahmen für Siedewasserreaktoren (Typ-72) sind zahlreiche Dokumente und Unterlagen gesichtet und systematisch ausgewertet worden, um einen Überblick über die bereits implementierten Störfallmaßnahmen zu bekommen. Mit Hilfe der Ergebnisse von PSA-Analysen (Level-1 und -2) und der beschriebenen Störfallszenarien, welche zu schweren Störfallsequenzen mit Kernschäden führen können, werden die im Rahmen von WASA-BOSS zu untersuchenden Störfallmaßnahmen identifiziert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Abschließende Dokumentation der Validierungsrechnungen für die CORA 16 und CORA 17 Experimente.
- Einarbeitung in den Eingabedatensatz für einen deutschen Siedewasserreaktor und erste Simulationen eines Kühlmittelverluststörfalles.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag „Analysis of the CORA-17 bundle Experiment with the ATHLET-CD code“, International QUENCH Workshop 2013 KIT

Vortrag “ATHLET-CD post-test calculations of CORA-17 bundle experiment”, eingereicht für “Annual Meeting of German Nuclear Society 2014” in Frankfurt a. M., 6-8 Mai 2014.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 028G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt G: Simulation des Unfalls in Fukushima-Daiichi zur Bewertung von ATHLET-CD (SUBA)		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2013 bis 29.02.2016		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 321.384,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Koch

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Verbundvorhabens ist die weitergehende Modellierung der deutschen Codes ATHLET-CD und COCOSYS zur Simulation des kompletten Störfallablaufs von dem auslösenden Ereignis, über die Kernzerstörung, die Aerosolausbreitung im Containment bis hin zum Quellterm in die Umgebung. Validierungsrechnungen zu relevanten Experimenten sowie Gegenüberstellungen zu Simulationsergebnissen anderer Severe Accident Codes werden durchgeführt. Mithilfe der weiterentwickelten Störfallanalysecodes sollen die Notfallmaßnahmen während ausgewählter Störfallszenarien für deutsche Anlagen bewertet und optimiert werden. Die im Teilprojekt G (SUBA) geplanten Arbeiten unterstützen das Gesamtziel des Verbundprojekts, in dem gezielt Beiträge zur Erweiterung der Modellbasis des Codes ATHLET-CD hinsichtlich der Schmelzeverlagerung entwickelt werden sowie durch die Anwendung des Codes zur Simulation des Unfalls in Fukushima-Daiichi. Dazu wird zunächst eine Zusammenstellung und Harmonisierung der verfügbaren Analysen zu dem Unfallablauf als Grundlage zur Datensatzerstellung erarbeitet. Anhand der Analyse der Simulationsergebnisse wird die Fähigkeit des Codes zur Abbildung der Kernzerstörung überprüft und bewertet.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die von RUB durchgeführten Arbeiten im Rahmen des Teilprojekts G liefern Beiträge zum AP3.1 des Verbundprojekts WASA-BOSS und sind unterteilt in:

- AP1: Harmonisierung der Datenlage zu den Unfallabläufen in Fukushima-Daiichi.
- AP2: Datensatzerstellung und Plausibilitätsrechnungen.
- AP3: Analyse der Fukushima-Simulation.
- AP4: Bewertung der SWR-Modellbasis für Anlagenrechnungen und Weiterentwicklung der Spätphasenmodellierung.
- AP5: Erstellung des Abschlussberichts.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die weiterführende Datenharmonisierung anhand der Informationen in Online-Portalen der GRS, der Idaho National Laboratories (INL) sowie von der OECD organisierten Aktivitäten (Benchmark Study of the Accident at Fukushima (BSAF)) führte zur Verbreiterung und Absicherung der bisherigeren aufbereiteten Daten. Weiterhin wurden gezielt Auslegungsdaten zu den Sicherheitssystemen RCIC und HPI, die während des Unfalls in Block 3 über einen wesentlichen Zeitraum in Betrieb waren, anhand von vergleichbaren Anlagen des Typs BWR-4 mit Blick auf die Simulationsrechnungen in AP2 zusammengestellt.
- AP2: Ein SWR-69-Datensatz wurde von der GRS zusammen mit der entsprechenden Dokumentation als eine Grundlage zur Datensatzerstellung für Fukushima-Simulationen bereitgestellt. Erste Plausibilitätsrechnungen zur Überprüfung des Datensatzes wurden hinsichtlich zweier Unfallszenarien (2F-Bruch der Speisewasserleitung sowie Station-Blackout) mit idealisierten Randbedingungen durchgeführt, um die Anwendbarkeit des ECORE-Moduls zur Abbildung der Kernzerstörung von SWR-Komponenten zu prüfen. Weiterhin wurde festgelegt, dass in diesem Vorhaben der Unfallablauf in Block 3 der Anlage in Fukushima-Daiichi simuliert werden soll, da vergleichsweise viele konsistente Messdaten verfügbar sind und die Auslegung dieses Reaktortyps (BWR-4 mit Mark-I Containment) einem SWR-69 ähnlich ist. Das simulierte Anlagenverhalten im Normalzustand wurde mit Daten des Blocks 3 in Fukushima verglichen. Dabei sind viele wesentliche Betriebsparameter wie der RDB-Druck in guter Übereinstimmung abgebildet während noch deutliche Abweichungen hinsichtlich der Reaktorleistung und der Geometrie des Reaktorkerns bestehen.
- AP4: Erste Ansätze zur Modellierung des Fließverhaltens unter Berücksichtigung der Viskosität wurden erarbeitet. Dabei wird über die Lösung der Impulsbilanz die Verlagerungsgeschwindigkeit ermittelt. Möglichkeiten zur Implementierung dieser Ansätze in das Candling-Modell, über das derzeit die Schmelzeverlagerung in ATHLET-CD simuliert wird, wurden analysiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Eine Dokumentation der Arbeitsergebnisse wird zum Milestone M31 erstellt.
- AP2: Die erforderlichen Anpassungen zur Abbildung der Anlage des Blocks 3 in Fukushima sowie die relevanten Randbedingungen zur Simulation des Unfallablaufs werden in den ATHLET-CD Datensatz integriert.
- AP4: Programmierung der entwickelten Modellierungsansätze zur Bestimmung der Verlagerungsgeschwindigkeit mit FORTRAN und Implementierung der erweiterten Verlagerungsroutinen in ATHLET-CD.

### 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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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, Experimente zu Kondensationsstößen durchzuführen. Diese Daten sind eine wichtige Grundlage für die Entwicklung numerischer Programme. Mit Hilfe der Messdaten können diese Codes kalibriert bzw. validiert werden.

## 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

AP6: Abschlussbericht

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

AP1: abgeschlossen.

AP2: Technische Wartungsarbeiten an der UniBw Versuchsanlage, Abschluss der gemeinsamen Versuchsmatrix vom 15.11.2012;  
Experimente mit Versuchsparametern, die für die UniBw-Versuchsanlage geeignet sind, d. h. Kondensationsstöße bei einer vorhandenen unterkühlten Wasservorlage;  
Teilnahme des TÜV SÜD sowie weiterer Projektpartner an UniBw-Experimenten;  
Auswertung und Dokumentation der Messungen;  
Vorstellen der Ergebnisse beim Druckstoßseminar in Hamburg;  
Beginn der Arbeiten am Abschlussbericht.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP6: Verfassen des Abschlussberichts.

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

2 Vorträge im Rahmen des 2. CIWA Druckstoßseminars wurden veröffentlicht:

Konzeption und Messtechnik für eine Versuchsanlage zur Messung von Kondensationsstößen, Dipl.-Phys. Dirndorfer (UniBw)

Kondensationsstöße in einem geschlossenen Rohrleitungssystem, Dipl.-Phys. Dirndorfer (UniBw)



## **2.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung**

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 der Experimentierbetrieb mit der neuen Neutronenflugzeitanlage wieder aufgenommen. Die inelastische Streuung wurde mit den neuen LaBr<sub>3</sub> Szintillatoren sowohl mit als auch ohne gleichzeitige Flugzeitbestimmung der gestreuten Neutronen untersucht. Ein neuer Versuchsaufbau für totale Neutronenwirkungsquerschnitte wurde zusammen mit Kollegen vom Institut für Referenzmaterialien und Messungen, Geel und vom Korean Atomic Energy Institute in Betrieb genommen und die totalen Wirkungsquerschnitte von <sup>197</sup>Au, <sup>nat</sup>W und <sup>nat</sup>Fe gemessen.

Zur Auswertung dieser Daten wurde Roland Hannaske als wissenschaftlicher Mitarbeiter vom bis 01.11.2013 zum 31.03.2014 befristet eingestellt. Ein neuer Gehäusedeckel wurde in die Referenzspaltkammer H19 der PTB eingesetzt. Die HZDR Spaltkammer mit den hochangereicherten <sup>235</sup>U Schichten aus Mainz wurde aufgebaut. Eine erste Neutronenflugzeitmessung beider Spaltkammern fand Anfang Dezember statt. Die Impulshöhenspektren der neuen Spaltkammer haben einen etwas höheren Anteil an niedrigeren Impulshöhen als bei der PTB Spaltkammer, was auf eine etwas höhere Schichtdicke hinweist. Die genaue Analyse der Spaltraten ist noch nicht abgeschlossen. Da Dr. Zoltan Elekes das HZDR im Juli 2013 verlassen hat, konnte Dr. Alessio Vascon nach seiner Promotion in Mainz am HZDR eingestellt werden mit der Arbeitsaufgabe am Institut für Kernchemie der Univ. Mainz <sup>242</sup>Pu Schichten herzustellen. Aufgrund der Verzögerungen sowohl beim Aufbau der neuen Flugzeitanlage, wie auch bei der Herstellung der Aktinidenproben in Mainz wurde die Herstellung von <sup>238</sup>U Schichten nicht mehr in Angriff genommen, damit die wissenschaftlich wichtigere Herstellung der <sup>242</sup>Pu Schichten noch fertig gestellt werden kann.

Die Veröffentlichung über totale Neutronenwirkungsquerschnitte von Au und Ta ist bei European Physical Journal A erschienen. Das TRAKULA Spaltexperiment wurde auf dem Final ERINDA User Meeting and Scientific Workshop, October 1-3, 2013, am CERN durch Toni Kögler vorgestellt. Die neue Neutronenflugzeitanlage wurde in einem Institutskolloquium an der PTB präsentiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Aufbau der Spaltkammern mit <sup>235</sup>U und <sup>242</sup>Pu und Produktion dünner Aktinidenschichten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere der Uni Mainz und der PTB Braunschweig. Messung der inelastischen Streuung mit LaBr<sub>3</sub> Szintillatoren. Messung des <sup>242</sup>PU Spaltquerschnitts.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Neutron total cross section measurements of gold and tantalum at the nELBE photoneutron source\*, Roland Hannaske et al., Eur. Phys. J. A 49 (2013) 137

Light yield and n-γ pulse-shape discrimination of liquid scintillators based on linear alkyl benzene, T. Kögler et al. 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 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 30.09.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 30.09.2013	
<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 Strukturaufklärung 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

Die Studien zur umfassenden Charakterisierung der neu synthetisierten N,O-Donorliganden wurden planmäßig fortgesetzt. Dabei konnten weitere neue Erkenntnisse zu ihren Komplexbildungseigenschaften in Lösung sowie zu charakteristischen Strukturmotiven der gebildeten Komplexe im Festkörper gewonnen werden. Im Einzelnen erfolgten folgende Untersuchungen:

- Durchführung von ergänzenden Experimenten zur Extraktion von Eu(III), Am(III) und U(VI)
- Strukturaufklärung von heterodinuklearen Diaminkomplexen (Zn(II)/Gd(III), Er(III) bzw. Yb(III))
- Magnetische Messungen an heterodinuklearen Cu(II)/Nd(III)-, Zn(II)/Nd(III)-, Cu(II)/Tb(III)- sowie
- Zn(II)/Tb(III)-Komplexen (mit Uni Leipzig)
- Laserfluoreszenzspektroskopische Untersuchungen (TRLFS) zu den Wechselwirkungen von Eu(III)
- mit Tri(2-picolyl)methantricarboxamid (mit HZDR)

Auf Basis der erfolgten Extraktionsstudien konnten Struktur-Wirkungsbeziehungen für die Extraktion von Lanthanid- (Eu(III), Yb(III)) und Aktinidionen (UO<sub>2</sub>(VI), Am(III)) mit unterschiedlichen N,O-Donorliganden abgeleitet werden. Die magnetischen Messungen an den heterodinuklearen *3d/4f*-Komplexen sprechen für die Dominanz antiferromagnetischer Wechselwirkungen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Anfertigung des Abschlussberichtes und relevanter Publikationen.

### 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 Ion Exchange and Solvent Extraction: Supramolecular Aspects of Solvent Extraction, Vol. 21, B. A. Moyer, Ed., CRC Press, Boca Raton, 2014, pp. 1-48;

F. Reichel, J. K. Clegg, K. Gloe, K. Gloe, J. J. Weigand, J. R. Reynolds, C.-G. Li, J. R. Aldrich-Wright, C. J. Kepert, L. F. Lindoy, H.-C. Yao, F. Li, Self-assembly of an imidazolate-bridged Fe(III)/Cu(II) heterometallic cage, *Inorg. Chem.* 2014, 53, 688-690;

Karsten Gloe, “Coordination chemistry of lanthanoides(III) and uranium(VI) with multifunctional N,O-donor ligands: structural diversity and extraction behavior”, 2013 Kumamoto Symposium on Nano, Supramolecular and Coordination Chemistry, Kumamoto/Japan, 10.07.2013.

Kerstin Gloe, “Novel methane-tricarboxamide ligands: synthesis, structure and metal binding”, 2013 Kumamoto Symposium on Nano, Supramolecular and Coordination Chemistry, Kumamoto/Japan, 10.07.2013.

Karsten Gloe, “Supramolecular chemistry in solvent extraction”, 2th International Symposium on host compounds for separation and functionality, Saga/Japan, 12.07.2013.

Kerstin Gloe, “Novel methane-tricarboxamide ligands: synthesis, structure and metal binding”, 2th International Symposium on host compounds for separation and functionality, Saga/Japan, 12.07.2013.

Karsten Gloe, “Coordination chemistry of lanthanoides(III) and uranium(VI) with multifunctional N,O-donor ligands: structural diversity and extraction behavior”, Satellite Symposium in Association with 5th ISNSC, Gyeongju/Korea, 15.07.2013.

Kerstin Gloe, “Novel methane-tricarboxamide ligands: synthesis, structure and metal binding”, Satellite Symposium in Association with 5th ISNSC, Gyeongju /Korea, 15.07.2013.

Karsten Gloe, “Coordination behavior of multifunctional Schiff-base ligands: from discrete molecules to helicates”, 5th International Symposium on Nano and Supramolecular Chemistry, Yogyakarta (Indonesien), 26.08.2013.

Kerstin Gloe, “Novel carboxamide ligands: synthesis, structure and metal binding”, 5th International Symposium on Nano and Supramolecular Chemistry, Yogyakarta/Indonesien, 27. 08.2013.

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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, elementspezifisch) 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. Schiffsbasen,  $\beta$ -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:

Die experimentellen Arbeiten wurden abgeschlossen.

In diesem Berichtszeitraum wurden eine Reihe von  $^1\text{H}$ -NMR-Untersuchungen durchgeführt, die der strukturellen Aufklärung der Uran(VI)-Komplexe mit verschiedenen Schiffischen Basen als auch  $\beta$ -Diketonen in Methanol dienten. So konnte die genaue Struktur der Schiffischen Base 2-(2-Hydroxybenzylidenamino)-phenol (HBAP) geklärt werden. Es wurde mittels H,H-NOESY nachgewiesen, dass die o-Hydroxylgruppen des HBAP auf einer Seite des Moleküls angeordnet sind. Bei Anwesenheit von Uran(VI) erfolgt eine bidentate Bindung des Metalls über den Stickstoff und den Sauerstoff der Hydroxylgruppe des kohlenstoffseitigen aromatischen Ringes. Die zweite Hydroxylgruppe ist nicht an der Bindung beteiligt. Bei N-Benzylidenanilin und Alpha-(4-hydroxyphenylimino)-p-cresol konnte nur eine Komplexierung des Uran(VI) monodentat über den Stickstoff der Schiffischen Basen beobachtet werden. Bei allen untersuchten Schiffischen Basen trat neben der Komplexierung mit Uran(VI) auch ein Zerfall der Base in die entsprechenden Ausgangsverbindungen auf. Ursache hierfür scheint der hohe Spannungsbereich von 400 mV (sehr saurer Bereich) zu sein. Die Ergebnisse der Untersuchungen bei niedrigeren Spannungswerten (neutraler Bereich) liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor. Eine Komplexierung des Uran(VI) durch die Zerfallsprodukte wurde nur im NMR-Spektrum des U(VI)/HBAP Systems beobachtet. Im Fall der  $\beta$ -Diketone mit aliphatischen als auch aromatischen Strukturelementen wurde durch die  $^1\text{H}$ -NMR Spektroskopie neben dem Nachweis der bekannten Keto-Enol-Tautomerie festgestellt, dass unter den gegebenen experimentellen Bedingungen (hohe Metall- und Ligandkonzentration im Bereich von  $10^{-2}$  M) ein Teil des Liganden durch eintretende Acetalisierungen nicht für eine Metallkomplexierung zur Verfügung steht. Für die  $\beta$ -Diketone wurden Signalverschiebungen der Ringprotonen durch Komplexierung des Uran(VI) über die Keto-Gruppen bestimmt, deren Größe abhängig von der Anzahl der aromatischen Ringe im Komplex ist.

DFT Kalkulationen für beide U-Komplexsysteme wurden durchgeführt und werden noch ausgewertet.

Des Weiteren wurde die Wechselwirkung von Curium(III) in methanolischer Lösung in Ab- und Anwesenheit von Schiffischen Basen bzw.  $\beta$ -Diketonen mittels TRLFS untersucht. Im Vergleich zum wässrigen System bildet Cm(III) auch im methanolischen System in Abhängigkeit des Spannungsbereiches (sauer-basisch) verschiedene Spezies. Im Fall der Zugabe von Schiffischen Basen konnte bisher keine Komplexierung beobachtet werden, da weder eine Wellenlängenverschiebung der Emissionsbanden detektiert, noch eine Änderung der Fluoreszenzlebenszeiten bestimmt werden konnte im Vergleich zu den Cm(III)-Ausgangsspezies.  $\beta$ -Diketone bilden mit Cm(III) fluoreszierende Spezies, deren Emissionsbanden deutlich in den rotwelligen Bereich verschoben sind und deren Lebenszeiten sich von denen der Ausgangsspezies unterscheiden.

Teilprojekt II:

Die experimentellen Arbeiten wurden abgeschlossen.

Insbesondere wurden noch ausgewählte Desorptionsuntersuchungen an festphasenfixiertem Calixaren durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die Sr-Desorption von dem festphasenfixiertem Calixaren weder durch konzentrierte Essigsäure noch durch längere Kontaktzeit (2 Tage) erhöht werden konnte. Stattdessen kam es zur hydrolytischen Abspaltung des Calixarens von der Festphase und zur Kolloidbildung von Silikaten in der Lösung (Peaks im UV/Vis-Spektrum bei 280 nm und 760 nm). Das Sr ist bevorzugt auf der calixarenfreien Festphase irreversibel adsorbiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Abschluss der Auswertung experimenteller Ergebnisse in beiden Teilprojekten.

Abschlussbericht bis 30.06.2014.

Fertigstellung der Promotionsarbeit und Publikation(en).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Mansel, K. Franke: „Herstellung und Reinigung von  $^{64}\text{Cu}$  am Leipziger Zyklotron Cyclone® 18/9.“ Wissenschaftsforum Chemie der GDCh – Jahrestagung der Fachgruppe Nuklearchemie, Darmstadt, 01-04.09.2013

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b> 02 NUK 014C
<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 30.11.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 30.11.2013	
<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 geochemische 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 Bindungselektivität 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

- Synthese und strukturelle Charakterisierung einer Vielzahl neuer multifunktionaler Calix[4]aren-Derivate mit Carbonsäure-, Sulfonsäure-, Phosphorsäureester-, Hydroxy-, Carbamoyl-methylsulfoxid- und Allyl-Funktionen
- Wechselwirkungsuntersuchungen ausgewählter Calix[4]aren-Derivate in organischen Lösungsmitteln mit La(III), Eu(III), Rh(I) und U(VI); erwartungsgemäß zeigen Carboxyl-Funktionen hohe Bindungsaffinitäten gegenüber U(VI), Allyl-funktionalisierte Calix[4]arene binden sehr stark Rh(I) in unpolaren organischen Lösungsmitteln
- Flüssig-Flüssig-Extraktionsexperimente, systematische Untersuchung verschiedener Einflussgrößen (Zeit, Temp., pH-Wert, Verhältnis Extraktant-Metall usw.), Bestimmung von Assoziationskonstanten und Stöchiometrie der extrahierten Spezies mit La(III); die besten Extraktionsleistungen gegenüber La(III) (bis zu 95 %) wurden für ein Sulfonsäure-funktionalisiertes Calix[4]aren beobachtet
- kompetitive Extraktionsuntersuchungen ausgewählter Calix[4]aren-Derivate mit Fe(III), Y(III), Cu(II), La(III) und Ba(II); die beste Extraktionsleistung wird für Cu(II) beobachtet
- Fest-Flüssig-Extraktionen, Immobilisierung verschiedener Calix[4]aren-Derivate auf CPG-Festphasen (controlled pore-glass), Batchexperimente mit Sr(II) und U(VI); es werden ähnliche Extraktionsleistungen beobachtet wie in der Flüssig-Flüssig-Extraktion
- umfangreiche strukturanalytische Untersuchungen der Liganden und Metallkomplexe
- Bestimmung von Komplexbildungskonstanten (photometrisch, NMR)
- gut wasserlösliche multifunktionelle Calix[4]aren-Derivate ließen sich nicht darstellen

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Publikationen
- Dokumentation

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

S. Haupt, R. Schnorr, M. Poetsch, A. Mansel, M. Handke, B. Kersting: Extraction properties of 25,27-bis(carbonylmethoxy)calix[4]arenes towards  $\text{Sr}^{2+}$ . Competitive extraction and extraction in a synthetic groundwater. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, submitted 06.01.2014 (JNRC-D-13-00747)

S. Haupt, M. Handke, R. Kuhnert, M. Poetsch, B. Kersting: Synthesis of calix[4]arene-based polycarboxylate ligands and their chemical immobilization onto controlled-pore glass. Tetrahedron, submitted 13.12.2013 (TET-D-13-02147)

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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.

- Herr Sascha Hofmann hat seine Doktorarbeit am 01.06.2012 am KIT-INE angefangen.
- Frau Rodríguez Galán hat ihre Doktorandenstelle am 15.07.2013 angetreten und wurde an die Universität Oviedo, Spanien delegiert.
- Frau Dr. Rojo Sanz hat ihre Postdoktorandenstelle am 01.08.2013 angetreten und wurde an das PSI-LES, Schweiz delegiert.

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

AP A: Status: Die hochauflösende AFM Messungen an Calcit-Einkristallen in Gegenwart von  $\text{NaNO}_3$  oder  $\text{KNO}_3$  in Zusammenarbeit mit der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne sind abgeschlossen und zusammen mit den Daten zur Cm(III)/Eu(III) TRLFS Messungen mit  $\text{NaNO}_3$  an Calcitpulver publiziert. Weiterhin wurden Mitfällungssynthesen von Eu(III)- Calcit mit  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaF}$  und  $\text{NaBr}$  als Hintergrundelektrolyten zur systematischen Untersuchung des Einflusses von Halogenidionen und quantitative analytische Untersuchungen zur Eu/Gd- Aufnahme von Calcit als Funktion der Zeit mit  $\text{NaClO}_4$

als Hintergrundelektrolyten durchgeführt. Grenzflächensensitive Röntgenbeugung (CTR) an Calcitkristallen zur Untersuchung des oberflächenverändernden Einflusses von  $\text{NaNO}_3$  und Dichte-Funktional-Theorie-Berechnungen zu Nitrat/Calcit-Strukturen (in Zusammenarbeit mit Dr. Robert Polly, INE) ergänzen diese Arbeiten.

AP B: Status: Durchflussreaktorexperimente zur Np(IV) Calcit- Wechselwirkung wurden aufgebaut und die Experimente werden demnächst gestartet.

AP C: Status: Eine neue kalorimetrische Methode zur Messung der reaktiven Oberfläche wurde getestet und es konnte an Hand von Experimenten zur Löslichkeitskinetik von Baryt, Celestin und  $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$  gezeigt werden, dass diese Methode zuverlässige Ergebnisse liefert. Die Materialien der oben genannten Versuchsreihe wurden weiterhin benutzt um die  $\text{Pb}^{2+}$  Wechselwirkung mit Mineralphasen der  $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$  Mischkristallserie im Vergleich zu reinem Baryt zu untersuchen. Auf Basis der Ergebnisse des  $(\text{Pb,Sr,Ba})\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  Modellsystems wird ein kinetisches Modell zur Keimbildung und dem Wachstumsverhalten ternärer Solid Solutions entwickelt.

Weitere Aktivitäten fokussieren auf Syntheseexperimente und Charakterisierung der Produkte zur Quantifizierung der Effektivität von Ettringit  $\text{Ca}_6\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)_3 \cdot \approx 26\text{H}_2\text{O}$  als potentielle Sekundärphase zur Rückhaltung von Se(VI) und der Substitution von Einbau von  $\text{CO}_3^{2-}$  durch  $\text{SeO}_4^{2-}$  in der Calcitstruktur mittels Rekristallisationsexperimenten mit Silica- Hydrogel.

Die Arbeiten zur Se(-II) Sorption an C-S-H Phasen mit verschiedene Ca/Si Verhältnissen, an AFm- $\text{CO}_3$  und AFm-OH- $\text{CO}_3$  Phasen, unter reduzierende Bedingungen wurden fortgeführt und mit Se(-II) Sorption an  $\text{TiO}_2$  verglichen. In diesem Zusammenhang wurden auch EXAFS Messungen zur Se(IV) und Se(-II) Sorption an verschiedene Zement Phasen unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen und dem Einfluss wechselnder Redoxbedingungen auf die Se Sorption durchgeführt und diese Daten werden zurzeit ausgewertet.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP A:

- Site-selektive TRLFS-Messungen an Calcitproben dotiert mit Europium und Curium (Rekristallisations-/ Mitfällungsexperimente) mit Halogeniden als Hintergrundelektrolyt
- Quantitativ analytische Untersuchungen zur Europium/Gadolinium-Aufnahme von Calcit über verschiedene Zeiträume mit  $\text{NaCl}$  und  $\text{NaNO}_3$  als Hintergrundelektrolyten.

AP C:

- Weiterführung der moleküldynamische Berechnungen zum Einbau von  $\text{SeO}_4^{2-}$  Ionen in  $\text{CaCO}_3$
- Se(IV) Sorptionsisothermen an verschiedene Zementphasen und Langzeit Batch-Sorptionsexperimente mit Se(IV): Effekt von wechselnden Redoxbedingungen und Durchführung von EXAFS-Messungen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Peer-reviewed publiziert:

A. Fernández-González & L. Fernandez-Díaz (2013) *American Mineralogist* 98, 1824-1833.

Prieto, Astilleros & Fernández-Díaz (2013) *Elements* 9, 195-201.

Fernández-González, Carneiro, Katsikopoulos & Prieto (2013) *GCA* 105, 31-43.

Hofmann, Voitchovsky, Schmidt, Stumpf (2014) *GCA* 125, 528-538.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 2013 wurden die vielversprechenden Synthesen von Eisensulfiden und Eisenoxiden weiter optimiert. Im Fall der Eisensulfide wurde die Synthese angepasst, um die Reinheit der Mineralphase Pyrit zu erhöhen. Die röntgenkristallographische Charakterisierung bestätigte die Reinheit (Fehlen von Mackinawit und Markasit) sowohl für die Synthese des Pyrits als auch für die des Selen-dotierten Pyrits. Daraufhin wurden morphologische Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) durchgeführt und lieferten radialförmig Pyritkristalle, die sich morphologisch geringfügig von Selen-dotierten Pyriten unterschieden. Ebenso wurden die verschiedenen Arten von synthetisierten Eisenoxiden mittels REM analysiert, um deren Kristallgröße und Morphologie zu bestimmen und zu vergleichen. Des Weiteren konnten die Sorptionsmechanismen, die beim Kontakt zwischen gelösten Selenpezies und Eisenoxiden zu einer Selen Retention führen, anhand von Adsorption- und Kopräzipitationsexperimenten genauer charakterisiert werden.

Der aktuelle Stand der Arbeiten wurde im September 2013 auf der Tagung KIT-KIST, die im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Korea Institute of Science and Technology stattfindet, präsentiert. Ebenso wurde auf dem „Joint Annual Meeting“ der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG) die Arbeiten in einem Posterbeitrag vorgestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan. In der ersten Hälfte des Halbjahres 2014 werden detaillierte Strukturuntersuchungen der synthetisierten Präzipitate an der Synchrotronquelle ANKA des KIT durchgeführt, sowie die spezifische Oberfläche durch die BET-Messung bestimmt.

Weiterhin erfolgen die ersten Vorbereitungen zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung und der Bindungsverhältnisse der Mineraloberflächen, die mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie an Instituten von ImmoRad-Projektpartnern stattfinden und Aufschluss über die Stabilität der Eisenminerale geben.

Der aktuelle Stand der Arbeiten wird den Projektpartnern während des „ImmoRad-Meetings“ im Mai 2014 in Oviedo präsentiert und weiteres Vorgehen diskutiert. Im Juni ist die Vorstellung der Themen auf der Goldschmidt-Konferenz in Sacramento (USA) geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

BÖRSIG, N., POTSCHE, S., DIENER, A., NEUMANN, T. (2012) Incorporation and stability of Se doted iron minerals (Poster).- Selen Workshop 2012, KIT-IMG

POTSCHE, S., BÖRSIG, N., NEUMANN, T. (2013) Selenium incorporation in pyrite and hematite (Poster).- DMG, Joint Annual Meeting, Tübingen

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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, 4, 5: Charakterisierung, Strukturaufklärung und kalorimetrische Messungen  
 AP6: Modellierungen  
 AP7: Ergebnisdokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: Erste U(IV) und U(VI) haltige Phosphate/Arsenate konnten hydrothermal hergestellt werden. Eine vollständige U/Th-Silikat Mischkristallreihe wurde erfolgreich synthetisiert. Mittels Flux-Methode konnten aus der Schmelze gezielt Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristalle unterschiedlicher Zusammensetzung synthetisiert werden.
- AP3, 4, 5: Erste Ergebnisse zur chemischen Charakterisierung der U haltigen Phosphat/Arsenat Mischkristallsystemen ist abgeschlossen. Mittels XRD wurde die synthetisierte U/Th-Silikat-Mischkristallreihe charakterisiert. Die Gitterparameter sowie das molare Volumen zeigen Verhalten gemäß des Vegard'schen Gesetzes (idealer Mischkristall). Untersuchungen mittels EXAFS bestätigen diese Ergebnisse. Die Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristalle wurde mittels SEM/EDX/WDX und EMS charakterisiert. Ra-Sorptionsexperimente mit Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristallen wurden angesetzt.
- AP6: Reguläre Mischungsparameter für das quaternäre BaSO<sub>4</sub>-RaSO<sub>4</sub>-SrSO<sub>4</sub>-PbSO<sub>4</sub> System wurden mittels der DFT Methode (basierend auf Einzeldefekten) bestimmt. Auf diesen Ergebnissen basierend konnte mittels GEMS die Aufnahme von Ra in Sr und Pb dotierten Baryten modelliert werden. Für die synthetisierte Zr-(IV)LDH Mischkristallreihe wurden Modellierungen (GEMS) durchgeführt und ein Mechanismus für den Zr-IV Einbau in die LDH Struktur aufgestellt.
- AP7: Noch nicht begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: Hydrothermale Synthesen von U/Th als Phosphat/Arsenat Mischkristallsysteme sind geplant. Die synthetisierten Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristallen werden in der kommenden Projektphase für Ra-Sorptionsexperimente eingesetzt.
- AP3, 4, 5: Fortführung der Ra-Sorptionsexperimente mit Ba-Sr-SO<sub>4</sub> Mischkristallen. Für die Th/U Silikat-Mischkristalle werden weiter kalorimetrische Messungen (Tiefemperatur) in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Prof. Winkler (Frankfurt a. M.) forciert. Die Zr(IV) LDH Verbindungen sollen zur Aufklärung der Nahordnung mit EXAFS untersucht werden um den modellierten Einbaumechanismus zu bestätigen. Zudem sind kalorimetrische Messungen geplant um die Löslichkeit dieser Phasen im Temperaturbereich von 25 bis 70 °C abzubilden.
- AP6: Mittels DFT +U Berechnungen wird eine atomistische Modellierung für den Einbau von Eu und Na in Calcit und Aragonit angestrebt.
- AP7: Noch nicht begonnen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

H S.Labs, J.D. Bauer, L. Bayarjargal, B. Winkler, H. Curtius, D. Bosbach: High-pressure behavior of studtite, UO<sub>4</sub> \* 4H<sub>2</sub>O, and metastudtite, UO<sub>4</sub> \* 2H<sub>2</sub>O - a Raman investigation. EMRS Spring Meeting Strasbourg, 27.-30.05.2013, Strasbourg, France.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 B-3 (Np-Siderit-System + Np-Magnetit-System):  
Synthese und Charakterisierung (Zetapotenzialmessung) des Magnetits. Bestimmung der zeit- und pH-abhängigen Retention von Np(V) in Gegenwart von Siderit und Magnetit. Bestimmung der Np-Retentionskoeffizienten ( $\log R_d$  in  $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ ) mittels Flüssigszinilationsmessungen. Messung der Fe-Gehalt der Lösungsüberstände mittels ICP-MS, um Aussagen über die Stabilität der Mineralphasen zu treffen.

Im Siderit-System ist der Retentionskoeffizient unabhängig vom pH-Wert und damit der wässrigen Speziation von U(V). Ebenso trat über den gesamten Untersuchungszeitraum von 1 Monat keine klare Zeitabhängigkeit auf. XAFS-Messungen zeigten eine vollständige Reduktion von Np(V) zu Np(IV), und die Ausfällung als  $\text{NpO}_2$ -Nanopartikel, deren Größe mit zunehmender Alterung zunimmt.

Im Magnetit-System wurde eine deutliche pH-Abhängigkeit der Np-Retention beobachtet: mit steigendem pH-Wert steigt der  $\log R_d$  von 2,8 im sauren pH-Wertbereich, über Werte von 4 im mittleren pH-Wertbereich bis hin zu Werten von 6 bei einem pH-Wert von 12. Im sauren pH-Wertbereich ist die Retention unabhängig von der Versuchsdauer, während bei den Untersuchungen ab einem pH-Wert von 6 ein zeitlicher Anstieg des  $\log R_d$  zu verzeichnen ist. Die ersten EXAFS Untersuchungen im Np(V)-Magnetit-System zeigen nur eine partielle Reduktion von Np(V) zu Np(IV) innerhalb 1 Woche.

Bearbeitung des Programmpaketes C:

Die ersten Se-LDH-XAS-Messungen für PSI-LES wurden am 2.-5.10.2013 erfolgreich durchgeführt und zeigten die erfolgreiche Konservierung der Oxidationsstufen -2 und +4.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Programmpaket A:

- Erarbeitung einer Publikation der Pu-Magnetit-Kopräzipitationsdaten

Programmpaket B:

- Np-Magnetit-System: Kopräzipitationsexperimente (makroskopisch und XAFS), Ergänzung der Sorptionsexperimente (XAFS)
- Synthese von Mackinawite und Beginn der Sorptions- und Kopräzipitationsexperimente

Programmpaket C:

- Auswertung der Se-LDH-EXAFS-Messungen vom 2.-5.10.2013

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Is Plutonium Being Incorporated by Magnetite Under Anoxic Conditions? Dumas T, Fellhauer D, Gaona X, Altmaier M & Scheinost A (2013) Mineralogical Magazine, 77(5) 1017, sowie gleichnamiger Vortrag auf der Goldschmidt-Konferenz, 25.-30.08.2013, Florenz.

Interaction of plutonium with magnetite under anoxic conditions: Reduction, surface complexation, and structural incorporation, Scheinost AC, Kirsch R, Dumas T, Rossberg A, Fellhauer A, Gaona X, Altmaier M, eingeladener Vortrag bei Actinides-Konferenz, 21.-26.07.2013, Karlsruhe

Interaction of oxyanions with mineral phases: Sorption, redox transformation, and structural incorporation, Convenors: Andreas Scheinost (HZDR), Thomas Neumann, Thorsten Schaefer (KIT), Laurent Charlet (UJF), Session 18i: Goldschmidt-Konferenz, 25.-30.08.2013, Florenz.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Ramanaktive 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

Zum Themenbereich B (Vierwertige Actinide) wurden die Untersuchungen an den im FZJ-IEK6 synthetisierten Phasen Coffinit ( $\text{USiO}_4$ ), Thorit ( $\text{ThSiO}_4$ ), sowie den entsprechenden Mischkristallen bei hohen Drücken und tiefen Temperaturen fortgeführt. Dazu wurden am Synchrotron (PETRA III, DESY) weitere Experimente durchgeführt. Die Hochdruckexperimente zum System  $\text{USiO}_4$  wurden abgeschlossen. Zusätzlich wurden zu den Experimenten zur Bestimmung der Stabilität von Coffinit und dessen spektroskopischen Eigenschaften bei hohen Drücken DFT+U Modellrechnungen durchgeführt. Eine entsprechende Publikation wird im nächsten Berichtszeitraum eingereicht.

Zum Themenbereich C (Radium und Spaltprodukte) wurden DFT basierte Modellrechnungen zu den Experimenten von Heberling et al. (2014) (siehe Pkt. 5). zur Kopräzipitation von Se(IV) und Calcit durchge-

führt. Modellierungen mit der „single defect“ Methode zeigen, dass das  $\text{SeO}_3^{2-}$  Anion in der Struktur von Calcit lokale Spannungen verursacht. Diese Spannungen werden deutlich reduziert, wenn das Anion an der Oberfläche eingebaut wird, wodurch im Gleichgewichtszustand lediglich die Adsorption an der Oberfläche möglich ist. Im Falle einer starken Übersättigung können Se-reiche (104) Oberflächen vom schnell wachsenden Calcitkristall eingeschlossen werden, wodurch wiederum neue Oberflächen für die Adsorption entstehen. Unter diesen Bedingungen kann Calcit mit bis zu 7 mol %  $\text{CaSeO}_3$  entstehen.

Mit der „double defect“ Methode wurden Modellrechnungen des Systems  $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$  und  $(\text{Ba,Pb})\text{SO}_4$  durchgeführt. Auf der Basis der Ergebnisse wurden thermodynamische Modelle der Mischphasen von  $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$  und  $(\text{Ba,Pb})\text{SO}_4$  entwickelt. Für das System  $(\text{Ba,Pb})\text{SO}_4$  wird vorausgesagt, dass bei Temperaturen unter 250 K eine geordnete monokline Phase mit  $x_{\text{Pb}}=0.5$  stabil ist. Die niedrige Bildungsenthalpie dieser Komponente wurde mit DFT Rechnungen bestätigt. Die entwickelten Modelle wurden verwendet, um die Effekte von Sr und Pb auf die Kopräzipitation von Ra mit  $\text{BaSO}_4$  einzuschätzen. Es konnte gezeigt werden, dass die Anwesenheit von  $\text{PbSO}_4$  einen positiven Effekt auf die Ra-Kopräzipitation hat. Im Gegensatz dazu führten hohe Anteile von  $\text{SrSO}_4$  dazu, dass mehr Ra in der wässrigen Phase verbleibt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten werden wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Es wurde eine Kooperation mit dem KIT-INE initiiert, in der in Frankfurt orientierte Calcit Proben präpariert werden sollen. Dabei sollen im nächsten Berichtszeitraum aus Calcit Kristallen vom KIT-INE Platten hergestellt, deren (104) Fläche einige  $\text{cm}^2$  groß ist. Im Januar werden an PETRA III weitere Röntgenbeugungsexperimente zur thermischen Stabilität und Umwandlung von Studtite in Metastudtite sowie zur Kristallstruktur der Uranothorit Mischkristalle bei tiefen Temperaturen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallographie im März 2014 vorgestellt werden. Die mikrokalorimetrischen Untersuchungen von luftempfindlichen Proben werden Anfang des kommenden Jahres begonnen.

Für diese Untersuchungen stehen folgende Proben bereits zu Verfügung:

- LDH Phasen aus der Kooperation mit dem FZJ-IEK6
- Eine Se-dotierte Eisenoxid Phase aus der Kooperation mit dem KIT-IMG

Des Weiteren werden Proben von den Kooperationspartnern erwartet:

- Se-dotierte Eisenoxid, bzw. Eisensulfid Phase aus der Kooperation mit dem KIT-IMG
- Carbonate, Sulfate aus der Kooperation mit UO-DG

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

J.D. Bauer, S. Labs, S. Weiss, L. Bayarjargal, H. Curtius, W. Morenroth, D. Bosbach, C. Hennig, B. Winkler: Raman spectroscopy and powder diffraction of synthetic Coffinite ( $\text{USiO}_4$ ) at high pressures. *Mineralogical Magazine*, 77(5) 668 (2013) – *Goldschmidt Konferenz 2013*

F. Heberling, V.L. Vinograd, R. Polly: A Thermodynamic Entrapment Model for the Quantitative Description of Selenite Coprecipitation with Calcite. *Mineralogical Magazine*, 77(5) 1279 (2013) – *Goldschmidt Konferenz 2013*

F. Brandt, M. Klinkenberg, V.L. Vinograd, K. Rozov, D. Bosbach: Solid Solution Formation and Uptake of Radium in the Presence of Barite. *Mineralogical Magazine*, 77(5) 762 (2013) – *Goldschmidt Konferenz 2013*

K. Rozov, V.L. Vinograd, D. Kulik, F. Brandt, B. Winkler, D. Bosbach: Effects of Lead and Strontium on Radium Uptake by Barite: Atomistic Simulations and Thermodynamic Assessment. *Mineralogical Magazine*, 77(5) 2092 (2013) – *Goldschmidt Konferenz 2013*

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. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 122: 398–417 (2013)

F. Heberling, V.L. Vinograd, R. Polly, J.D. Gale, S. Heck, J. Rothe, D. Bosbach, H. Geckeis, B. Winkler: A thermodynamic adsorption/entrapment model for selenium(IV) coprecipitation with calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2014) (accepted with minor revision)

J.D. Bauer, S. Labs, B. Winkler, H. Curtius, D. Bosbach: Temperature dependent X-ray diffraction study of the transformation of studtite,  $\text{UO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ , to metastudtite,  $\text{UO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ . *Jahrestagung DGK 2014*

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Regina-Pacis-Weg 3, 53113 Bonn		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 019F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2013 bis 31.03.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 284.148,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Geisler-Wierwille	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In Ergänzung und Erweiterung zu den bisherigen und geplanten Arbeiten des Verbundprojekts, soll das Korrosionsverhalten von Borosilikatgläsern, dem Standardmaterial für die Immobilisierung von hochradioaktiven Abfällen, in wässrigen Lösungen untersucht werden. Es soll experimentell die Hypothese getestet werden, ob – entgegen derzeit etablierter Modelle – Borosilikatgläser in wässrigen Lösungen kongruent aufgelöst werden und nach Sättigung der Lösung mit amorpher Kieselerde diese an einer nach innen wandernden Grenzfläche aus der Lösung ausfällt (gekoppelter Lösungs - Fällungsprozess). Hierbei wird das Glas schrittweise durch Kieselerde verdrängt. Unbekannt ist in wie weit die zuvor im Glas eingebetteten Radionuklide in die Kieselerde-Sekundärphase eingebaut werden. Abhängig von physiko-chemischen Bedingungen und Glaszusammensetzung können weitere Korrosionsprodukte (Phyllosilikate, Zeolithe, Karbonate) an der Oberfläche oder innerhalb der Kieselerde präzipitieren, die ebenfalls Radionuklide binden können. Ferner sollen diese Ergebnisse mit Befunden an korrodierten archäologischen Gläsern abgeglichen werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- (A) Synthese und chemische/strukturelle Charakterisierung von Borosilikatgläsern.
- (B) Batchexperimente mit synthetisierten Gläsern und archäologischen U-Gläsern unterschiedlicher Zusammensetzung (Kompositionelle Serie) und Untersuchung/Analyse der experimentellen Produkte. Das Verhalten von U bei der Korrosion der U-führenden Gläser ist hier von besonderer Bedeutung.
- (C) Batchexperimente mit repräsentativen Gläsern zur Bestimmung der Korrosionskinetik (Kinetische Serie) und Untersuchung/Analyse der experimentellen Produkte.
- (D) Isotopentracerexperimente mit repräsentativen Gläsern und Untersuchung der Verteilung der Tracer in den Korrosionszonen.
- (E) Durchflusseperimente mit verschiedenen Lösungen (pH-Wert, Salinität, Si- Konzentration) und Analyse der experimentellen Lösung zur Bestimmung der Vorwärtsauflösungsrate.
- (F) Untersuchung der Korrosionserscheinungen und Nachweis von  $^{226}\text{Ra}$  an Glasabdeckungen von Instrumenten aus einem aus der Ostsee geborgenen Militärflugzeug des Typs Ju88.
- (G) Entwicklung eines neuen mathematischen Modells zur Modellierung der Glaskorrosion auf der Basis eines gekoppelten Lösungs-Fällungsprozesses.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- (A): Glassynthese für einfache Zusammensetzung im System  $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  beendet, Synthese mit komplexeren Zusammensetzungen noch laufend. Bisherige Versuche ergaben auf Grund von eingeschlossenen Blasen (Luft/ $\text{CO}_2$ ) im Glas nicht zufriedenstellende Ergebnisse.
- (B-E): Versuche mit internationalem Referenzglas (ISG) laufen.
- (F): Es wurden Würfel aus den Glasabdeckungen der Bordinstrumenten aus der Ju88 hergestellt und bei erhöhten Temperaturen künstlich noch einmal in einem Meerwasseräquivalent alteriert (Salzlösung: 0,9 %, entsprechend dem durchschnittlichen Salzgehalt am Fundort Saßnitz in der Ostsee). Ausgehend von den zuvor erlangten Beobachtungen, dass Alteration hauptsächlich in Rissen auftritt, wurde die Hälfte der Würfel künstlich mit Rissen versehen. Deutlicher noch als zuvor zeigt sich die Abhängigkeit der Auflösungsrate von der Art und Zusammensetzung des Fluides an der Reaktionsgrenzfläche und weniger von der Zusammensetzung der Gesamtlösung.
- (G): Ein einfaches 1D-Finite-Elemente-Modell zur Modellierung der Sauerstoffisotopenverteilung in Korrosionssäumen, die sich in  $^{18}\text{O}$ -markierten Lösungen gebildet haben, wurde auf Basis eines Lösungs-Fällungsprozesses entwickelt. Dieses Modell ist im Gegensatz zu etablierten mechanistischen Modellen in der Lage die Isotopenverteilung zu reproduzieren.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- (A): Synthese von blasenfreiem Glas mit komplexeren Zusammensetzungen.
- (B-E): Folgen im direkten Anschluss an Synthese (A), beginnend mit Batchexperimenten der kompositionellen Serie (B), gefolgt von Batchexperimenten der kinetischen Serie (C), Isotopentracerexperimenten (D). Durchflusseperimente (E) sollen nun mit dem Glas einfacher Zusammensetzung ( $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ ) und Si-gesättigter Lösung stattfinden, da einerseits die Lösungsraten in einem günstigerem Zeitrahmen liegen und der Fokus auf die Vorwärtsauflösungsrate (bei gesättigter Lösung) gelegt werden soll.
- (F): Weiterführung bisheriger Experimente und Analysen.
- (G): Wird nach Beendigung von (B-E) durchgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Veröffentlicht: Dohmen L., Lenting C., Fonseca R. O. C., Nagel T., Heuser A., and Geisler T. (2013): Pattern Formation in Silicate Glass Corrosion Zones. Volume 4, Issue 4, Seiten 357–370, Dezember 2013. DOI: 10.1111/ijag.12046

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		<b>Förderkennzeichen:</b> 02 NUK 020A
<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 550.191,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Geist	

### 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 durch Synthese und Charakterisierung von Metallkomplexen mit den neuen Liganden und ausgedehnte spektroskopische Untersuchungen in Lösung – „Synthese und Spektroskopische Untersuchungen“
- Arbeitspaket C: Studien in Hinblick auf eine Einbindung in Konditionierungsprozesse – „Prozessstudien“

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### Arbeitspaket A:

Im vergangenen Berichtszeitraum wurden Fortschritte bei der Synthese des vollständig  $^{15}\text{N}$ -markierten Pyridinrings zur Synthese von  $^{15}\text{N}$ -isotopenmarkiertem *n*Pr-BTP und C5-BPP erzielt. Die Optimierung von Schlüsselschritten wird im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt. Die Synthesearbeiten sind Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam) und werden auch im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt.

#### Arbeitspaket B:

Im vergangenen Berichtszeitraum wurde in Kooperation mit dem AK Panak (Uni HD) die Synthese von C5-BPP (2,6-Bis(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)pyridin) modifiziert, um die Strickstoffe der Pyrazolringe mit  $^{15}\text{N}$  zu markieren. Das  $^{15}\text{N}$ -markierte C5-BPP wurde mittels Massenspektrometrie und TRIFS charakterisiert. Diese Modifikation wurde durchgeführt, da NMR-spektroskopische Untersuchungen an unmarkiertem C5-BPP mit verschiedenen dreiwertigen Lanthaniden und Americium(III) ergaben, dass die durch evtl. vorhandene Kovalenz besonders verschobenen Stickstoffe der Pyrazolringe spektroskopisch nicht zugänglich sind. Durch die  $^{15}\text{N}$ -Markierung konnten Verschiebungen sowohl in 1D- als auch in 2D-Sequenzen gewonnen werden. Die Verschiebungen der Lanthanid(III)- und Americium(III)-Komplexe sind komplementär zu den Ergebnissen an  $^{15}\text{N}$ -markiertem *n*Pr-BTP. Koordinierende Stickstoffe

zeigen zusätzliche Verschiebungen in der Größenordnung um 300 ppm, was den Einfluss einer kovalenten Bindung und die damit verbundene Delokalisierung ungepaarter Elektronen nahe legt. Ergebnisse in der Lanthanidenreihe zeigen eindrucksvoll, dass die Verschiebung von koordinierenden Stickstoffen stark von Metallion abhängt, wohingegen nicht koordinierende Stickstoffe kaum zusätzliche Verschiebung erfahren. Diese Ergebnisse an einem weiteren exzellenten Extraktionsliganden unterstützen die bereits publizierten Ergebnisse von Komplexen des *n*Pr-BTP. Eine Publikation befindet sich derzeit in Vorbereitung.

Untersuchungen einer möglichen Übertragbarkeit der für Lanthaniden(III) beschriebenen Methoden zur Quantifizierung von paramagnetischen Einflüssen werden auch im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt und eine Publikation der Ergebnisse der Lanthanidenreihe vorbereitet. Alle beschriebenen Arbeiten sind Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam).

Die Untersuchungen zur Speziation von Tc-99 in ionischen Flüssigkeiten (gemeinsam mit I. Billard/Uni Strasbourg) wurden auf den kommenden Berichtszeitraum verschoben. Derzeit wird eine Tc-99 Stammlösung präpariert und vollständig charakterisiert.

Anfang der Berichtsperiode fand in Karlsruhe der Abschlussworkshop des EURATOM FP7-Projekts „Euract-NMR“ unter federführender Organisation des KIT-INE statt. Es wurden die Ergebnisse vieler europäischer Forschungsvorhaben aus den letzten drei Jahre vorgestellt, die in Kooperation mit dem NMR-Spektroskopikern des INE am KIT bearbeitet wurden. Dieses Projekt hatte neben dem Kompetenzerhalt und der Nachwuchsförderung das Ziel, die europaweit einzigartige NMR-Instrumentierung Wissenschaftlern aus den europäischen Nachbarländern zugänglich zu machen. Sowohl das gesamte Projekt als auch der abschließende Workshop wurde von allen Teilnehmern als herausragend und gewinnbringend gewürdigt.

Die gemessenen NMR-Verschiebungen aller *f*-Element-Komplexe sollen im Rahmen des EURATOM FP7-Projekts „TALISMAN“ in einer Datenbank („AcReDaS-Datenbank-Projekt“) veröffentlicht werden und weltweit zur Verfügung stehen. Das erste Koordinierungstreffen zum Aufbau dieser Datenbank fand im vergangenen Berichtszeitraum statt. Die Veröffentlichung der Datenbank ist spätestens zum Ende des TALISMAN-Projekts Ende 2015 geplant.

*Arbeitspaket C:*

In Zusammenarbeit mit Jülich wurde ein Prozesstest im Labormaßstab zur Trennung von Actiniden(III) von Lanthaniden(III) aus einer salpetersauren Feedlösung durchgeführt. Das in 02NUK012 und 02NUK020 entwickelte und eingehend untersuchte Extraktionsmittel C5-BPP wurde in diesem Test eingesetzt. Es wurde am KIT-INE ein Flowsheet berechnet, basierend auf in Jülich bestimmten kinetischen und Gleichgewichtsverteilungsdaten. Der Prozesstest wurde in Jülich gefahren (siehe Halbjahresbericht Jülich, 02NUK020E).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

*Arbeitspaket A:*

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

*Arbeitspaket B:*

Die Datenlage der *n*Pr-BTP- und C5-BPP-Komplexe mit dreiwertigen Lanthaniden und Actiniden wird im kommenden Berichtszeitraum weiter vervollständigt. Die Ergebnisse der Arbeiten werden in Publikationen und in die Dissertation von C. Adam Eingang finden.

Die Darstellung von Pu-239-Komplexen von *n*Pr-BTP ist weiterhin geplant und wird im kommenden Berichtszeitraum durchgeführt werden.

Die Vorbereitungen der angestrebten Zusammenarbeit mit Uni Strasbourg/F (Isabelle Billard) sind weit fortgeschritten. Erste Messungen sollten im kommenden Berichtszeitraum stattfinden.

*Arbeitspaket C:* –

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

*Euract-NMR Workshop*, Karlsruhe, Germany, 17.–19.07.2013, Vorträge und 3 Poster:

Adam, C., et al.: Probing bonding modes in actinide and lanthanide complexes by NMR spectroscopy.

Woodall, S.D., et al.: Complexing imidophosphinates and bulky pyridines on transuranics.

Natrajan, L.S., et al.: Elucidating structure and speciation of paramagnetic actinide complexes.

Autillo, M., et al.: Americium (III) paramagnetism in solution: radicals effects on magnetic susceptibility measurements.

Griffiths, T.L., et al.: Spectroscopic investigations of lanthanide and actinide complexes relevant to the nuclear fuel cycle.

Tucker, K.L., et al.: Heavy metal extraction using advanced PUREX style partitioning systems.

*Migration 2013 Conference*, Brighton, UK, 8.–13.9.2013, Vortrag und 1 Poster:

Gaona, X., et al.: Solubility and NMR studies of Ca-gluconate and Na-Np(IV)-gluconate systems in dilute to concentrated alkaline CaCl<sub>2</sub> solutions.

*GLOBAL 2013 Conference*, Salt Lake City, USA, 29.09.–03.10.2013, Vortrag und 1 Poster:

Griffiths, T.L., et al.: Understanding molecular speciation of actinides in solvent extraction processes.

*ACTINIDES 2013 conference*, Karlsruhe, Germany, 21.–26.07.2013: 3 Poster

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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, 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 f-Elementen mit den N-Donor-Liganden
- Charakterisierung der Komplexe, insbesondere per Einkristallröntgenstrukturanalyse
- Zudem erfolgen weitere Untersuchungen zur Synthese von f-Element-Komplexen mit N-Donor-Liganden

Die Untersuchungen erfolgten in den Bereichen:

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Der Ligand HN4bipy wurde weiter modifiziert. Der neue Ligand tBu-HN4bipy wurde in Form seines Hydrochlorids erfolgreich isoliert. Die Eignung von tBu-HN4bipy in der Extraktion von Lanthanoiden im Vergleich zu den dreiwertigen Actinoiden wurde in direkter Kooperation mit Uni HD (P. Panak) mittels TRLFS untersucht (WP3).

Im Kontext der Darstellung S-N-Donor Liganden mit phosphorhaltigem Ligandrückgrat (WP1) wurde Bis(6-Methylen-2,2'-bipyridyl)phenylthiophosphan (PSbipy) erfolgreich synthetisiert. Die Charakterisierung sowie Experimente zur Komplexbildung Lanthanid-Nitrat Salzen sind Gegenstand aktueller Forschung.

Die Studien zur Verbesserung der Extraktionseigenschaften des N-Donorliganden  $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{py}\}_3]$  wurden durch Komplexierung der neuen mit Imidazol (im) und Pyrazin (pyz) derivatisierten Liganden  $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{im}\}_3]$ , bzw.  $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{pyz}\}_3]$  mit Lanthanoid(III)trifluormethansulfonaten fortge-

führt. Die Umsetzung des Pyrazin-basierten Liganden mit Lanthantriflat führte zum gewünschten Komplex und konnte NMR-spektroskopisch vollständig charakterisiert werden (WP 2). Es wurden Tieftemperatur  $^{19}\text{F}$ -NMR-Messungen durchgeführt. Der erhaltene Komplex in Lösung liegt im Gegensatz zur Festkörperstruktur als Konformationspaar vor.

Zur Untersuchung von Extraktionsliganden mit *N*-Donor- und *S*-Donorstellen, wird eine Kombination aus dem *N*-Donorliganden Tris(pyrazolyl)methan (Tpm) und einer Thio-, bzw. Dithiophosphinsäure angestrebt (WP 1). Die Synthese des Dithiophosphinsäurederivats  $\text{Tpm}^{(\text{P}(\text{S})(\text{SH})\text{R})}$  erfolgt über die Zwischenstufe  $\text{Tpm}^{(\text{PRCl})}$ . Letztere wurde zunächst für  $\text{R} = \text{Ph}$  aus Tpm und Phenyldichlorophosphan dargestellt und vollständig charakterisiert.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Synthese von tripodalen *S*-Donorliganden sowie deren Koordinationsverhalten gegenüber dreiwertigen Lanthanoiden. Hierzu wurde der *S*-Donorligand  $\text{HC}\{\text{P}(\text{S})\text{Me}_2\}_3$  bzw.  $[\text{C}\{\text{P}(\text{S})\text{Me}_2\}_3]^-$  mit verschiedenen Lanthanoid(III)verbindungen umgesetzt.

Ein weiterer *S*-Donorligand mit elektronenschiebenden Resten ist der modifizierte „Kläui-Ligand“  $[\text{CpCo}\{\text{P}(\text{S})\text{R}_2\}_3]^-$  (WP 1). Erste Versuche zur Darstellung des Phenylsubstituierten Liganden  $[\text{CpCo}\{\text{P}(\text{S})\text{Ph}_2\}_3]^-$  blieben bisher erfolglos. Weitere Untersuchungen sind Gegenstand aktueller Forschung.

Weiterhin wurde der *S*-Donorligand Tris(mercaptomethylimidazolyl)silan  $\text{HSi}(\text{mt}^{\text{Me}})_3$  hinsichtlich seines Koordinationsverhaltens gegenüber Lanthanoidverbindungen getestet. Erste Umsetzungen von  $\text{HSi}(\text{mt}^{\text{Me}})_3$  mit  $\text{La}\{\text{N}(\text{SiMe}_3)_2\}_3$  erscheinen vielversprechend und werden aktuell intensiv weiterverfolgt.

Im Rahmen der Nachwuchsförderung (WP 4) nahmen Frau A. Wagner und Herr Dr. J. Kratsch gemeinsam an der Tagung *Rare Earth Elements and Compounds* vom 10. bis 12. September 2013 in Münster teil. Des Weiteren wurde Frau A. Wagner vom 5. bis 7. Dezember 2013 die Teilnahme an den *Terrae Rarae – Tage der seltenen Erden* in Stuttgart ermöglicht.

Darüber hinaus nahm Frau S. Hohnstein vom 16. bis 18. Juli 2013 an einem *MATLAB-Fortbildungskurs* in Aachen teil (WP4).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Syntheseoptimierung des neuen Liganden tBu-HN4bipy steht für weitere Arbeiten im Vordergrund. Extraktionsexperimente in Kooperation mit Campus-Nord sind geplant.

Der Ligand PSbipy soll weiter charakterisiert und mit Samarium(III)nitrats umgesetzt werden. In Kooperation mit den Projektpartnern werden kinetische und thermodynamische Daten bestimmt sowie die Eignung zur selektiven Extraktion von Actiniden getestet.

Die Derivatisierung des Liganden  $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{py}\}_3]$  mit weiteren stickstoffreichen Aldehyden wird fortgeführt, um anschließend die Komplexbildungseigenschaften vergleichend zu untersuchen. Die Synthese der Dithiophosphinsäurederivate  $\text{Tpm}^{(\text{P}(\text{S})(\text{SH})\text{R})}$  wird fortgeführt. Studien zur selektiven Extraktion von Actiniden sind geplant.

Für die weitere Forschung im Bereich der reinen *S*-Donorliganden ist die Substitution der Methylgruppen des Liganden  $\text{HC}\{\text{P}(\text{S})\text{Me}_2\}_3$  gegen elektronenschiebende Gruppen geplant. Die Synthese des modifizierten „Kläui-Liganden“  $[\text{CpCo}\{\text{P}(\text{S})(\text{SR})_2\}_3]^-$  wird fortgesetzt. Zudem wird das Komplexbildungsverhalten des *S*-Donorliganden  $\text{HSi}(\text{mt}^{\text{Me}})_3$  weiter untersucht.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

P. W. Roesky: Main Group Molecules in 4f Metal Chemistry. GDCh-Wissenschaftsforum, Darmstadt, 2013.

P. W. Roesky: Chemistry of the Rare-Earth Elements: Borohydrides and Polynuclear Lanthanide Complexes. XXV. Tage der Seltenen Erden - Terrae Rarae, Stuttgart, 2013.

T. Prüßmann, M.A. Denecke, A. Geist, J. Rothe, P. Lindqvist-Reis, M. Löble, F. Breher, D.R. Batchelor, C. Apostolidis, O. Walter, W. Caliebe, K. Kvashnina, K. Jorissen, J.J. Kas, J.J. Rehr, T. Vitova, Journal of Physics: Conference Series 2013, 430, 012115.

J. Kratsch: Borohydrides of Eu(II) and Yb(II) – Synthesis, Properties and Reactivity. 2nd Rare Earth Elements and Compounds Conference (REEC), Münster, 2013.

A. T. Wagner: Luminescent Cell-Penetrating Pentadecanuclear Lanthanide Clusters. 2nd Rare Earth Elements and Compounds Conference (REEC), Münster, 2013.

A. T. Wagner. Luminescent Cell-Penetrating Pentadecanuclear Lanthanide Clusters: XXV. Tage der Seltenen Erden - Terrae Rarae 2013, Stuttgart, 2013.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Liganden-Typen 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

Es wurden alkyl-substituierte N,O-Liganden mit einem tacn-Ankersystem und daraus hervorgegangene Urankomplexe synthetisiert, deren sterische Abschirmung, elektronische Struktur und Löslichkeitsverhalten durch unterschiedliche Substituenten determiniert wurden.

Ausgehend von dem tacn-geankerten N,O-Ligandensystem sind chalcogenidverbrückte Komplexe  $[\{((^{iBu,iBu}ArO)_3tacn)U^{VI}\}_2(\mu-E)]$  (E = S, Se) durch Umsetzung der entsprechenden  $U^{III}$ -Spezies mit elementaren Chalkogenen zugänglich. Umsetzung des Uran(III)-Komplex  $[\{(Ad,MeArO)_3N)U^{III}]$  mit elementaren Chalkogenen führt zu chalcogenidverbrückten Komplexen  $[\{((^{Ad,Me}ArO)_3N)U^{VI}\}_2(\mu-E)]$  (E = O, S, Se) als auch zu *diamond-core* Komplexen  $[\{((Ad,MeArO)_3N)U\}_2(\mu-E)_2]$  (E = O, S, Se, Te).

Weiterhin wurde die Reaktivität von  $[\{((^{tBu,tBu}ArO)_3tacn)U^{VI}\}_2(\mu-E)]$  ( $E = S, Se$ ) und  $[\{((^{Ad,Me}ArO)_3N)U^{VI}\}_2(\mu-E)]$  ( $E = S, Se$ ) gegenüber einem Überschuss an Chalkogenen untersucht. tacn-basierte Komplexe  $U^{VI}-E-U^{VI}$  gehen mit einem Überschuss an Schwefel und Selen keine weitere Reaktion ein. Die Umsetzung von  $[\{((^{Ad,Me}ArO)_3N)U^{VI}\}_2(\mu-Se)]$  mit Selen führt zu drei dinuklearen Uran(IV)Komplexe n. Die Umsetzung der schwefelverbrückte, N-geankerte Komplex  $U^{IV}-S-U^{IV}$  mit elementarem Schwefel, führt zu dinuklearen Uran(IV)Komplexe. Die neu synthetisierten Komplexe konnten eindeutig mittels Einkristallröntgenstrukturanalyse sowie anderen spektroskopischen und magnetischen Methoden charakterisiert werden.

Mitarbeiterpraktikum im Masterstudiengang Chemie mit Forschungsschwerpunkt Uranchemie (4–6 Wochen):

Matthias Miehllich, August/September 2013; Martin Keilwerth, Oktober/November 2013; Vera Seidl, Oktober/November 2013.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Synthese/Charakterisierung/Weiterentwicklung (neuartiger) Ligandensysteme sowie deren Weiterleitung an die Kooperationspartner zur näheren Charakterisierung/Evaluierung.
- Synthese und Charakterisierung von  $U^{III-VI}$ -Komplexen ausgehend von tacn-, mes- und N-basierter N,O-, N,N- bzw. N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>- sowie sterisch abgeschirmten, pyridin- bzw. aryloxidsubstituierter Liganden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vorträge:

From Nuclear Fuels to CO<sub>2</sub> Activation at Uranium Complexes – Chemistry Between Phobia & Enthusiasm (Konferenzbeiträge sowie Anorganisch-Chemischen-Kolloquien)

New Developments in Small Molecule Activation at Uranium Coordination Complexes: Gordon Research Conference on Organometallic Chemistry, 7.–12.7.2013, Salve Regina University, RI, US + 1 Poster

Small Molecule Activation at Reactive Complexes of Uranium: ACTINIDES 2013, 21.–26.7.2013, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, DE

Synthesis, Reactivity & Molecular Structure of Reactive Uranium Coordination Complexes: Summer School 2.–6.9.2013, Essen, DE. + 2 Poster

Activation of elemental chalcogens at uranium coordination complexes and their reactivity towards carbon dioxide and related heteroallenes, 246<sup>th</sup> ACS National Meeting & Exposition, 9.9.2013, Indianapolis, IN, US.

Fundamental Paradigms of Structure and Reactivity in Uranium Coordination Complexes: Invited talk, Inorganic Chemistry Department, 15.–17.12.2013, University of Iowa, IA, US

Reduction and Oxidation Reactions of a Uranium(III) Monoarene Complex: Invited talk, Inorganic Chemistry Department, 28.–30.12.2013, University of Manchester, GB

Veröffentlichungen:

Reactivity of uranium(IV) bridged chalcogenido complexes  $U^{IV}-E-U^{IV}$  ( $E = S, Se$ ) with elemental sulfur and selenium: synthesis of polychalcogenido-bridged uranium complexes, S. M. Franke, et al., Chem. Sci. 2013, advance article, DOI: 10.1039/c3sc52799a.

Masterarbeit von MSc Dominik Pascal Halter zum Thema Uranium-Monoarene Complexes with Chelating Ligands as Model Systems for Electrocatalysis, abgegeben am 30.09.2013.

Masterarbeit von MSc Chistopher Josef Hörger zum Thema Small Molecule Reactivity and Controlled Redox Chemistry with Uranium Coordination Complexes of a Sterically Demanding Aryloxide Ligand, abgegeben am 11.11.2013.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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:

Im Halbjahresbericht Juli 2013 wurden die ersten Ergebnisse der Komplexierung von Cm(III) mit dem im Arbeitskreis von Prof. Dr. P. Roesky hergestellten MeN<sub>3</sub>bipy Liganden vorgestellt. In Ergänzung zu den Titrationsexperimenten mit Cm(III) wurde mittels TRLFS die Komplexierung von Eu(III) in Ethanol (1.5 vol % H<sub>2</sub>O) untersucht. Hierbei wurden die Solvensspezies sowie zwei weitere Komplexspezies nachgewiesen. Die erste Komplexspezies wird bereits ab einer Ligandenkonzentration von 9.9 µM gebildet und weist einen maximalen Speziesanteil von 85 % bei einer Ligandenkonzentration von 360 µM auf. Die zweite Komplexspezies zeigte einen maximalen Speziesanteil von 31 % bei einer Ligandenkonzentration von 1.1 mM. Höhere Ligandenkonzentrationen konnten aus Löslichkeitsgründen nicht realisiert werden.



Durch Steigungsanalyse konnten die Emissionsbanden einem Eu(III)-Ligand 1:1 und 1:2 Komplex zugeordnet werden. Aus der Speziesverteilung wurden folgende konditionelle Gleichgewichtskonstanten bestimmt:  $\log \beta_1 = 4.4$  und  $\log \beta_2 = 6.9$ . Demnach ist die Gleichgewichtskonstante für die Bildung des Eu(MeN<sub>3</sub>bipy)<sub>2</sub> Komplexes um über drei Größenordnungen geringer als die Gleichgewichtskonstante zur Bildung des [Cm(HN<sub>4</sub>bipy)<sub>2</sub>] Komplexes ( $\log \beta_2 = 10.2$ ). Da nur wenige N-Donor Liganden des BTP-Typs eine so hohe Selektivität aufweisen, sind Flüssig-flüssig Extraktionstests sowie gegebenenfalls weitere Komplexierungsexperimente in Gegenwart einer lipophilen Anionenquelle geplant (siehe 4. Geplante Weiterarbeiten).

In Ergänzung zu Komplexierungsstudien mit <sup>15</sup>N-markiertem <sup>147</sup>Pr-BTP (siehe Halbjahresbericht Juli 2012, 02NUK012D und C. Adam et al., *Dalton Trans*, 2013) wurde ein <sup>15</sup>N-markierter 2,6-bis(5-neopentyl-1H-pyrazol-3-yl)pyridin (C5-BPP) Ligand hergestellt. Hierbei ist die Herstellung und Untersuchung der An(III) und Ln(III)-Komplexe mittels <sup>15</sup>N-NMR Spektroskopie sowie ein Vergleich zu den Daten der An(III) und Ln(III)-Komplexe mit <sup>15</sup>N-markierten <sup>147</sup>Pr-BTP von besonderem Interesse.

Die Ausgangsverbindung 1,1'-(pyridin-2,6-diyl)bis(5,5-dimethylhexan-1,3-dion) konnte mit 79 % Ausbeute hergestellt werden. Mit <sup>15</sup>N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> wurde daraus der entsprechende im Pyrazolring markierte C5-BPP Ligand synthetisiert. Der Markierungsgrad beträgt 10 % und die Ausbeute im letzten Syntheseschritt lag bei 92 %. Das Produkt wurde vollständig per LIFDI-MS und NMR-Spektroskopie charakterisiert.

Die Trenneigenschaften des <sup>15</sup>N-markierten C5-BPP Liganden in Flüssig-flüssig Extraktionstests ( $SF_{Am(III)/Eu(III)} \approx 140$ ) stehen in guter Übereinstimmung mit den Trenneigenschaft des unmarkierten C5-BPP ( $SF_{Am(III)/Eu(III)} \approx 100$ , A. Bremer et al., *Dalton Trans*, 2012). Mittels <sup>15</sup>N-NMR Spektroskopie konnten wie bei den vorherigen Studien mit <sup>15</sup>N-markiertem <sup>147</sup>Pr-BTP große Unterschiede in der chemischen Verschiebung bei Komplexierung von dreiwertigen Actiniden bzw. Lanthaniden mit C5-BPP beobachtet werden. Hieraus konnten wichtige Informationen über ionische und kovalente Anteile an der Metallion-Ligand-Bindung erhalten werden. Eine Publikation zu den Ergebnissen der An(III) und Ln(III) Komplexe mit <sup>15</sup>N-markiertem C5-BPP ist in Vorbereitung (siehe Zwischenbericht KIT-INE).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

In Ergänzung zu Komplexierungsstudien von Cm(III) und Eu(III) mit MeN<sub>3</sub>bipy sollen sowohl der Einfluss einer lipophilen Anionenquelle auf das Komplexierungsverhalten des Liganden als auch die Extraktionseigenschaften in Flüssig-flüssig Extraktionsexperimenten untersucht werden.

Als strukturelle Ergänzung zu den N-Donor Liganden HN<sub>4</sub>bipy und MeN<sub>3</sub>bipy wurde im Arbeitskreis von Prof. Dr. P. Roesky mit 2,6-bis(2-(p-Tolyl)-2H-tetrazol-5-yl)pyridin ein weiterer Ligand mit Pyridin-Grundgerüst entwickelt. Im Folgenden sollen die Komplexierung von Cm(III) und Eu(III) mittels TRLFS sowie die Extraktionseigenschaften durch Flüssig-flüssig Extraktionsexperimente untersucht werden. Im Vergleich zu HN<sub>4</sub>bipy ist vor allem der Einfluss des zusätzlichen Tetrazolylsubstituenten auf die Löslichkeit in unpolaren Lösungsmitteln und auf die Komplexierungseigenschaften des Liganden von Interesse.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Bremer, D. M. Whittaker, C. A. Sherrad, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) and Eu(III) with CyMe<sub>4</sub>-BTPPhen and CyMe<sub>4</sub>-BTBP studied by time resolved laser fluorescence spectroscopy, *Dalton Trans*. 2014, 43 (6), 2684 – 2694.

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.* 2013, DOI: 10.1080/07366299.2013.833791.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

- AP1: Neue Liganden aus der Gruppe der Bis-pyrazolyl-pyridine wurden an der Universität Erlangen synthetisiert und charakterisiert und werden zurzeit in Jülich auf Ihre Extraktionseigenschaften hin untersucht.
- AP2: Die Arbeiten zur Aufklärung des Extraktionsmechanismus von  $\text{CyMe}^4\text{BTPPhen}$  in ionischen Flüssigkeiten wurden abgeschlossen. Es konnte gezeigt werden, dass bei den unterschiedlichen untersuchten Bereichen der  $\text{HNO}_3$ -Konzentration verschiedene Komplexzusammensetzungen für die Extraktion verantwortlich sind.  
Zum mechanistischen Verständnis der Extraktion von dreiwertigen Lanthanid- und Actinid-Kationen mit modifizierten Diglycolamiden wurden DFT-basierte ab-initio Modellierungen angestellt, die in vereinfachten Modellen die experimentell beobachteten Trends bereits gut wiedergeben konnten.
- AP3: In Zusammenarbeit mit KIT-INE wurde ein Prozesstest im Labormaßstab zur Trennung von Actiniden(III) von Lanthaniden(III) aus einer salpetersauren Feedlösung durchgeführt. Das in 02NUK012 und 02NUK020 entwickelte und eingehend untersuchte Extraktionsmittel C5-BPP wurde in diesem Test eingesetzt. Es wurde am KIT-INE ein flow-sheet berechnet, basierend auf in Jülich bestimmten kinetischen und Gleichgewichtsverteilungsdaten. Der Prozesstest wurde in der in Jülich installierten 16-stufigen Zentrifugalkontaktoranlage erfolgreich durchgeführt.
- AP4: Herr Holger Schmidt hat eine Masterarbeit zur Am(III)-selektiven Extraktion aus PUREX Raffinaten mit Dithiophosphinsäuren durchgeführt und wird nun anschließend seine Promotion beginnen. Frau Michelle Hupert wird eine Bachelorarbeit zur quantitativen Analyse von C5-BPP in Radiolysestudien durchführen, dazu ist auch ein Auslandsaufenthalt an der Universität Chalmers in Göteborg, Schweden, geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Untersuchung der neuen Liganden aus Erlangen wird fortgesetzt.

EXAFS Messungen zu den modifizierten Diglycolamidliganden sollen die Stöchiometrie und den Aufbau der inneren Koordinationssphäre der Komplexe aufklären, um die DFT-basierten ab-initio Modellierungen weiter zu verfeinern.

In Zusammenarbeit mit der Universität Chalmers in Göteborg, Schweden, wird die Radiolysestabilität von C5-BPP untersucht.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- A. Wilden, G. Modolo et al., *Solvent Extr. Ion Exch.*, 2013, Vol. 31, Issue 5, p. 519-537
- A. Wilden, *Solvent Extr. Ion Exch.*, 2014, DOI: 10.1080/07366299.2013.833791
- G. Modolo, A. Wilden, et al., *Prog. Nucl. Energ.*, DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.07.021.
- A. Wilden, G. Modolo et al., GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, 01.-04.09.2013, Darmstadt, Deutschland, Vortrag
- A. Wilden, G. Modolo et al., GLOBAL 2013, 29.09.-03.10.2013, Salt Lake City, USA, Vortrag und Proceeding-Artikel
- A. Geist, G. Modolo et al., GLOBAL 2013, 29.09.-03.10.2013, Salt Lake City, USA, Proceeding-Artikel
- G. Modolo, A. Wilden, A. Geist, IAEA Technical Meeting on Advanced Actinide Recycle Technologies, 18.-20.11.2013, Wien, Österreich, Vortrag

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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:* Die Syntheserouten zur Herstellung der Mischkristalle wurden weiter optimiert. Neu ist die Synthese von  $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  mit Pyrochlorstruktur mittels isostatischen Heißpressens (HIP). Mit einer Alkalichlorid-Fluss-Methode wurden Th und U Phosphate und Arsenate synthetisiert. *Materialtransfer:* Ausgewählte Materialien wurden hergestellt und an GUF-IFG, RWTH-GHI, RWTH-IFK und HZDR-IRO geliefert.
- AP2: Anhand struktureller Daten der  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Mischkristallreihe konnte ein Phasenstabilitätsfeld der Pyrochlorstruktur aufgestellt werden. Für die Pu-haltigen Pyrochlore wird z.Zt. ein Strukturmodell erstellt, mit dessen Hilfe die geplanten EXAFS Messungen an der ANKA Beamline gefittet werden können. IR-Messungen an  $\text{LnPO}_4$ -Endgliedern ( $\text{Ln} = \text{La-Gd}$ ) zeigen ergänzend zu XRD- und Raman-Ergebnissen den linearen Zusammenhang zwischen Bandenlagen und Ionenradien. (Sm,Tb)-Phosphat-Mischkristalle wurden mit üblichen Charakterisierungsmethoden und mit in-situ Hoch-Temperatur-/Hoch-Druck-Raman spektroskopisch untersucht, um Phasenumwandlungen zu beobachten. EXAFS-(ROBL-Beamline) und Raman-Messungen wurden an  $(\text{La,Eu})\text{PO}_4$ -Mischkristallen durchgeführt, um Nahordnungsphänomene der La und Eu-Ionen abzuleiten. Es wurden einige neue Kristallstrukturen (u.

a. Nd haltige U-Phosphate und Arsenate) und ein U-Arsenat Molekülkomplex mit dem aus Projektmitteln finanzierten Einkristalldiffraktometer nachgewiesen.

Erste Rechnungen zeigen, dass die DFT+U Methode mit PBEsol Austausch-Korrelations-funktional und dem ab-initio abgeleitete Hubbard U Parameter eine korrekte Beschreibung der strukturellen Eigenschaften ermöglicht.

- AP3: Erste Monte-Carlo-Simulationen (mit Software SRIM: „Stopping and Range of Ions in Matter“) wurden für die Simulation von Beschuss mit Schwerionen auf (Sm,Tb)PO<sub>4</sub>-Targets durchgeführt.
- AP4: Dynamische Aspekte des Sinterprozesses von La<sub>0,5</sub>Eu<sub>0,5</sub>PO<sub>4</sub>, wurden in-situ mittels Hochtemperatur-REM am ICSM in Marcoule, FR untersucht. Die Kristallisation von (La,Eu)PO<sub>4</sub> Pulvern wurde durch die Kombination von TG-DSC, XRD und In-situ-Hochtemperatur-Raman-Spektroskopie untersucht.
- AP5: Der Einfluss der Temperatur auf das Auflösungsverhalten wurde auf die Defektfluorite ausgeweitet. Zusätzlich wurde der Einfluss des Gefüges für die stöchiometrischen Nd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Pyrochlore untersucht. Ergänzend wurden mikroskopische Betrachtungen mittels REM und Weißlichtinterferometrie (VSI) in Kooperation mit dem ICSM (FR) und der Universität Bremen begonnen. Untersättigungs- und Übersättigungs-Experimente wurden an La,Eu-Phosphaten durchgeführt. Die abschließende Auswertung der Ergebnisse und ein Vergleich mit berechneten Daten (GEMS-PSI) stehen noch aus.
- AP6: Es sind bereits 5 Artikel veröffentlicht, 3 weitere Artikel sind eingereicht. Des Weiteren wurden die Ergebnisse (10 Vorträge und 9 Poster) auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Syntheserouten werden in Bezug auf die Herstellung von Mischkristallen unterschiedlicher Morphologie und Mikrostruktur optimiert. Weitere Materialien für RWTH-GHI werden geliefert. Die Zusammensetzungen für Messungen am GUF-IFG werden auf die jeweiligen Versuche angepasst und synthetisiert. Gemeinsam mit dem RWTH-IFK sollen Einkristalle für strukturelle Untersuchungen hergestellt werden.
- AP2: Die Charakterisierung (XRD, REM/EDX, Raman) der Syntheseprodukte wird fortgesetzt. TRIFS und weitere EXAFS-Messungen sind mit dem HZDR-IRO vorgesehen. Es ist geplant Ordnungs-Unordnungsphänomene mittels FIB und TEM in Abhängigkeit des Nd/Zr Verhältnisses bei Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> Systemen zu untersuchen. Die Einkristallsynthesen zu den U und Th Arsenaten und Phosphaten werden modifiziert. Die Ableitung von Hubbard U Parameterwerten (entwickelt von PGI-FZ) mit state-of-the-art-Verfahren zur Simulation von Strukturparametern, elastischen Konstanten und Thermodynamik der festen Monazit-Lösungen wird untersucht.
- AP3: Die Simulationsrechnungen zu Strahlenschäden, z. B. Ordnung-Unordnung Übergang in Pyrochlor sind in Abstimmung mit den Arbeiten von Brenk Systemplanung geplant.
- AP4: Die Untersuchung des Sinterverhaltens in Abhängigkeit von der Partikelmorphologie und der -größe der Grünkörper wird fortgesetzt.
- AP5: Statische und dynamische Auflösungsexperimente werden an den Mischkristallreihen durchgeführt.
- AP6: Die Ergebnisse werden gemeinsam mit Projektpartnern auf verschiedenen Konferenzen präsentiert und zur Veröffentlichung eingereicht.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

##### *Zeitschriftenbeiträge:*

Arinicheva et al.: Prog. Nucl. Energy, doi: 10.1016/j.pnucene.2013.09.004; Blanca Romero et al.: J. Comput. Chem., submitted; Brandt et al.: Prog. Nucl. Energy, doi: 10.1016/j.pnucene.2013.07.019; Finkeldei et al.: Prog. Nucl. Energy, doi: 10.1016/j.pnucene.2013.07.020; Finkeldei et al.: Appl. Geochem., submitted; Heuser et al.: Prog. Nucl. Energy, doi: 10.1016/j.pnucene.2013.09.003; Yu et al.: Solid State Chem., submitted; Belle et al.: Sensors and Actuators B: Chemical 2014, B 192, 60-69.

##### *Vorträge:*

Arinicheva et al.: First Russian Nordic Symposium on Radiochemistry (RNSR), Moscow, Russia: 21.10. - 24. 10. 2013; Arinicheva, et al.: Microsymposium IGEM RAS, Moscow, Russia, 24.10.2013; Bukaemskiy et al.: Euromat2013 Conference, Sevilla, Spain, 08.09. – 13.09.2013; Finkeldei et al.:E-MRS Spring Meeting; Strasbourg, France: 27.05. - 31.05.2013; Finkeldei et al.: Goldschmidt Conference; Florence, Italy: 25.08. - 30.08.2013; Finkeldei et al.: GDCh Wissenschaftsforum Chemie 2013; Darmstadt, Germany: 01.09. - 04.09.2013; Neumeier et al.: Euromat2013 Conference, Sevilla, Spain, 08.09. – 13.09.2013; Neumeier et al.: First Russian Nordic Symposium on Radiochemistry (RNSR), Moscow, Russia: 21.10. - 24. 10. 2013; Neumeier et al.: Microsymposium, IGEM RAS, Moscow, Russia, 24.10.2013; Neumeier et al.: Seminar, IRS, Leibniz Universität Hannover, Germany, 12.12.2013

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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):  
Test und elektronische Integration des aus Projektmitteln gekauften 4-Element-Si-DRIFT-Detektors. Dabei zeigte sich eine Fehlfunktion von 2 der 4 Detektorelemente. Derzeit ist der Detektor wieder beim Hersteller (Garantiefall).

Erfolgreiche XAFS-Messungen im System Lanthan-Europium-Phosphat mit Monazit-Struktur (Yulia Arinicheva und Stefan Neumeier, FZ-Jülich), 3.-7. Juli 2013. Auswertung der EXAFS-Spektren simultan an beiden Absorptionskanten (Ln-L<sub>III</sub> und Eu-L<sub>III</sub>). Die mit XRD beobachtete Volumenkontraktion der Einheitszelle mit steigendem Eu-Gehalt ist auf der mit EXAFS beprobten molekularen Nahordnung auf eine überproportionale Reduktion der La-O-Koordinations-Abstände zurückzuführen, während die Eu-O-Abstände unverändert bleiben.

Erfolgreiche XAFS-Messungen zur Iod-Einretention durch Apatit (Natallia Torapava), 13-16. Nov 2013. Die Auswertung zeigt zwei verschiedene Retentionsmechanismen für Iodid und Iodat in Apatit: Oberflächenkomplexierung und Einbau.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):  
Durchführung der ersten XAFS-Messungen im System Samarium-Terbium-Phosphat mit einem Übergang von Monazit- zu Xenotim-Struktur an den Sm-L<sub>III</sub> und Tb-L<sub>I</sub>-Kanten (29.01.-1.02.2014, Julia Heuser, FZ-Jülich) und Datenauswertung der EXAFS-Spektren simultan an beiden Absorptionskanten.

Durchführung der ersten XAFS-Messungen in Eu- und <sup>248</sup>Cm-gedopten Lanthan-Gadolinium-Phosphaten mit einem möglichen Übergang von Monazit- zu Xenotim-Struktur an den Ln-L<sub>III</sub>, Eu-L<sub>III</sub>, Gd-L<sub>I</sub> und Cm-L<sub>III</sub>-Kante (Sommer 2014, Stefan Neumeier, FZ-Jülich).

Commissioning des 4-Element-Si-DRIFT-Detektors.

Durchführung des dritten Projektmeetings in Grenoble (27./28.02.2014)

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Volume-doped cobalt titanates for ethanol sensing: an impedance and X-ray absorption spectroscopy study, Clemens J. Belle, Günter E. Wesch, Stefan Neumeier, M. Janeth Lozano-Rodríguez, Andreas C. Scheinost, Ulrich Simon, *Sensors and Actuators B: Chemical* **2014**, B 192, 60-69.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

Bisher liegen noch keine wissenschaftlichen Ergebnisse vor. Durch den Wechsel des Projektleiters ans Institut für Ressourcenökologie des HZDR wurden die Arbeiten zum Teilprojekt 02NUK021C noch nicht angetreten.

Da es bislang innerhalb des Teilprojekts zu keinem Mittelabfluss kam, steht noch die gesamte bewilligte Summe zur Verfügung. Ab Januar wird Frau Dr. Nina Huittinen das Teilprojekt federführend in Rossendorf bearbeiten. Um die verlorene Zeit aufzuholen, wird neben Frau Dr. Huittinen, Herrn Dr. Nils Baumann für ein halbes Jahr die Probenpräparation sowie die Lasermessungen unterstützen. Dadurch ist für 2014 der Mittelabfluss von 2013 und 2014 gesichert. Die für die Untersuchungen benötigten Geräte zur site-selektiven Laserfluoreszenzspektroskopie sind bestellt worden bzw. befinden sich im Aufbau. Frau Dr. Huittinen hat sich bereits mit dem Projektkoordinator Dr. Stefan Neumeier (FZJ) getroffen und ist inhaltlich in das Projekt eingeführt worden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Literaturstudie zu Monazit und Pyrochlorphasen
- Aufbau des Detektionssystems für die site-selektive Laserfluoreszenzspektroskopie
- Charakterisierung von  $\text{Eu}^{3+}$ -dotiertem  $(\text{La,Gd})\text{PO}_4$  vor und nach Kalzinierung, sowie mit variierender  $\text{Eu}^{3+}$ -Konzentration, wird mittels site-selektiver TRLFS durchgeführt. So werden Informationen über die Struktur und Speziation des Europiums in Lanthanidphosphaten mit Monazitstruktur erhalten, und zugleich mögliche Änderungen in der Punktsymmetrie des Europiums als Folge erhöhter Festkörperkonzentration ermittelt

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

Mit dem Ziel eine höhere Enddichte zu erreichen, wurden die vorhandenen Pulver feiner aufgemahlen und anschließend gesiebt, um eine Korngrößenverteilung kleiner einer maximalen Korngröße sicher zu stellen. Darüber hinaus wurden vom RWTH-IFK PrPO<sub>4</sub>- und LaPO<sub>4</sub>-Pulver (hergestellt über Festphasenreaktion) zur Verfügung gestellt. LaPO<sub>4</sub>-Pulver (mittels Präzipitation hergestellt) des FZJ-IEK6 wurde zunächst kalziniert und anschließend ebenfalls gemahlen und gesiebt. Die Pulver wurden für Versuche zur Sinterung, Charakterisierung der Schwindung sowie Analyse der Gefügeeigenschaften verwendet. Dazu wurden Proben uniaxial gepresst und drucklos gesintert. Die Temperatur-Zeit-Zyklen wurden angepasst, um einerseits den Einfluss der Variation der Temperatur, der Haltezeit sowie der Heizrate herauszustellen. Die Dichte der gesinterten Probe wurde nach dem archimedischen Prinzip mit destilliertem Wasser als Eintauchflüssigkeit ermittelt. Auf ein Schleifen der Oberflächen für Dichteanalysen und REM-Untersuchungen wurde verzichtet, um as-sintere Proben zu charakterisieren. Die Analyse im Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigte einen Unterschied zwischen einem feineren Gefüge am Rand der gesinterten Proben und dem innen liegenden Bereich. Erste Versuche im Dilatometer wurden ebenfalls vorgenommen, um die Längenänderung während der Sinterung aufzunehmen. Das Einordnen der bisherigeren Ergebnisse in Sinterkarten wurde begonnen.

Für das IFK (Teilprojekt E) wurden Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tiegel für die Probensynthese zur Verfügung gestellt. Außerdem wurde Lanthan-Praseodymophosphat-Proben des IFK, die mittels Mikrosondenanalyse untersucht worden waren, zum Vergleich am GHI mittels REM und EDX analysiert. Bei gegenseitigem Besuch wurden diese Ergebnisse diskutiert.

Das zweite Verbundprojekttreffen im August wurde zum intensiven Austausch mit den Kooperationspartnern genutzt. Hier wurde der Beitrag des GHI zum Verbundprojekt in einem Vortrag vorgestellt, ebenso wie die Ergebnisse aller Teilprojekte besprochen, verglichen und diskutiert wurden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Temperatur-Zeit-Zyklen werden weiterhin optimiert und die Ergebnisse aus der Gefügecharakterisierung dieser Proben zur weiteren Ergänzung der Sinterkarten genutzt werden. Zur Untersuchung des Sinterfortschritts sollen darüber hinaus weitere Proben mittels Dilatometrie am FZJ-IEK6 sowie möglicherweise am GUF-IFG untersucht und anschließend charakterisiert werden. Im weiteren Verlauf sollen Proben mittels ratenkontrollierter Sinterung hergestellt werden. Erste dichte Proben sollen an das GUF-IFG gesendet werden, damit weitere Untersuchungen mittels PPMS, Dilatometrie sowie Ultraschallmessungen vorgenommen werden können.

Das dritte Verbundprojekttreffen im Februar soll für einen direkten Austausch, Diskussion der bisherigen Ergebnisse und der weiteren Vorgehensweise genutzt werden.

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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. Dies wird in Kooperation vor allem mit dem Forschungszentrum Jülich (Teilprojekt A), dem RWTH-GHI (Teilprojekt D) sowie der Goethe-Universität Frankfurt am Main (Teilprojekt F) erfolgen.

## 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 röntgenographische Charakterisierung der Mischkristallreihe der Zusammensetzung  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-0.5x}\text{Ce}_{1-0.5x}\text{PO}_4$  ist im vergangenen halben Jahr abgeschlossen worden.

Die Mischkristallreihe der Monazitzusammensetzung  $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$  wurde entsprechend AP4 mittels DTA/DSC-TG hinsichtlich ihrer thermodynamischen Eigenschaften untersucht. Es zeigt sich, dass sich alle Proben ähnlich verhalten. Es sind keine starken Gewichtsänderungen oder Sprünge in der DSC-Kurve erkennbar. Das Endglied  $\text{PrPO}_4$  hingegen zeigt beim Abkühlen einen Gewichtsverlust, was auf die Änderung der Wertigkeit des Pr-Ions zurückzuführen sein könnte.

Die  $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ -Proben wurden im FZ Jülich (Teilprojekt A) mittels Infrarotspektroskopie untersucht. Hierbei zeigen die Absorptionsbanden der asymmetrischen Streckschwingung bei steigendem Pr-Gehalt eine leichte Verschiebung zu höheren Wellenzahlen. Raman-Messungen an der Goethe-Universität (Teilprojekt F) an diesen Substanzen wurden begonnen. Elektronenstrahl-Mikrosondenuntersuchungen wurden an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel durchgeführt. Hierbei ließ sich die Phasenreinheit der Proben überprüfen und die exakten chemischen Zusammensetzungen bestimmen. Die Abweichung von der nominellen Stöchiometrie liegt bei  $\sim 4$  mol %. Dies umfasst sowohl die Inhomogenität der Proben, als auch die Messunsicherheit.

Weiterhin wurden Vorbereitungen und Vorversuche für die weitere Einkristallzucht durchgeführt. Gezüchtete  $\text{LaPO}_4$ -Einkristalle wurden mittels Röntgendiffraktion charakterisiert.

Für das RWTH-GHI (Teilprojekt D) wurden  $\text{LaPO}_4$  und  $\text{PrPO}_4$  für Schrumpfungskarakterisierung und Sinterung hergestellt. Außerdem wurden am GHI mittels REM Vergleichsmessungen zu den Mikrosondenuntersuchungen durchgeführt. Bei gegenseitigen Besuchen wurden die Ergebnisse besprochen.

Im zweiten Verbundtreffen im August in Hannover wurden Ergebnisse, Auswertungen und Vergleiche zwischen den Einzelprojekten besprochen und ausgetauscht.

Des Weiteren ist eine Publikation in Vorbereitung.

Der beantragte Ofen wurde beschafft und in Betrieb genommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Charakterisierung der Mischkristallreihe  $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$  wird im Januar 2014 mit Synchrotronmessungen an PETRA III, ermöglicht durch Messzeit der Goethe-Universität (Teilprojekt F), erweitert.

Die Publikation der bis dato erhaltenen Daten wird fertiggestellt.

Im weiteren Verlauf soll die Züchtung der Einkristalle optimiert und mit der Untersuchung des Korrosionsverhaltens begonnen werden.

Weiterhin soll durch den Einbau von Tb in  $\text{LaPO}_4$  und  $\text{PrPO}_4$  die Stabilität des Monazits durch Synthesen und Charakterisierungen untersucht werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

2 Abstracts für die DGK im März 2014.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

In intensiver Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus Jülich wurde weiter an der Charakterisierung der Keramik-Proben (Lanthan-Europiumphosphate verschiedenster Zusammensetzungen) gearbeitet. Die Untersuchung dieser Proben mittels Ultraschallmessungen konnten noch nicht abgeschlossen werden, da weiterhin keine auswertbaren Signale gemessen werden konnten. Ein technischer Fehler kann ausgeschlossen werden, vielmehr ist die Probenherstellung problematisch. Weitere Keramikpellets sollen in Jülich hergestellt werden, um dieses Problem zu lösen. Um die Keramiken mikro-strukturell zu analysieren waren REM-Messungen in Zusammenarbeit mit den Partnern in Jülich geplant, jedoch war deren Gerät bis Ende 2013 nicht einsatzfähig. Daher wurden erste Messungen in Frankfurt durchgeführt, weitere Messungen sind für Februar in Jülich geplant. Die Messungen der Wärmekapazitäten wurden mit verbesserter Auflösung fortgesetzt. Wir haben den Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Wärmekapazitäten nachgewiesen. Die Messungen werden fortgesetzt. Die Neutronen-Kleinwinkel-Streuexperimente in Los Alamos wurden im Oktober durchgeführt. Für eine  $\text{LaPO}_4$ -Probe wurde die innere Oberfläche bestimmt. Dilatometrie-Messungen wurden weitergeführt, allerdings fehlen auch hier noch Proben aus Jülich um diese abzuschließen. Es konnten Unterschiede in der thermischen Ausdehnung zwischen heißgepressten und nachgesinterten Proben festgestellt werden. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner RWTH - Aachen wurden Ramanspektren von Lanthan-Praseodymophosphat-Pulvern gemessen, entsprechende Keramiken konnten durch die Projektpartner bis heute nicht hergestellt werden. Hochdruck-Ramanspektroskopie bis zu Drücken von 10 GPa wurde in Zusammenarbeit mit dem Jülicher Partner durchgeführt. Die Raman-Spektren werden zurzeit ausgewertet. Es wurden zwei Beiträge zur DGK-Jahrestagung eingereicht. Eine Veröffentlichung über die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Lanthan-Europiumphosphate wird zurzeit fertiggestellt. Die bisherigen Ergebnisse der Ultraschallmessungen werden zurzeit mit Ergebnissen von in Jülich durchgeführten Computersimulationen verglichen. Frau Thust hat im Dezember an einer Weiterbildung zu „Projekt Management“ teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden wie geplant weiter durchgeführt. Im Januar hat Frau Thust Beugungsexperimente am PETRA-III Synchrotron (DESY, Hamburg) durchgeführt. Im Februar werden die REM Ausnahmen in Jülich stattfinden. Im März sind Messungen an der GSI geplant. Die erste Veröffentlichung soll in drei Monaten fertiggestellt sein. Die Konferenzbeiträge werden im März präsentiert. Weitere Messungen in den nächsten Monaten hängen von der Lieferung von neuen Proben von den Projektpartnern ab.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Einreichung von 2 Beiträgen zur DGK-Jahrestagung, die im März 2014 in Berlin stattfindet:  
 A. Thust, Y. Arinicheva, E. Haussühl, S. Neumeier, L. Bayarjargal, B. Winkler (2013): Mechanical and physical properties of monazite-type ceramics  $\text{La}(1-x)\text{Eu}(x)\text{PO}_4$ . DGK Abstract (oral presentation, eingereicht).  
 A. Hirsch, A. Neumann, A. Wätjen, J. Heuser, A. Thust, L. Peters, G. Roth (2013): Synthesis and characterisation of (La,Pr) monazite solid solution series. DGK Abstract (oral presentation, eingereicht).

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 231.108,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. 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 erfolgversprechend 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

Layred double hydroxides (LDHs) verschiedener Zusammensetzung (Mg/Al; Ca/Al, Ca/Fe) wurden synthetisiert. Der Einbau von Jodid und Jodat wurden verglichen – sowohl im Fall direkten Einbaus als auch im Fall der Intercalcination. Die Analyse der Elementzusammensetzung erfolgte mit Ionenchromatography (IC) und Induktiv gekoppeltem Plasma optischer Emissions Spectroscopy (ICP-OES). Der Anteil des bei der Synthese nicht umgesetzten Iods wird in den zugehörigen Filtraten bestimmt. Die LDH werden einer Röntgen-Beugungs-Analyse (XRD) unterzogen. Die Diffraktogramme bestätigen eine niedrige Kristallinität der LDH Proben, wie sie unter den benutzten Bedingungen zu erwarten ist (Mitfällung bei Raumtemperatur ohne weitere Erhitzung). Ein zusätzliches Erhitzen könnte zu einem Verlust des flüchtigen Iods führen. Allerdings hängt die Temperatur bei der dieser Effekt einsetzt davon ab, wie das Iod eingebunden ist, insbesondere von der strukturellen lokalen Umgebung des Iods in der synthetisierten Matrix.



Apatitproben wurden mit einer Mikrosonde untersucht. Es zeigte sich, dass Iodat mit bis zu 7 % Gewicht in Apatit eingebaut wird, Iodid hingegen gar nicht. Diese Ergebnisse wurden mittels IC und ICP OES Messungen an in Salpetersäure gelösten Proben bestätigt.

Ein Iod-Apatit Pellet wurde bei 800 °C unter hohem Druck hergestellt. Der Iod Gehalt sank nach der Herstellung drastisch von 5.1 auf 0.8 %. Apatit der unter Inertgas Atmosphäre in einer Handschuhbox hergestellt wurde, zeigte keine höhere Einbaurrate im Vergleich zu dem unter Normalbedingungen synthetisierten. Thermogravimetrische Analyse (TGA) der Iodat-Apatite wurde bei einem Aufenthalt am FZJ IEK6 durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten den aus TGA Daten der Literatur erwarteten Masseverlust für Iod-freien Apatit.

An LDH und Apatit wurden an der Rossendorf Beamline (BM 20) am ESRF, Grenoble, Frankreich EXAFS Daten gemessen. EXAFS Messungen geben wichtige Informationen über die Struktur der lokalen Umgebung der eingebauten Iod Spezies im LDH und Apatiti. Die Auswertung der Daten ist noch nicht abgeschlossen, wird jedoch bald folgen. Über die Ergebnisse wird der ESRF innerhalb von 6 Monaten ein Report vorgelegt.

Das zweite Projektmeeting wurde durch das IRS vom 15. - 16 August in Hannover ausgerichtet. Ergebnisse wurden unter dem Titel "Immobilization of long-lived iodine after incorporation into apatite matrix" präsentiert auf (1) Goldschmidt Conference 20-25th August, Florence, Italy und (2) Russian-Nordic Symposium on Radiochemistry 21-24th October, Moscow, Russia.

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

Die EXAFS Daten werden mit dem Software Paket EXAFSPAK analysiert. Die „Inorganic Crystal Structure Database“ (ICSD) wird für strukturelle Modelle und zur Ermittlung von Bindungsabständen benutzt, die wiederum Eingang in die EXAFS Auswertung finden.

Auf experimenteller Seite werden Testreihen zur Auslaugung in MQ Wasser und Lauge (Magnesiumchlorid mit Natriumsulfat) letztere als Homolog für mögliche Bedingungen in einem tiefen geologischen Endlager durchgeführt. Diese Auslaugungen sollen für mehrere LDH und Apatit Proben über Zeiträume zwischen einem Tag und drei Monaten beobachtet werden. Die Konzentration und Speziation des ausgelaugten Iods soll mit IC und ICP OES beobachtet werden. Ferner wird die Strahlungsbeständigkeit der synthetisierten Matrices mit einer Gamma-Quelle untersucht.

Testexperimente mit Perrhenat ( $\text{ReO}_4^-$ ) Inkorporation in Apatite und LDH sollen durchgeführt werden. Perrhenat dient als Homolog für Pertechnetat ( $^{99}\text{TcO}_4^-$ ), eines weiteren der sieben flüchtigen und sehr mobilen langlebigen Spaltprodukte ( $t_{1/2} = 2.1 \cdot 10^5$  years).

Das nächste Projekt Treffen wird in Grenoble vom 27.-28. Februar 2014 abgehalten. Einen Teilnahme an der 17th Radiochemical Conference 11-17th May 2014, Marianske Lazne, Czech Republic ist geplant.

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

Zwei Manuskripte über I Inkorporation in Apatit und in LDH sind z. Z. in Vorbereitung.

<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 Neutronen- streuquerschnitte		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2009 bis 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

Die inzwischen fertiggestellte Streukammer wurde im vergangenen Halbjahr mit Blanktargets am Strahlrohr sowie mit einer  $^{241}\text{Am}$  Alpha-Quelle im Labor getestet, um Messungen mit radioaktiven Ti(T) Targets zu weit wie möglich zu simulieren. Diese zeitaufwändigen Tests vor der Inbetriebnahme waren notwendig, da aus Strahlenschutzgründen nach Einbau des Ti(T) Targets keine Veränderungen mehr möglich sein werden. Bei den Tests am Strahlrohr zeigte sich, dass die notwendige genaue Zentrierung des Deuteriumstrahls eine Modifikation des Montageflansches und der Dichtungen nötig machte. Diese Probleme wurden inzwischen gelöst.

Die Messungen mit der  $^{241}\text{Am}$  Alpha-Quelle ergaben anfangs eine Ereignisrate, die deutlich von der aus der spezifizierten Aktivität errechneten Rate abwich. Zunächst gelang es nicht, auch mit vielen, wegen der begrenzten Aktivität der offenen Quelle sehr langwierigen Messungen eine Ursache zu finden. Eine erneute mechanische Vermessung mit einer Koordinatenmessmaschine zeigte dann aber, dass offensichtlich bei der Fertigung der letzten Blende vor dem Halbleiterdetektor der letzte Feinbearbeitungsschritt nicht durchgeführt worden war. Die genaue Kenntnis der Position und des Durchmessers dieser Blende ist entscheidend für die erreichbare Messunsicherheit. Der Hauptwerkstatt der PTB ist es dann glücklicherweise gelungen, den fehlenden Bearbeitungsschritt auch an der bereits fertiggestellten Kammer nachzuholen. Die Messergebnisse zeigen jetzt, dass die aus den mechanischen Abmessungen der Kammer und der  $^{241}\text{Am}$  Aktivität berechnete Alphasrate mit den Messungen im Rahmen der Unsicherheiten übereinstimmt. Die Unsicherheiten werden dabei von der relativen Unsicherheit der  $^{241}\text{Am}$  Aktivität von etwa 2 % ( $k = 1$ ) bestimmt.

Auch die Impulshöhenverteilung der Alphaereignisse ist mit den Eigenschaften der verwendeten Quellen konsistent. Damit bestätigt sich, dass die Streuung von Alphateilchen an den Streukammerwänden durch das Blendensystem ausreichend unterdrückt wird. Zurzeit werden noch Messungen mit einer zweiten, älteren  $^{241}\text{Am}$  Quelle durchgeführt. Für diese Quelle liegt zwar kein offizieller Kalibrierschein vor; ihre Aktivität wurde allerdings noch mit einem inzwischen wegen des Personalabbaus stillgelegten  $2\pi\text{-}\alpha\gamma$  Messplatz bestimmt, mit dem Alpha-Aktivitätsmessungen mit einer relativen Unsicherheit von weniger als 1 % durchgeführt werden konnten. Mit diesen Messungen wäre dann eine Rückführung der Fluenz von mit Beschleunigern erzeugten Neutronen auf die Aktivitätseinheit möglich, wie das für Radionuklid-Neutronenquellen mit der Mangan-Bad Methode durchgeführt wird.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die erste Strahlzeit mit Ti(T) Target wird in der zweiten Februarwoche stattfinden. Nach der Überprüfung der Stabilität des Targets soll die Ortsverteilung der mit den Alphateilchen zeitkorrelierten Neutronen vermessen und mit den mit MCNP/MCUNED berechneten Verteilungen verglichen werden. Damit wäre der Aufbau des Experiments abgeschlossen.

Im zweiten Quartal 2014 sollen die am Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf aufgebauten Spaltionskammern mit den an Universität Mainz hergestellten  $^{235}\text{U}$  und  $^{242}\text{Pu}$  Schichten in Neutronenreferenzfeldern der PTB kalibriert werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Der Beitrag zu den NEUDOS12 Proceedings wurde für die Veröffentlichung in „Radiation Protection Dosimetry“ akzeptiert.



## **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> 01.07.2013 bis 30.09.2013
<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“:

Dieses Projekt wurde im Rahmen der Förderung abgeschlossen und bereits im ersten Halbjahr veröffentlicht (Tobias et al., PLoS One 2013).

AP2: „Reparaturwege und DNA Prozessierung“:

Bezüglich der kernweiten Phosphorylierung von H2AX wurde für AG1522 Zellen die in Munoz et al., Nucl. Ac. Res. 2013 beschriebene Methode etabliert, um nach Dephosphorylierung von  $\gamma$ H2AX mittels Phosphatasebehandlung eine erneute Phosphorylierung durch Zugabe von exogener DNA-PK zu untersuchen. In Zellen die 24 h nach 10 Gy Röntgenbestrahlung fixiert und so behandelt wurden, führte DNA-PK zu einer erneuten Ausbildung der  $\gamma$ H2AX-Foci an DSB und einem schwachen  $\gamma$ H2AX Hintergrundsignal. Allerdings war die De- und Rephosphorylierung in Zellen, welche nach 1 h (im Maximum des Ionen-induzierten Kernweiten  $\gamma$ H2AX) fixiert wurden, nicht effektiv.

Des Weiteren sollte untersucht werden, ob nach DSB-Induktion durch schwere Ionen in G1 der PARP1-Resektions-abhängige alternative Reparaturweg beschritten wird. Dazu wurden DSB ( $\gamma$ H2AX) Reparaturkinetiken nach Bestrahlung von humanen Fibroblasten mit dicht ionisierenden Ca-Ionen mit und ohne PARP-1-Inhibitor ausgewertet. Die Inhibition von PARPP-1 führte sowohl in G1- wie in G2-Zellen nach 4 und 10 h zu einer verminderten Reparatur von DSB, die in G1 Zellen nach 10 h besonders ausgeprägt war. Dies weist darauf hin, dass der alternative PARP1-abhängige Reparaturweg bei der Reparatur von komplexen DNA-Schäden eine wichtige Rolle spielt, obgleich der klassische NHEJ-Reparaturweg in diesen Zellen verfügbar ist. Daraus folgern wir zudem, dass die Reparatur komplexer Ionen-induzierter Schäden, wenn sie stattfinden kann, größtenteils langsam und inkorrekt verläuft. Für weitere Untersuchungen zur Unterscheidung dieser Reparaturwege wurde (in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner der TUD) die Herunterregulierung von Ligase I und Ligase III etabliert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Forschungsvorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen, der entsprechende Abschlussbericht wird erstellt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Beiträge zu Tagungen:

N. Averbek et al. (Poster): The complexity of DNA double strand breaks determines DNA break processing and the choice of DNA repair pathways, Jahrestagung Gesellschaft f. Biologische Strahlenforschung, Darmstadt, 25 – 27 September 2013

Veröffentlichungen:

I. Müller et al.: Species conserved DNA damage response at the inactive human X chromosome, Mutat Res. 2013 Aug 30;756(1-2):30-6.

B. Meyer et al.: Clustered DNA damage induces pan-nuclear H2AX phosphorylation mediated by ATM and DNA-PK, Nucleic Acids Res. 2013 Jul;41(12):6109-18.

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Endverknüpfungen (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, LigIII Knockouts in DT40 Zellen zu produzieren. Da es sich schnell gezeigt hat, dass LigIII essentiell für die Zelle ist, wurde der Weg des konditionellen Knockouts mit folgenden Aufgaben eingeschlagen:

- AP2.1: 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.
- AP2.2: 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-Feld 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.
- AP2.3: 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.
- AP2.4: 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

- AP2.1: In Vorexperimenten wurde der knock down von XRCC1 mittels siRNA durchgeführt. Bisher waren die Ergebnisse des knock down nicht zufriedenstellend, so dass die verwendeten Bedingungen noch Optimierungsbedarf haben um aussagekräftige Experimente durchführen zu können.
- AP2.2: In ersten Überlebensexperimenten der neu hergestellten LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1 Mutante zeigte sich, dass diese Mutante etwas strahlenresistenter als die LIG3<sup>-/-</sup>2loxPLIG4<sup>-/-</sup> bzw. LIG1<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup> Zellen sind. Die Experimente mittels Koloniebildungstest wurden für alle relevanten Mutanten in Triplets wiederholt, um die notwendige statistische Signifikanz der Ergebnisse zu erhalten. Bei den Wiederholungsexperimenten bestätigten sich die bisher erlangten Ergebnisse.
- AP2.3: In ersten Experimenten mit dem neuen Antikörper, der zum Nachweis der entstandenen 6-4 Photo-produkte (6-4PP) nach UVC Bestrahlung eingesetzt wird, konnte gezeigt werden, dass dieser nicht wie gewünscht funktioniert. Mit dem 6-4PP Antikörper war es für die verwendeten DT40 Mutanten bisher nicht möglich Dosiseffektkurven herzustellen bzw. zu reproduzieren. Da der Antikörper laut Hersteller nicht für die Verwendung im DT40 System ausgewiesen ist, wurden die Experimente mit LIG1 defizienten humanen und Mauszellen wiederholt. Auch in diesen beiden Systemen konnten bisher keine reproduzierbaren Dosiseffektkurven hergestellt werden.
- AP2.4: 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 mit Röntgenstrahlung eingesetzt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Laufzeit des Vorhabens ist abgelaufen. Deshalb werden nun Experimente abgeschlossen und Publikationen, wo gerechtfertigt, geschrieben.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- Paul, K. Promotion zum Dr. rer. nat.: Function of DNA Ligase II in the Repair of Radiation induced DNA Double Strand Breaks via alternative Pathways of Non-homologous End-Joining functioning as Backup
- Bednar, T. Promotion zum Dr. rer. nat.: Efficient support of DNA replication functions by DNA ligase 3 in vertebrate cells
- Singh SK, Bencsik-Theilen A, Mladenov E, Jakob B, Taucher-Scholz G, Iliakis G: Reduced contribution of thermally labile sugar lesions to DNA double strand break formation after exposure to heavy ions. *Radiat Oncol* 2013, 8:77
- Paul K, Wang M, Mladenov E, Bencsik-Theilen A, Bednar T, Wu W, Arakawa H, Iliakis G: DNA Ligases I and III Cooperate in Alternative Non-Homologous End-Joining in Vertebrates. *PLoS One* 2013, 8: e59505
- Iliakis G, Mladenov E, Magin S, Soni A: DNA Double-Strand Break Repair as determinant of cellular radiosensitivity to killing and target in radiation therapy. *Front Oncol* 2013, 3: Article 113
- Dueva R, Iliakis G: Alternative pathways of non-homologous end joining (NHEJ) in genomic instability and cancer. *Transl Cancer Res* 2013, 2, 163-177
- Schipler A, Iliakis G: DNA double-strand-break complexity levels and their possible contributions to the probability for error-prone processing and repair pathway choice. *Nucleic Acids Res*, in press, doi: 10.1093/nar/gkt556

<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> 01.07.2013 bis 30.09.2013	
<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

Im Laufe des Projekts konnte gezeigt werden, dass nach dicht ionisierender Bestrahlung aufgrund der Komplexität der Brüche nahezu alle Brüche sowohl in G2 als auch in G1 resektiert werden (1) und dass dabei der Nuklease CtIP eine entscheidende Rolle zukommt. So zeigen bspw. CtIP-depletierte Zellen in beiden Zellzyklusphasen einen ausgeprägten Reparaturdefekt. Im weiteren Verlauf wurden die Bedeutung und die Regulation von CtIP bei der Reparatur komplexer Brüche in der G1-Phase genauer untersucht. Interessanterweise führte die Inhibierung von Plk3 zu einem Reparaturdefekt, der vom Ausmaß her dem einer CtIP-Herunterregulation gleichkam, während die Inhibierung von Plk3 in einer CtIP-depletierten Zelllinie zu keiner weiteren Erhöhung des Reparaturdefekts führte. Daraus ergab sich das Bild, dass CtIP in G1 von Plk3 aktiviert wird und dass diese Aktivierung für die Reparatur komplexer Brüche benötigt wird. Diese Ergebnisse wurden in erster Linie anhand immunfluoreszenz-mikroskopischer Methoden gewonnen und konnten im vorherigen Berichtszeitraum durch erste chromosomale Experimente mittels G1-PCC (*premature chromosome condensation*) bestätigt werden. Im aktuellen Berichtszeitraum wurden Folgeexperimente zur Validierung der chromosomalen Analysen durchgeführt, die sich momentan in der Auswertung befinden.

Weitere Experimente beschäftigten sich mit dem Einfluss der Modifikation der Bruchstruktur im Zuge der Reparatur in der G2-Phase auf das zur Aufrechterhaltung des G2-Checkpoints notwendige Signalling. Im Laufe des Projekts konnte gezeigt werden, dass zu späten Zeiten nach Bestrahlung die Mehrheit der bis dahin unrepariert verbliebenen Brüche resektiert ist, wodurch es zu einer Abnahme der Lokalisation der für das Checkpoint-Signalling wichtigen Kinase pATM am Bruch kommt (2). Im aktuellen Berichtszeitraum wurde der Einfluss der Resektion auf die Lokalisation weiterer am Checkpoint-Signalling beteiligter Faktoren am Bruch untersucht. Dabei zeigte sich, dass auch die Lokalisation von 53BP1, welches für die fortdauernde Lokalisation von pATM benötigt wird, im Zuge der Resektion abnimmt. Als Folge konnte auch eine verringerte Histon-Ubiquitylierung, die durch die in der Signalkaskade *downstream* von 53BP1 stehenden Ubiquitin-Ligasen durchgeführt wird, festgestellt werden. Im Gegenzug beeinflusst die Resektion nicht die Lokalisation von MDC1 am Bruch, welches in der Signalkaskade *upstream* von 53BP1 steht. Zusammengefasst ergibt sich daraus das Bild, dass als Folge der Resektion 53BP1 nicht mehr an die Bruchstelle binden kann, wodurch auch pATM nicht mehr am Bruch gehalten wird, was zur Verminderung des G2-Checkpoint-Signallings führt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Projekt wurde zum Ende des Berichtszeitraums abgeschlossen. Die im Rahmen dieses Projekts erlangten Erkenntnisse werden nun durch abschließende Arbeiten ergänzt und für Veröffentlichungen aufgearbeitet. Die aus diesem Projekt erlangten Ergebnisse sollen nun als Grundlage für weitere Studien, wie z. B. die Untersuchung des Zusammenspiels von weiteren, an den Bruch rekrutierten Faktoren sowie von Chromatinmodifikationen, die im Zuge der Reparatur auftreten, dienen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Abschlussbericht Projekt 02S8335, Juli 2012

V. Geuting, C. Reul, M. Löbrich; "ATM release at resected double-strand breaks provides heterochromatin reconstitution to facilitate homologous recombination"; PLoS Genetics 2013;9(8)

<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 31.03.2014		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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 and 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: Wir können jetzt nach vielfacher Bestätigung davon ausgehen, dass UVA Bestrahlung zu Telomerverkürzung führt, während UVA+B Strahlung keinen Effekt auf die Telomerlänge hat. Dies ist allen Befunden nach kein direkter Effekt der UV Strahlung an der DNA. Vielmehr induziert UVA Strahlung in der Zelle reaktive Sauerstoff Radikale (ROS) und über eine hohe Affinität an G-reiche DNA Sequenzen kommt es dann zu Bruchereignissen und zur Telomerverkürzung. Dieser Prozess ist weniger für die Photoalterung von Bedeutung, spielt aber offensichtlich eine wesentliche Rolle in Photocarcinogenese (siehe Leufke et al., Oncogene, 2013 Aug 19. doi: 10.1038/onc.2013.323). Die Apoptose- und Proliferationsstudien, die über 24 h mittels „Timelaps“ Aufnahmen durchgeführt wurden, zeigen eine signifikante Induktion von Apoptose erst bei höheren Dosen (UVA >24 J/cm<sup>2</sup> und UVB >36 mJ/cm<sup>2</sup>). Ein weiterer wichtiger Befund war, dass es durch UVA zu einer Dosis-abhängigen Reduktion der Proliferation kam, während UVA+B offensichtlich keinen größeren Einfluss auf die Proliferation hatte. Trotz dieser Unterschiede kam es sowohl durch UVA als auch durch

- UVA+B zu dysfunktionellen Telomeren („Damage“ Foci am Telomer) und zur Bildung von Mikrokern – also zur Induktion genomischer Instabilität.
- 2.2: Weitere Analysen zu Mechanismus der Rolle von UV-bedingten Telomerverkürzung wurden durchgeführt.
- 2.3: Die Telomerlängenmessungen in den UV-bestrahlten OTKs stehen noch aus.
- 2.4: Um die Konsequenzen der UVA Bestrahlung für die dermalen Fibroblasten zu untersuchen, wurde auch dermale Äquivalente (auf Basis von cell-derived Matrix) für 4 Wochen 3x wöchentlich bestrahlt (UVA: 12 J/cm<sup>2</sup>). Die Auswertung dieses Bestrahlungsexperimentes ergab keine Hinweise für Veränderungen. Dies konnten wir aber schlussendlich auf einen Defekt der UV-Lampe zurückführen. Im Wiederholungsexperiment erwies sich dagegen die Dosis als toxisch. Es waren nach den 4 Wochen nur noch wenige Fibroblasten im dermalen Äquivalent vorhanden. Ein neuer Versuch mit 5 J/cm<sup>2</sup> UVA läuft derzeit.
- 2.5: Das Wiederholungsexperiment: Bestrahlung der OTKs mit IRA in Kooperation mit AG Krutmann (Düsseldorf) konnte aufgrund logistischer Probleme (Verfügbarkeit der Lampe) noch nicht durchgeführt werden. Dafür wurde aber das erste Experiment weiter analysiert.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.1: Es stehen weiter Untersuchungen zum Mechanismus der TA Entstehung und Telomerverkürzung im Vordergrund. Ein wesentlicher Aspekt ist die epigenetische Regulation, die einen ganz neuen Aspekt in die Schadensregulation gebracht hat und nun mit unterschiedlichen Methoden verifiziert und quantifiziert werden muss.
- 2.3: Weitere Auswertungen der Bestrahlungsexperimente (OTK Versuche), speziell auch des Experimentes mit chronischer Bestrahlung und der IRA Bestrahlung:
- frühe und andauernde Schädigung in der Epidermis – Doppelstrangbrüche – dysfunktionelle Telomere, Damage response (p53BP1 Damage Foci), Telomerase Expression – hTERT Färbung
  - frühe und andauernde Schädigung im dermalen Äquivalent (Fibroblastenzahl, Kollagen Degradation (MMP1 Induktion, Gelatinase Assay), aberrante Genexpression.
- 2.4: Weitere Analysen zur chronischen Bestrahlung der dermalen Äquivalente.
- 2.5: Durchführung des Folge IRA Bestrahlungsexperiments unter kontrollierter „Wärmeentwicklung“ zur Klärung, ob es sich bei den ersten Veränderungen um einen „Wärmeartefakt“ oder aber IRA-spezifische Effekte handelt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Leufke C, Stammer H, Leykauf J, Krunic 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*, 2013 Aug 19. doi: 10.1038/onc.2013.323

Einladung zum Vortrag: 8th Worldcongress on Melanoma: Research in epithelial skin cancer: what's new? Hamburg 19.07.2013

KVSF Statustreffen: Vorstellung des Verbundprojekts: UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung (02NUK003, Koordinatorin: Petra Boukamp, DKFZ), Darmstadt 24.9.2013.

Ausrichtung der 43sten Grand Round: Skin Cancer und eigener Vortrag: UV-dependent genomic instability - a hallmark of skin SCC development and progression, DKFZ Heidelberg 19.11.2013.

Einladung zum Vortrag beim Rotary Club Bensheim: Was macht die Sonne mit unserer Haut? „Photoalterung“ und Hautkrebs; Bensheim 5.11.2013

Vorlesung für Heidelberger Lehrer: Was macht die Sonne mit unserer Haut? Die Rolle der Telomere bei Alterung und Hautkrebs, Heidelberg, 6.12.2013

<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 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.08.2013	
<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 Tumor-Suszeptibilität *in vivo* führen kann.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- 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 Stromal 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

- AP2: Die Langzeit-UVA-Bestrahlungsexperimente der Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäuse wurden in Kooperation mit der Universitätshautklinik Budapest fortgesetzt, und die Ergebnisse des ersten Bestrahlungsversuches zu einer gesteigerten Tumorigenese durch Verlust der antioxidativen SOD2-vermittelten Abwehr konnten bestätigt werden.
- AP7: In Kooperation mit AG3 werden SOD2 heterozygot und homozygot defiziente murine Fibroblasten der Kombinationsbestrahlung aus UVA und IRA ausgesetzt. Zellkulturen der verschiedenen Zellstämme wurden nach Düsseldorf transferiert zur Kombinationsbestrahlung nach Expansion der Zellzahlen.
- AP8: Der Langzeit-UVA-Bestrahlungsversuch von Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäusen in Kombination mit ROS-Scavengern (EUK-134) wurde fortgesetzt, um eine mögliche Revertierung der Tumorraten durch antioxidative Maßnahmen zu prüfen. Eine topische Behandlung der Mäuserückenhaut vor der UVA-Bestrahlung erreichte eine deutliche Verminderung der Tumoren nach Langzeit-UVA-Bestrahlung. Dieses Ergebnis weist auf die wesentliche Bedeutung von reaktiven Sauerstoffspezies bei der UVA-induzierten Hauttumorigenese hin und erweitert die bisherigen Erkenntnisse einer tumorigenen Wirkung reaktiver Sauerstoffspezies *in vitro*.
- AP9: Tumorgewebe der Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäuse wurde histologisch untersucht und die Tumorarten bestimmt. Weitere immunhistologische Färbungen zur Analyse verschiedener Signalwege wurden begonnen; wegen technischer Probleme müssen Fixier- und Färbetechniken optimiert werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die Optimierung von Fixier- und Färbetechniken ist zurzeit in Bearbeitung; nach Abschluss können die immunhistologischen Färbungen für Zellzyklus- und andere Markermoleküle fortgeführt werden.
- AP7: Nach Transfer der Zellkulturen werden die Zellen expandiert und die Bedingungen weiter optimiert, da die getestete Dosis der Kombinationsbestrahlung für die SOD2-defizienten Fibroblasten toxisch ist.
- AP8: Die Langzeit-UV-Bestrahlungsversuche mit ROS-Scavengern (EUK-134) werden zurzeit analysiert, und Hautproben sollen mit verschiedenen Antikörpern immunhistologisch analysiert werden, um potentielle UVA-induzierte tumorigene Signalwege zu identifizieren.
- AP10: Epidermis-spezifisch SOD2-defiziente Mäuse werden bei AG3 nach Embryotransfer mit UVA und IRA in Kombination bestrahlt, um mögliche synergistische Effekte *in vivo* untersuchen zu können.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

In Vorbereitung.

<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 31.08.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.08.2013	
<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

AP4:

Analyse der DNS Methylierung in Zellen mit unterschiedlichen Bestrahlungen.

Ergebnisse:

Yang et al. konnten zeigen, dass sich über die Bestimmung der Methylierung repetitiver Sequenzen wie LINE-1 und ALU die globale Methylierung gut abschätzen lässt. Für die aktuellen Untersuchungen wurde die Methode für ein qPCR Protokoll angepasst, da die beschriebenen Methoden entweder nicht zur Verfügung (Pyrosequencing) standen oder sich als sehr aufwendig und gleichzeitig wenig quantitativ (COBRA) herausstellten. Dabei zeigte sich in den chronisch UVA bestrahlten KH-Zellen nach 5, nach 15 und auch nach 25 Wochen ein minimaler Anstieg der LINE-1 Methylierung im Vergleich zu der unbestrahlten Kontrolle, während bei den ALU Elementen kein Unterschied zur Kontrolle festgestellt werden konnte. Neben der globalen Methylierung wurde auch die Methylierung der Methyltransferase MGMT, die des ARF Tumor Suppressors und des Cell Adhesion Glycoproteins (Tumorsuppressorgen) CDH1 untersucht. Dabei konnten jedoch keine Unterschiede zur unbestrahlten Kontrolle festgestellt werden.

AP5:

Auswertung der IRA-Bestrahlungsexperimente. Auswertung der Expression ausgewählter Gene und epigenetischer Veränderungen in chronisch UVA-bestrahlten Zellen. Vergleichende Analyse hautkrebsrelevanter Gene in den Proben mit unterschiedlichen Hauttumorstadien um evtl. stadienspezifische Signaturen zu identifizieren.

Ergebnisse:

Eine Nachbestrahlung mit IRA (2000 kJ/m<sup>2</sup>) unmittelbar nach einer UVA- oder UVB-Bestrahlung (UVA: 600 kJ/m<sup>2</sup> oder UVB: 300 J/m<sup>2</sup>) beeinflusst die Reparatur-Kinetik in HaCaT Zellen, wie es bei der IRA-Vorbestrahlung war, ebenfalls nicht. Unabhängig von der Vorbestrahlung wurde ein  $\tau$ -Wert von ~40h bzw. ~20h für UVA- bzw. UVB-Reparatur-Kinetik erhalten. In den primären humanen Keratinozyten wurde für die UVB-Schäden ebenfalls eine unveränderte Reparatur-Kinetik im Vergleich zur Kontrolle ohne IRA-Vorbestrahlung ( $\tau$ -Wert = ~12 h) mit IRA-Vorbestrahlung festgestellt. Die Expressionsveränderung der Gene: p16<sup>INK4a</sup>, p14<sup>ARF</sup>, p21<sup>CIP1</sup>, KLF4, HIC1 und DNMT1 in den chronisch mit UVA-bestrahlten KH8.2.00 Zellen (200 oder 400 kJ/m<sup>2</sup> UVA; 1mal pro Woche für 25 Wochen) wurde untersucht. Es konnte Veränderung der Expression nur bei HIC1 und p16<sup>INK4a</sup> (2-fach Reduzierung, nur bei 200 kJ/m<sup>2</sup>) festgestellt werden. Anschließend wurden die epigenetischen Histon-Modifikationen im Promoter der Gene p16<sup>INK4a</sup>, HIC1 und p21<sup>CIP1</sup> in den für 25 Wochen mit UVA bestrahlten KH8.2.00 Zellen untersucht. Übereinstimmend konnte eine Reduzierung der permissiven Markierung (H3K4me3) um 55 % bei p16<sup>INK4a</sup> detektiert werden (bei 200 kJ/m<sup>2</sup>). Gleichzeitig spiegelte auch eine Erhöhung der repressiven Markierung (H3K27me3) um 75 % die reduzierte HIC1 Genexpression (25 Wochen 200 kJ/m<sup>2</sup> UVA) wider. Interessanterweise konnte, obwohl die Transkription nicht verändert war, eine deutliche Erhöhung ( $\geq 100$  %) der Heterochromatin Markierung H3K9me3 und der repressiven Markierung H3K27me3 bei p21<sup>CIP1</sup> gemessen werden (400 kJ/m<sup>2</sup> UVA). Untersuchungen in Gewebeproben des Stachelzellkarzinoms (SCC) und gesunder Haut zeigen bei hautkrebsrelevanten Genen eine Änderung der Expression. Die Expression des Transkriptionsfaktors KLF4 und des Transmembran Proteins NOTCH1 sind im SCC im Vergleich zu gesunder Haut durchschnittlich um den Faktor ~5 runterreguliert. Wohingegen sich bei CDH1 eine Erhöhung der Expression in SCC Gewebe im Vergleich zu gesunder Haut andeutet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Projekt ist abgeschlossen.

### 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 31.05.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 angelagert und hierüber eine Schädigung der target-Sequenz induziert werden und inwieweit führt die Schä-

digung 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 resistentesten 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. In Vorbereitung der Versuche wurden vor allem die Analyseverfahren evaluiert bzw. weiter entwickelt. So konnte für die Genexpression nach Bestrahlung gezeigt werden, dass durch Analyse mit mehreren Methoden die Robustheit der Daten deutlich gesteigert werden kann, was jetzt in einer Publikation veröffentlicht wurde (Reuther et al., *Radiat Environ Biophys* 2013). Die Analyse der Assoziation von SNPs mit klinischen und biologischen Endpunkten wurde außerdem durch die von Zhang et al. (*Gen Epidem* 35:679-685, 2011) erstellte Methode erweitert, die eine individuelle Wichtung der einzelnen SNPs erlaubt.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- 2.1: Ein Probanden-Pool für die Untersuchungen zur in vivo Anwendbarkeit der bereits in vitro identifizierten Gensignaturen für die Biodosimetrie im Niedrig- und Hochdosisbereich wurde etabliert.
- 2.2: Analyse der im Projekt erhobenen Genexpressionsdaten bezüglich Kandidatengenen, die eine belastbare Diskriminierung von Strahlenqualitäten erlauben. Es konnten 5 bzw. 7 Gene identifiziert werden, die die Diskriminierung einer Bestrahlung mit Alpha-Partikeln, Auger-Elektronen und Gammastrahlung 6 h bzw. 24 h nach Strahlenexposition erlaubt.
- 2.3: Vergleichende Untersuchungen bezüglich der Induktion von DNA Doppelstrangbrüchen (DSB) durch P-32-markierte versus I-125-markierte TFO zeigten, dass das Potential von P-32 markierte TFO für die Induktion eines DSB pro Zerfall deutlich geringer ausgeprägt ist, als bei I-125-markierte TFO. FISH-Analysen zeigten, dass I-125 markierte TFO, die gegen einen spezifischen Genbereich des BCL-2 Gen gerichtet sind, mit hoher Frequenz Translokationen induzieren.
- 2.4: Analysen und Evaluierung der Genexpressionsdaten von 94 DNA-Reparaturgenen mittels dreier unabhängiger Methoden zeigten, dass nur für GADD45 und PCNA eine konsistente, signifikante Expressionsänderung nachweisbar war (Reuther et al. 2013).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.2: Analyse der Genexpressionsdaten bezüglich Identifizierung und Validierung von weiteren Kandidatengenen und Gensignaturen, die die Diskriminierung von Strahlenqualitäten erlauben. Analyse der beteiligten Signalwege und biologischen Prozesse.
- 2.3: Abschließende Untersuchungen zur I-125-TFO induzierten Translokation spezifischer Genabschnitte im BCL-2 Gen mittels Fluoreszenz-In-Situ-Hybridisierung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Reuther S, Reiter M, Raabe A, Dikomey E.: Effect of irradiation on the expression of DNA repair genes studied in human fibroblasts by real-time qPCR using three methods of reference gene validation. *Radiat Environ Biophys*. 2013 Nov;52(4):463-9

Dahmen V.: I-125-labeled Triplex-Forming-oligonucleotides: Studies on intracellular distribution, cytotoxicity and on gene expression alterations of target genes, Dissertationsschrift Universität Duisburg-Essen (2013)

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Duisburg-Essen, Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen		<b>Förderkennzeichen:</b> 02 NUK 005C
<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Nucleosidanalogue 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 Ausbildung strahleninduzierter, nuklearer Protein-Foci wurde mit Hilfe konfokaler Mikroskopie untersucht. Es wurden Serum-deprivierte, embryonale Fibroblasten der Maus verwendet, die eine homozygote Deletion des Ligase4 Gens tragen (MEF Lig4<sup>-/-</sup>). Diese Zellen können unter diesen Bedingungen normalerweise nahezu keine Dop-

pelstrangbruch(DSB)-Reparatur betreiben. Wir betrachteten die Induktion und den Abbau folgender Protein-Foci:  $\gamma$ H2AX, pATM (S1981) sowie 53BP1. Wir fanden, dass diese Protein-Foci in Serum deprivierten MEF Lig4<sup>-/-</sup> Zellen bis zu 24 h nahezu unverändert persistierten. Bei Behandlung mit ara-A waren 53BP1 und pATM Foci nach 24 h jedoch vollständig verschwunden. Dies deutet stark auf eine Verbesserung der Reparatur hin. Die Färbung von  $\gamma$ H2AX hingegen weitete sich zu einem starken, den ganzen Nukleus ausfüllenden Signal. Dies war nicht begleitet von DNA Fragmentierung oder sonstigen Anzeichen von Apoptose.

**Ziel 2:** Um die anhand von Life Cell Imaging ermittelten Ergebnisse für simple und komplexe DSBs mit einer weiteren Methode zu validieren, wurden Foci Kinetiken für MDC1 und 53BP1 mittels Immunfärbung in I-SceI transfizierten CHO-1xISceI-7D2, CHO-2xISceI-11R13 und CHO-4xISceI-11R3-Zellen ermittelt. Die Ergebnisse stimmen mit dem Life Cell Imaging Daten überein, da die theoretisch maximale Anzahl an MDC1-Foci in allen Zelllinien gebildet wird. Weiterhin wurden  $\gamma$ -H2AX Foci analysiert, die an einem frühen Zeitpunkt in der Signalkaskade aktiviert werden. Die Anzahl der  $\gamma$ -H2AX Foci stimmen mit der Anzahl an MDC1 Foci in allen Zelllinien überein. 53BP1-Foci hingegen aber weisen nur in Zellen mit geclusterten Brüchen (CHO-4xISceI-11R3) die maximale Anzahl auf. Diese Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass das 53BP1 Signalling für I-SceI induzierte geclusterte Brüche im Vergleich zu simplen DSBs unterschiedlich abläuft.

Des Weiteren wurden cytogenetische Untersuchungen mit dem PARP Inhibitor durchgeführt, wobei beobachtet wurde, dass die Anzahl der Exchanges für geclusterte Brüche nach der Zugabe von PARP um ca. 50 % reduziert wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass B-NHEJ an der Reparatur von geclusterten Brüchen beteiligt ist.

**Ziel 3:** Zu den bisher untersuchten drei humanen Hautfibroblasten von Patienten mit Kopf-Hals Tumoren wurden zwei weitere hinzugefügt, und die Schadensantwort bezüglich der  $\gamma$ H2AX Focibildung nach Bestrahlung in Abhängigkeit von ATM und Proliferationsaktivität untersucht. Hierzu wurden die Fibroblasten 1 h vor Bestrahlung mit ATM Inhibitoren (ATMi) behandelt. Die Focibildung wurde nach 1 h (initial) und 24 h (residual) bestimmt. ATMi führte in allen Fällen zu einer Reduktion der initialen und Erhöhung der residualen Focibildung. ATMi führte zu einer deutlichen Reduktion der initialen Focibildung, wobei dieser Effekt in seneszenten im Vergleich zu proliferationsaktiveren Fibroblasten deutlicher ausgeprägt war. Zusätzlich wurde der Effekt der fraktionierten Bestrahlung gemessen.

**Ziel 4:** In früheren Experimenten hatten wir mittels ChIP Analysen herausgefunden, dass der initiale Anteil von  $\gamma$ H2AX auf Chromatinfragmenten, die vermehrt den Euchromatinmarker H3K4me3 tragen, um etwa 40 % höher ist ( $p < 0.01$ ), als auf Fragmenten, die vornehmlich den Heterochromatinmarker H3K9me3 tragen. Die Analysen mit weiteren Heterochromatinmarker (H3K27me3) und Euchromatinmarker (H3K9me1) zeigten, dass dieser Unterschied sich nicht unbedingt allgemein auf alle Marker übertragen lässt. Mikroskopische Analysen der Focibildung in Abhängigkeit von der Chromatinstruktur in derselben Gliomlinie, bestätigten eine geringere Präferenz für die Focibildung in DAPI dichten Regionen, die gleichzeitig mit dem Heterochromatinmarker H3K9me3 angereichert sind. Der Anteil residualer  $\gamma$ H2AX war in heterochromatischen Regionen tendenziell höher aber statistisch nicht signifikant.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

**Ziel 1:** Die DSB-Reparatur wird in Serum deprivierten MEF Lig4<sup>-/-</sup> mit Hilfe fluoreszenzmikroskopischer Methoden untersucht werden. Dabei wird vor allem auch ein Augenmerk auf Marker der DSB-Endresektion (z. B. RPA) gelegt werden. Die Ursachen für die kernweite Phosphorylierung von H2AX werden untersucht.

**Ziel 2:** Ligation Mediated PCR soll in I-SceI transfizierten CHO-4xISceI-11R3-Zellen abschließend durchgeführt werden, um die DSB Induktion nachzuweisen. Weiterhin sollen die optimierten Live Cell Imaging Experimente in der Zelllinie A549 durchgeführt werden, um die in CHO ermittelten Unterschiede in der Reparatur von simplen und komplexen Brüchen auch in humanen Zellen nachzuweisen. Publikationen sind in Vorbereitung.

**Ziel 3:** Wir sind dabei, die Reparaturdaten von Gliomen und Fibroblasten nach fraktionierter Bestrahlung für eine Publikation zusammen zu stellen (in Vorbereitung).

**Ziel 4:** Sowohl der Einfluss des Chromatins auf die Induktion und Reparatur von strahleninduzierten  $\gamma$ H2AX Foci (wird in Kürze eingereicht), als auch der Einfluss der Trithorax und Polycombproteine ASH2L bzw. EZH2 auf die Strahlensensitivität von Gliomlinien (in Vorbereitung) wird für eine Publikation eingereicht.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Singh SK, Bencsik-Theilen A, Mladenov E, Jakob B, Taucher-Scholz G, Iliakis G: Reduced contribution of thermally labile sugar lesions to DNA double strand break formation after exposure to heavy ions. *Radiat Oncol* 2013, 8:77

Paul K, Wang M, Mladenov E, Bencsik-Theilen A, Bednar T, Wu W, Arakawa H, Iliakis G: DNA Ligases I and III Cooperate in Alternative Non-Homologous End-Joining in Vertebrates. *PLoS One* 2013, 8: e59505

Iliakis G, Mladenov E, Magin S, Soni A: DNA Double-Strand Break Repair as determinant of cellular radiosensitivity to killing and target in radiation therapy. *Front Oncol* 2013, 3: Article 113

Dueva R, Iliakis G: Alternative pathways of non-homologous end joining (NHEJ) in genomic instability and cancer. *Transl Cancer Res* 2013, 2, 163-177

Schipler A, Iliakis G: DNA double-strand-break complexity levels and their possible contributions to the probability for error-prone processing and repair pathway choice. *Nucleic Acids Res*, in press, doi: 10.1093/nar/gkt556

<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> 01.07.2013 bis 31.10.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 326.176,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. 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:

- Datenbasierte Herleitung eines genregulatorischen Netzwerkes:  
Für die Herleitung eines genregulatorischen Netzwerkes auf der Grundlage von Microarray-Genexpressionsdaten wurde die Netzwerktopologie des korrelationsbasierten Netzwerkes analysiert. Der Schwellenwert, anhand dessen die Kanten des Netzwerkes ausgewählt werden, wurde so gewählt, dass das vorhergesagte Netzwerk annähernd einer scale-free Topologie entspricht.
- Funktionale Analyse:  
In dem hergeleiteten Netzwerk wurden Module (Teilgraphen, deren Gene ähnliche Expressionsmuster aufweisen) identifiziert. Dies wurde mit der DynamicTreeCut Funktion des WGCNA Pakets für R realisiert. Für jedes Modul wurde ein „Eigen-Gen“, ein hypothetisches Gen, welches das jeweilige Modul repräsentiert, berechnet. Die Berechnung der Eigen-Gene erlaubte es uns, Module zu identifizieren, die mit der untersuchten Strahlungs-dosis signifikant assoziiert sind. Diese Module wurden dann einer Gene-Set Enrichment Analyse unterzogen.
- Validierung der Vorhersageergebnisse:  
Zur Validierung unserer Netzwerkherleitung und Analyse wurden frei zugängliche Genexpressionsdaten ähnlicher Studien verwendet. Anhand dieser Daten konnte überprüft werden, ob die zuvor identifizierten Netzwerkmodule, die mit der Strahlungs-dosis assoziiert sind, stabil sind (d. h. auch in anderen Genexpressionsdaten identifizierbar sind). Darüber hinaus erfolgte ein Literatur- und Datenbankabgleich der vorhergesagten Interaktionen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Laufzeit des Projektes endete am 31.10.2013.

### 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 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 31.03.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Implementierung der entwickelten Methode „STEP“ zur Personalisierung von Wirkungsgraden für in vivo Messsysteme in Bezug auf anthropometrische Parameter wurde abgeschlossen. Die Implementierung besteht aus einem Datenmodell „V2M Schema“ zur Modellierung von generischen Strahlentransportszenarien, einem Softwarewerkzeug „Voxel2MCNP“ zur Durchführung von Kalibrierung und Anthropometrie an Voxelphantomen, und einem Softwarewerkzeug zur Auswahl von Teilmengen anthropometrischer Parameter und Durchführung der Regressionsanalyse.
- Die entwickelte Methode wurde am Beispiel des am KIT vorhandenen Teilkörperzählers eingesetzt. Dazu wurden 30 Computerphantome der XCAT-Serie mit Hilfe von Strahlentransportsimulationen in zwei Messanordnungen (Lunge-Leber-Knie und Kopf) simuliert und die Wirkungsgrade für 26 verschiedene Photonenenergien bestimmt. Dabei haben sich im Mittel die größten Variationen in den Wirkungsgraden bei direkter Messung von Radionuklidquellen in Lunge und Leber ergeben, gefolgt vom Skelett mit Messungen an Knie und Kopf.
- Zusätzlich wurden 18 anthropometrische Parameter (vorwiegend Körperumfänge) an allen Computerphantomen berechnet. Aus diesen Beispieldaten wurden anschließend mit Hilfe der Regressionsanalyse Teilmengen anthropometrischer Parameter mit hoher Performanz zur Vorhersage von Wirkungsgraden selektiert und entsprechende Schätzer generiert. Dabei hat sich gezeigt, dass Körperumfänge in der Nähe der Radionuklidquelle im Körper (d. h. Brustumfang für die Lunge, Hüftumfang für die Leber, Oberschenkelumfang für das Knie, und Kopfumfang für den Kopf) die höchste Performanz unter den betrachteten anthropometrischen Parametern besitzen. Parameter, die sich auf den ganzen Körper beziehen (z. B. Verhältnisse von Körpergewicht und -größe), sind im Vergleich weniger geeignet.
- Insgesamt hat sich gezeigt, dass die entwickelte Methodik eine sehr gute Grundlage zur Durchführung von generischen Sensitivitätsanalysen im Strahlenschutz bietet. Die Anwendung im Bereich von in vivo Messsystemen hat beispielhaft eine effiziente und robuste Möglichkeit zur Quantifizierung und Reduktion von Unsicherheiten in Bezug auf interindividuelle anatomische Variationen aufgezeigt. Sie ist der aktuell im Routinebetrieb eingesetzten Personalisierungsmethode überlegen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Die Vorhersagegenauigkeit der bestimmten Schätzer soll durch Hinzunahme von weiteren Phantomen der XCAT-Serie erhöht werden und dementsprechend auch realistischere Einschätzungen über die Güte der Schätzer geben.
- Über das Projekt hinaus wird die Berechnung von Dosiskonversionsfaktoren bei der Exposition von Personen mit internen und externen Strahlenquellen angestrebt. Dazu soll dieselbe Methodik mit Hilfe der XCAT-Serie angewandt werden, um Unsicherheiten zu quantifizieren und durch Hinzunahme von anthropometrischen Parametern zu reduzieren.
- Weiterhin soll die Software „Voxel2MCNP“ erweitert werden, um Dosisberechnungen basierend auf Aktivitätsdepositionen im Körper zu erlauben. Dabei spielt die Verknüpfung von anatomischen und biokinetischen Kompartimentmodellen eine große Herausforderung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		<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 31.08.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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: Probandenspezifische 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: Das Location Factor Konzept wurde anhand von Kontaminierungsmessungen in der Fukushima Präfektur nach dem Nuklearunfall im März 2011 getestet. Dazu wurden Satelliten- aufnahmen um 90 Messstellen und Dosisraten über 5µGy/h mit digitaler Bildauswertung

- tung analysiert. Die resultierenden Anteile verschiedener Landnutzungsformen wurden anschließend mit vorher ermittelten Gewichtungsfaktoren verrechnet und mit den aus Cs-134 Aktivitäten, Cs-137 Aktivitäten und Dosisraten ermittelten Location Factors verglichen.
- AP1.3: Schnee sowie Gesamt- und partikelgrößenfraktionierte Aerosole wurden ereignisbezogen auf der Zugspitze beprobt und  $\gamma$ -spektrometrisch die Radionuklidaktivitäten bestimmt. Daraus wurden Auswaschkoeffizienten für charakterisierte Niederschlagsereignisse berechnet. Für das 2D-Video-Distrometer ist die Programmierung von Algorithmen zur Datenaufzeichnung und –auswertung abgeschlossen. Die Programme werden zur Charakterisierung und Klassifizierung der Niederschlagsereignisse angewendet.
- AP2.3: Die Planung für das Arbeitspaket wurde beendet.
- AP3.1: Die in vitro-Löslichkeitsstudien mit Heilerde sind abgeschlossen; die mit  $^{238}\text{U}$ -kontaminierte Erde bzw.  $^{238}\text{U}$ -haltigem Phosphatdünger sind weiter in Bearbeitung. Die intestinale Aufnahme (fA-Werte) von Uran aus Heilerde ist ermittelt worden. Das Partnerlabor VKTA Rossendorf wurde im August 2013 erneut besucht (ICP-MS Messung).
- AP3.3: Mit GEANT4 und einem Voxel-Schädel-Phantom, das auf Computertomographie-Bildern einer realen Person basiert („Max06“), wurden die Auswirkungen von kritischen Körperparametern wie zum Beispiel Schädelgröße, Kopfhautdicke und der Zeit zwischen Inkorporation und Messung auf die Nachweiswahrscheinlichkeit des HMGU Teilkörperzähler untersucht, und Korrekturfaktoren für jeden Parameter berechnet. Die entwickelten Korrekturverfahren wurden auf kürzlich aufgetretenen  $^{241}\text{Am}$ -Inkorporationsfällen angewandt.
- AP3.4: In Kooperation mit AP4.1 und AP4.2 wurden die Ausscheidung von Blei-210 im Urin und die Anreicherung im Körpergewebe, insbesondere im Skelett, nach Ingestion und Inhalation von Blei-210 und Radongas modelliert. Die modellierten Ergebnisse sind als Referenzwerte für die Vorbereitung der Messungen in AP4.1 und AP4.2 erforderlich.
- AP4.1: Die analytischen Methoden für Po-210 und Th-228 mit radioaktiven Trägern und Alpha-Spektrometrie wurden optimiert. Mit den neu entwickelten Methoden wurden höhere chemische Ausbeuten erreicht. Die Ergebnisse für die Ra-226, Pb-210 und Ra-228 in Lebensmitteln mit Gamma-Spektrometrie sind weiter vorangekommen. Ingestions- und Inhalationsdosis der Reinigungsarbeiter werden zusammen mit den Ergebnissen von VKTA Rossendorf (Stuhl und Urin) berechnet.
- AP4.2: Es wurden vier neue Radon/Thoron Exposimeter mit größerem Gehäuse und verbesserter Energieauflösung hergestellt und für Radon kalibriert. Der neue Kalibrierfaktor für diese Geometrie ist  $13.0 \text{ Bq/m}^3/\text{cts/h}$ . Des Weiteren wurde eine Monte-Carlo-Simulation auf Basis des Geant4-Transportcodes entwickelt, mit der es möglich ist, in Abhängigkeit von Messgeometrie und Umweltparameter (Luftdruck, Luftfeuchte, Temperatur) das von dem entwickelten Gerät gemessene Radon oder Thoron Spektrum zu berechnen.
- AP4.3: Der Einfluss mineralogischer Eigenschaften auf die Exhalation von Thoron wird derzeit in einer Bachelorarbeit bestimmt. Ergebnisse von Expositionsmessungen in Wohnhäusern wurden in einer internationalen Konferenz vorgestellt und zur Veröffentlichung eingereicht. Eine intensive Messkampagne in einem weiteren Haus wurde durchgeführt. Das für diese Übersichtsmessungen entwickelte Messgerät wird auf seine Konformität mit EU-Verordnungen hin geprüft, um es in Serie verwenden zu können.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeitspakete (bis auf AP2.3) werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans weiter abgearbeitet.

#### 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> 01.07.2013 bis 31.08.2013	
<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 Isotoptoxizität
- Molekularbiologische Antwort des Pilzes auf Stressoren

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Analysen der Pflanzen- und Bodenproben wurde abgeschlossen und die Muster in der SM/RN-Aufnahme bestimmt. Der Biokonzentrationsfaktor zeigt eine Anreicherung von Uran in den oberirdischen Pflanzenkompartimenten. Die Mesokosmen zur Untersuchung der Wirkung von Bakterien- und Ectomycorrhizapilzinzokulation auf die Aufnahme von Schwermetallen und Radioisotopen wurden weitergeführt und beprobt sowie Einlagerung von SM/RN in Pilzfruchtkörpern gemessen. In einer Abschlussarbeit wurden detaillierte Charakterisierungen der unterschiedlichen Einlagerung in verschiedenen Geweben von Fruchtkörpern durchgeführt, die Rückschlüsse auf Mechanismen der Einlagerung erlauben. In Guttationstropfen wurden nur untergeordneten Men-

gen an SM/R gemessen. Die Transkriptomdaten zum Vergleich stabiler und radioaktiver Isotopen ergab eine sehr geringe Menge von Genen, die nur in den Radioisotopen-Proben reguliert waren. Die entsprechenden Gene wurden durch qRT-PCR verifiziert. Damit ist die Modellierung des Transfers in Pflanzen und Pilzen möglich. Alle geplanten Arbeiten konnten somit abgeschlossen werden.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten konnten wie gewohnt abgeschlossen werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Schütze E, Weist A, Klose M, Wach T, Schumann M, Nietzsche S, Merten D, Baumert J, Majzlan J, Kothe E. 2013. Taking nature in to lab: Biomineralization by heavy metal resistant streptomycetes in soil. *Biogeosciences*, in press.

Sprocati AR, Alisi C, Tasso F, Fiore A, Marconi P, Langella F, Haferburg G, Nicoara A, Neagoe A, Kothe E (2013) Bioprospecting at former mining sites across Europe: microbial and functional diversity in soils. *Environ Sci Pollut Res*: DOI 10.1007/s11356-013-1907-3

Cao J, Kürsten D, Krause K, Kothe E, Martin K, Roth M, Köhler JM. (2013) Application of micro-segmented flow for two-dimensional characterization of the combinatorial effect of zinc and copper ions on metal-tolerant *Streptomyces* strains. *Appl Microbiol Biotechnol*. 97:8923-8930.

Langella F, Grawunder A, Stark R, Weist A, Merten D, Haferburg G, Büchel G, Kothe E. (2014) Microbially assisted phytoremediation approaches for two multi-element contaminated sites. *Environ Sci Pollut Res Int.*, in press

Pérez Rodríguez N, Langella F, Rodushkin I, Engström E, Kothe E, Alakangas L, Ohlander B. (2014) The role of bacterial consortium and organic amendment in Cu and Fe isotope fractionation in plants on a polluted mine site. *Environ Sci Pollut Res Int.*, in press.

Wirth S (2013) Studien zum MATE-Transporter Mte1 aus dem Mykorrhizapilz *Tricholoma vaccinum*. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Ursel H (2013) Elementmobilisation through Basidiomycetes out of iron rich minerals. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Kalbhenn B (2013) Phytoremediation eines schwermetallbelasteten Bodens mittels verschiedener Kulturpflanzen unter Einfluss von Co-Kulturen. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Spranger A (2013) Einfluss vom Streptomyceten auf das Wachstum von *Pisolithus tinctorius* unter Schwermetallstress. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Sehrt T (2013) Guttationstropfen bei Basidiomyceten. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Purz M (2013) Studien zum ABC-Transporter *brf1* von *Tricholoma vaccinum*. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Schindler F (2013) Vertikale Verlagerungsprozesse innerhalb des Testfelds „Gessenwiese“ im ehemaligen Uranabbaugebiet Ronneburg/ Thüringen. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Schmidt A (2013) Schwermetallresistenz bei Streptomyceten aus einem ehemaligen Uranabbaugebiet. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

<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 31.03.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 der Bodenproben wurde im Juli 2013 abgeschlossen. Auf insgesamt 29 Flächen wurden aus jeweils 5 Tiefen Proben entnommen.
- AP5: Die Proben wurden nach den bestehenden Verfahren für die Analysen vorbereitet. Dieser Vorgang wurde im Dezember abgeschlossen.
- AP6: Die letzten ICP-MS Messungen wurden im Dezember durchgeführt. Es wurden insgesamt 163 Bodenproben, 149 Filterproben, 437 Wasserproben und 16 Schneeproben gemessen. Die letzten Messungen an der AMS werden im Februar 2014 durchgeführt.

Es wurden bisher 118 Bodenproben, 146 Filterproben, 429 Wasserproben und 10 Schneeproben gemessen.

AP7: Die in den Niederschlägen bestimmten mittleren jährlichen Depositionsraten für den Sammelzeitraum liegen für  $^{129}\text{I}$  zwischen 1,32 und 0,07 ng/m<sup>2</sup>. Der höchste Wert wurde im Norden auf Norderney gefunden, der niedrigste im Süden in Nürnberg. Weiterhin sind die Werte im Westen höher (Essen 0,54 ng/m<sup>2</sup>) als im Osten (Görlitz 0,12 ng/m<sup>2</sup>). Daraus ergibt sich ein Gefälle Norden nach Süden bzw. von Westen nach Osten.

Die im Januar, bzw. August – Oktober 2013 gewonnenen Schneeproben von der Zugspitze weisen für die  $^{129}\text{I}$ -Gehalte bei moderaten Unterschieden in der  $^{127}\text{I}$ -Konzentrationen (0,34 – 1,28 ng/g) eine recht hohe Schwankungsbreite auf. Sie liegen zwischen 20,0 bis 592,8 fg/kg. Die resultierenden Isotopenverhältnisse  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  variieren von  $26,3 \times 10^{-9}$  bis  $16,9 \times 10^{-7}$ .

Bei den Bodenproben wurde weiterhin das meiste  $^{129}\text{I}$  in den oberen 10 cm gefunden. Die gefundenen Depositionsdichten liegen zwischen 134 mBq/m<sup>2</sup> und 441 mBq/m<sup>2</sup>. Sie ordnen sich gut den bereits gefundenen Werten ein. Die Annahme eines Gefälles von Norden nach Süden bzw. Westen nach Osten konnte bestätigt werden.

Auch bei den Flusswasserproben konnten die bisherigen Ergebnisse bestätigt werden. Die insgesamt höchsten Durchschnittsgehalte an  $^{129}\text{I}$  finden sich im Norden (81,3 fg/kg pro Monat; Geesthacht/Elbe) und Westen (67,0 fg/kg pro Monat; Geeste/Ems). Im Süden (10,0 fg/kg pro Monat; Regensburg/Donau) und Osten (21,6 fg/kg pro Monat; Dresden/Elbe) sind die Werte deutlich niedriger.

Die Ergebnisse der Aerosolfilterproben zeigten weiterhin die höchsten Werte im Norden Deutschlands. In Braunschweig (PTB) wurden durchschnittlich 0,3 fg/m<sup>3</sup> pro Monat gemessen, in Offenbach (DWD) 0,18 fg/m<sup>3</sup>, in Potsdam (DWD) 0,25 fg/m<sup>3</sup> und auf dem Schauinsland (BfS) der niedrigste Wert mit 0,09 fg/m<sup>3</sup>.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Die Untersuchung der bodenkundlichen Parameter (pH, Corg, Gehalt an Fe-, Al-, Mn-oxiden, Korngrößenanalyse) für die Bodenproben wird fertig gestellt.
- Die Messungen an der AMS und die Auswertungen werden vervollständigt.
- Durchführung letzter Nachmessungen, soweit erforderlich.
- Zusammenführung aller Daten.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

1 Poster beim GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, 1.-4. Sep. 2013, Darmstadt

<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 31.08.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 140.493,20 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hofmann	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Verbundprojekt “Strahlung und Umwelt: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen” ist in vier Projekte unterteilt. Das Projekt 2 konzentriert sich auf “Prozesse an den Schnittstellen Pflanzen-Mikroben und den Transport von RN in Pflanzen und in die Nahrungskette”. Das Projekt ist in vier Arbeitspakete unterteilt. Work Package 2.1 bearbeitet den “Einfluss von Biofilmen auf das Migrationsverhalten von Uran und Americium in der Umwelt” und der Fokus des Arbeitspaketes 2.2 sind “Mikrobielle Prozesse der Mobilisierung und Immobilisierung (von Schwermetallen) im Boden.” Arbeitspaket 2.3 befasst sich mit den “Mechanismen der Blattaufnahme von Radionukliden in Pflanzengewebe”.

Das Arbeitspaket 2.4 wird im Institut Agrosphäre (IBG-3), Forschungszentrums Jülich, bearbeitet und befasst sich mit der “Verfügbarkeit von Radionukliden in Böden – Effekte von Bodenmanagement und Klimawandel”. Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit Fragen der nachhaltigen Nutzung der Böden für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Hier besteht der Bedarf einer Nutzung verbesserter Boden-Management-Systeme.

Im Projekt wird das Verhalten der Radionuklide (RN Cs-137 und Sr-90) in Bodensystemen desselben Typs mit unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung untersucht. Eine Minimierung der Bodenbearbeitung wird dazu beitragen, dass Bodenverlust durch Erosion reduziert wird. Eine solche Bodenbearbeitung in Kombination mit der Anwendung von Biochar oder Gärrückständen 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 Feuchtwchsel werden die natürlichen Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe verändern und sich so in noch unbekannter Weise auf die Mobilisierung von Radionukliden in der Bodenmatrix auswirken mit zu erwartenden Effekten auf den Transfer in die Kulturpflanze. 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

Summer wheat was harvested in Sep, 2013; plants were cut at an approximate height of 2-3 cm to avoid the contamination from high activity soil. To probe the translocation of activity within the plant parts (seeds and stem), stalk was separated from stem. Further, the pest plants were also separated



from the wheat plants to know the variation in uptake with respect to the plant type. All plants parts and soils were dried at 105 °C for 24 h for transfer factor (TF) calculation on dry basis. The seeds were separated by rubbing the dried stalk in hands and the residue was added to the stem part. Stem and pest plants were first cut into smaller parts (with scissor) and then thrashed to get a uniform mixture. From the mix of stem, pest as well as seeds, one sample for each part of lysimeter was analyzed for activity in department S (Sicherheit und Strahlenschutz, Forschungszentrum Juelich). Soil samples were taken to a depth of 15 cm using Pürckhauer. 11 samples were taken from each lysimeter part; each sample was divided into 3 parts (0-5, 5-10, 10-15 cm). One sample from a mix of 11 samples (for each lysimeter part) was analyzed, resulting in 3 samples per lysimeter part. Activity analysis for plants and soil samples is complete for Cs-137; for Sr-90, final results are awaited from S.

Initial activity results indicate that digestate application led to a detectable difference in soil-plant transfer of the two radionuclides, effect was more pronounced for Cs-137. Plant uptake varies with the type of plant as higher uptake (up to a factor of 4) was recorded in pest plants compared to the wheat. Lower activity values were observed in ears/seeds compared to stem indicating the translocation of activity within the plant. The activity results for soils indicate that most of applied activity remained in the top 5 cm soil. Also, no activity has been traced in the percolate samples (suction cups) even at the 40 cm depth, also an indication of low vertical mobility of both radionuclides.

The sorption experiments of cesium and strontium at room temperature are near completion. The available results show that effect of organic amendment on sorption dynamics is negligible compared to the soil origin. Cesium exhibited a higher adsorption in silty soil followed by forest soil and lowest for sandy soil. In contrast, strontium showed a lower adsorption for all three soils, with a slightly higher adsorption in silty soil and almost similar both for forest and sandy soils. The desorption results (24 h shaking) demonstrate that almost 1/3 of the adsorbed cesium was extractable in silty soil, whereas about half of that was extractable both for forest and sandy soils. While for strontium, almost half of adsorbed strontium was extractable for all the three soils. The effect of organic amendments was identical to sorption, negligible compared to the soil origin.

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

- Sorption/desorption experiments with soils amended with biochar and digestate at different temperatures ( -5 °C and 35 °C) to simulate changing environmental conditions.
- Sowing of next seasonal crop (summer barley/ summer oat) in Feb/March, 2014; a continuation of transfer factors (TFs) determination for different crops.
- Harvesting of crops and radioactivity measurement in plants and soil to calculate the transfer factors (TFs).
- Activity check of soil samples collected at different depths (10, 20, 30 cm) to account for the vertical mobility.

#### **Ongoing**

- Recording of environmental parameters data (temperature, water content) for lysimeter soils through installed sensors (Temperature, TDRs, Tensiometers).
- Collection and activity check for leachate from suction cups and leachate vessels (installed to lysimeters) - to probe the vertical mobility of applied radiotracers in lysimeter soil.
- Bromide tracer tracking with suction cups and leachate sampling.

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

Soil-plant transfer of Cs-137 and Sr-90 in digestate amended agricultural soils- a lysimeter scale experiment, Geophysical Research Abstracts, 16 (2014) 871, (not peer-reviewed paper).

Cesium and strontium sorption behavior in amended agricultural soils, Geophysical Research Abstracts, 16 (2014) 875, (not peer-reviewed paper).

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Biofilmprouben.
- 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

Das Spektrum des durch Laser-Anregung hervorgerufene Fluoreszenzsignals vieler Schwermetallionen, und die Lebenszeit dieses Fluoreszenzsignales sind ein Schlüssel zur Bindungsform (Speziation) dieser Ionen, und das schon bei sehr niedrigen Konzentrationen, welche bei radioaktiven Elementen bereits umweltrelevant sind. In biologischer Matrix wird jedoch bei kontinuierlicher Laseranregung neben der Fluoreszenz der Metallionen auch die intensivere, aber kurzlebige Fluoreszenz organischer Stoffe (wie z. B. von Chlorophyll) ständig mit angeregt, die dann die interessierende Fluoreszenz der Schwermetallionen überdeckt, und deren Interpretation verhindert. Darum wurde im Rahmen dieses Projektes ein Laser-Fluoreszenz-Messsystem entwickelt, das in der Lage ist, die interessierende Fluoreszenz radioaktiver Schwermetalle von der störenden Fluoreszenz organischer Stoffe über deren verschiedene Fluoreszenzle-

benszeit abzutrennen. Hierfür ist eine in zeitlich passenden Intervallen gepulste Laseranregung Voraussetzung. Um diese zu ermöglichen, wurde der 80-MHz-Laserstrahl eines Mai Tai Lasers alternierend in der Frequenz von 100 kHz für je 2  $\mu$ s zur Probe hin gebeugt, indem der Strahl durch einen mit dieser Frequenz schubweise über ein Piezoelement in Schwingung versetzten TeO<sub>2</sub>-Kristall geleitet wird. Der Anregungslaserstrahl kann mittels nachgeschalteter optischer Aufbauten in seiner Frequenz derart variiert werden, dass die so gepulste Anregung in einem Wellenlängenbereich von 230-1020 nm (abzüglich einer Lücke bei 340-345nm) realisiert werden kann. Die Fluoreszenzphotonen werden mit einer Single Photon Avalanche Diode (SPAD) registriert und verstärkt, und mit einem Multi-channel Picosecond Event Timer (HydraHarp) zeitlich bezüglich der Anregung in ein Histogramm geordnet, aus dem das zeitliche Abklingen der Fluoreszenz berechnet wird (Time-Correlated Single Photon Counting). So konnte z. B. die Fluoreszenzlebenszeit von Uranylspezies, die an den Protozoen *Euglena mutabilis* hafteten, ermittelt und dazu von organischer Fluoreszenz abgetrennt werden: Die so von der Fluoreszenz der Uranylspezies ermittelte Lebenszeit von >10  $\mu$ s spricht für phosphatgebundenes Uranyl. Auch Indizien für das Auftreten von U(VI) Spezies in Grubenwasser neben fluoreszierendem biologischem Material konnten so über die Lebenszeiten mit SPAD und HydraHarp gefunden werden.

Als Beitrag zur Charakterisierung der mikrobiellen Diversität (siehe Bericht Januar und Juli 2013) in der ehemaligen Uranmine Königstein, sowie zur Gewinnung von autochthonen Isolaten für Untersuchungen zur Interaktion der Zellen mit Uran, wurden Eisen- und Schwefel oxidierende Bakterien, heterotrophe Mikroorganismen, Uran- und Mangan tolerante Mikroorganismen, sowie Sulfat reduzierende Bakterien aus den Grubenwasserproben kultiviert. Das Königstein Grubenwasser enthält eine Gesamt-Zellzahl, das bedeutet lebende und tote Zellen, von  $1,5 \cdot 10^6$  Zellen/ml. Unter aeroben Bedingungen wurde eine Lebendzellzahl von bis zu  $4,8 \cdot 10^2$  KbE/ml und unter anaeroben Bedingungen bis zu  $3,3 \cdot 10^3$  KbE/ml ermittelt. Um das vorhandene Potential der Uranmobilisierung von Eisen- und Schwefel oxidierenden Mikroorganismen im Grubenwasser der ehemaligen Uranmine Königstein abschätzen zu können, wurde eine quantitative Analyse der metabolisch aktiven Mikroorganismen durchgeführt. Dabei konnte mithilfe von MPN-Versuchen für die Eisenoxidierer eine „wahrscheinliche Zellzahl“ im Bereich  $8 \cdot 10^3$ - $25 \cdot 10^3$  MPN/ml ermittelt werden. Die „wahrscheinliche Zellzahl“ der Schwefeloxidierer fiel mit  $2 \cdot 10^3$ - $6 \cdot 10^3$  MPN/ml geringer aus. Zur Identifizierung der metabolisch aktiven Mikroorganismen im Grubenwasser Königstein wurden diese auf selektiven Festmedien kultiviert. Die Zusammensetzungen der Nährmedien für die Kultivierung orientierten sich an den chemischen Parametern des Grubenwassers. Dieses ist neben dem Vorhandensein von Uran durch eine hohe Eisen- und Sulfatkonzentration, sowie durch einen pH-Wert von < 3 gekennzeichnet. Ein bei der Kultivierung dominierendes Isolat wurde durch die Amplifizierung und Sequenzierung eines Fragments der 16S rDNA als Thiomonas-verwandtes Isolat identifiziert. Auch auf uran- und manganhaltigen Nährmedien wurden Thiomonas-Arten dominierend kultiviert. Weitere Schwefeloxidierer, wie z. B. *Thiomonas arsenivorans*, *Thiomonas cuprina*, *Acidithiobacillus thiooxidans* und *Sulfobacillus* sp. wurden kultiviert. Sequenzen dieser Gattungen waren auch bei der kultivierungsunabhängigen Analyse durch die Pyrosequenzierung dominant. Ein weiteres Isolat, welches den Eisenoxidierern zuzuordnen ist, war *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Mit den *Acidocella*- und *Acidiphilium* verwandten Isolaten wurden bei der Kultivierung auf selektiven Festmedien für Eisen- und Schwefeloxidierer auch gleichzeitig obligat heterotrophe Mikroorganismen isoliert, die befähigt sind Eisen(III)-Verbindungen zu reduzieren. Mit dem Vollmedium PCA konnten Kolonien isoliert werden, die Verwandtschaften zu *Methylobacterium*-Arten hatten. Diese, zu den methylotrophen Bakterien gehörenden Arten, sind in der Lage Methanol- oder Methan-Verbindungen zu verstoffwechseln. In dieser Arbeit wurden zwei eukaryotische Mikroorganismen isoliert: *Rhodospiridium toruloides* und *Exophilia* sp. Die Hefe *Rhodospiridium toruloides* wies unter allen Isolaten die größte Urantoleranz von bis zu 6mM auf. Der Nachweis (mittels ICP-MS) von Uran im Zellysate dieser Hefe deutet auf eine intrazelluläre Aufnahme des Schwermetalls hin.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden im Rahmen des Nachfolgeprojektes „TransAqua“ Arbeitspaket 4.3: Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen unter Tage lebenden Mikroorganismen mit Uran und deren Einfluss auf das Migrationsverhalten von Uran in gefluteten Urangruben in ähnlicher Weise fortgeführt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Baumann N, Arnold T, Haferburg G: Uranium contents in plants and mushrooms grown on a uranium contaminated site near Ronneburg in Eastern Thuringia/Germany. *Environ Sci Pollut Res*, Online First 29.06.2013, DOI 10.1007/s11356-013-1913-5

<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 31.08.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 ausgeweitete Literaturrecherche zur  $^{226}\text{Ra}$ -Analytik zeigte weiterhin eine Möglichkeit zur Verbesserung der Radiumabtrennung und -aufreinigung unter Verwendung von Milchsäure.
- AP3: Die Anwendung von Milchsäure bei der Kationenaustauschchromatographie zur Aufreinigung von Radium wurde an einfach zusammengesetzten Testlösungen durchgeführt. In der verbleibenden Projektlaufzeit erfolgt die Validierung speziell an realen Probenmaterialien komplexerer Zusammensetzung.  
Untersuchungen für eine alternative Anreicherungsmethode mit  $\text{TiOCl}_2$  speziell für Ra wurden an realen getracerten Urinproben durchgeführt.
- AP6: Die Analyse der Ausscheidungsproben der Arbeiter ist bis auf wenige Wiederholungsanalysen abgeschlossen und die Daten wurden zusammengestellt.  
Die Analyse der Ausscheidungsproben der Probandenstudie der Referenzgruppe nicht strahlenexponierter Personen läuft. Zum Zeitpunkt dieses Berichtes sind über die Hälfte der Analysen der Proben abgeschlossen, d. h. von 371 zu bestimmenden Werten wurden aktuell bereits 194 Proben analysiert. Die gammaspektrometrische Bestimmung zur Analyse von  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$  in den Stuhlproben wurde dabei bereits abgeschlossen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Literaturrecherche wird fortgesetzt und daraus erhaltene Erkenntnisse werden zur Interpretation der verfügbaren Analysendaten genutzt.
- AP3: Die Methodenoptimierung zur Bestimmung von  $^{226}\text{Ra}$  aus Calciumreichen Proben wird weitergeführt. Hierbei soll die Fällungsreaktion mit  $\text{TiOCl}_2$  auch für  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  und  $^{228}\text{Th}$  getestet werden. Weiterhin soll der positive Einfluss von Milchsäure bzw. Ammoniumlactat auf die Abtrennung von Ra bei der Kationenaustauschchromatographie an geeigneten Proben- bzw. Referenzmaterialien getestet und validiert werden.
- AP5: Zur besseren Interpretation und zum Vergleich mit den Werten der Analysen der Ausscheidungsproben der Arbeiter werden in einer weiteren Kampagne Stuhl- und Urin-Proben dieser Personen gesammelt um als „Null“- bzw. „Normal“-Werte zu dienen.
- AP6: Die Analyse der Urin- und Stuhlproben der Probanden der Referenzgruppe auf  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Th}$  und  $^{226}\text{Ra}$  sowie qualitätssichernde Wiederholungsanalysen für die Probandengruppe der Arbeiter werden weitergeführt und abgeschlossen (ca. 177 ausstehende Analysen und ca. 20 QS-Analysen).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<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 30.06.2014	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

- Im Sommer 2013 fand eine Messkampagne im städtischen Abwasser-Kanalnetz statt. Es wurde an 3 Orten in der Kanalisation zwischen dem Haushalt eines aus der Radioiodtherapie entlassenen Patienten und der Kläranlage, sowie am Einlauf der Kläranlage, über einen Zeitraum von 7 Tagen Abwasserproben genommen. Automatische, in die Kanalschächte eingehängte Probennehmer lieferten Mischproben mit einer Zeitauflösung von 6 Stunden. Insgesamt wurden ca. 80 Wasserproben genommen und gamma-spektroskopisch untersucht.  
Diese Zeitreihen zeigen eindeutig die höchste Iod-131- Konzentration im Abwasser des dem Haushalt am nächsten gelegenen Schachtes und abfallende Konzentrationen in Richtung der Kläranlage und scheinen in Hinblick auf Verdünnung und Transportzeiten des Wassers plausibel.
- Die Messergebnisse wurden mit dem städtischen Kanalnetzbetreiber diskutiert und die zur Modellierung nötigen Daten des Netzes der Universität Bremen zur Verfügung gestellt.  
Die Kanalnetzdaten wurden in die Kanalberechnungssoftware Kanal++ importiert um im nächsten Schritt den Transport des Iod-131 zu simulieren.
- Die im letzten Berichtszeitraum entwickelten Methoden zur Extraktion von anorganischen und organischen Iod-131 in Oberflächenwasser (auf Basis der „Messanleitung für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“ des BMU) wurden weiter untersucht und neue Methoden getestet.  
Einzelne Schritte der Verfahren wurden dabei variiert und zum Beispiel verschiedene, von Projektpartnern des IRS aus Hannover zur Verfügung gestellte Bentonite als Flockungsmittel getestet.
- Insgesamt wurden bisher 10 mögliche Varianten untersucht, die Auswertung der chemischen Ausbeuten dauert noch an.
- Bei einem Treffen mit Projektpartnern des Helmholtzzentrums München in Bremen wurden die Erfahrungen bezüglich der Modellierung mit Kanal++ ausgetauscht und mögliche Kooperationen für das 2013 gestartete BMBF-Verbundprojekt TransAqua diskutiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Für das in Kanal++ importierte Teilnetz der Bremer Kanalisation wird eine geeignete Iod-131-Schmutzfracht definiert, um den Eintrag eines entlassenen Patienten zu simulieren. Die Iod-131-Konzentrationen in den Kanalschächten sollen analog zu den Probenentnahmeorten berechnet werden.
- Die chemischen Ausbeuten der Iod- Extraktionsverfahren werden abschließend ausgewertet und eine Methode für Messkampagnen von Oberflächenwasser der Weser ausgewählt.
- Der Abschlussbericht wird bis zum Projektende Juli 2014 verfasst und eingereicht.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Es wurde ein Tagungsbeitrag mit dem Thema “An experiment to use medical I-131 as tracer in a city sewer system” für die ICRER 2014 in Barcelona eingereicht.

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 dieser Untersuchung wurde hauptsächlich die resistente Glioblastom-Zelllinie LN-229 verwendet. Mit mehreren Methoden wurden die diversen Überlebens- und Todesstrategien, die durch Bestrahlung aktiviert werden, Zeit- und Dosis-abhängig untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass die Glioblastomzelllinie LN-229 eine erhöhte Resistenz gegenüber Bestrahlung zeigt. Der Grund für die Späte Induktion von Apoptose/Nekrose nach Bestrahlung ist zu einem die Aktivierung von Autophagie. Ein anderer Grund für die späte Induktion von Zelltod ist die Reparatur von DNA-Doppelstrangbrüchen.
- TP2: Der gamma-H2AX sowie „dicentric“ Assay wurde erfolgreich für Analysen genomischer Strahlenschäden in peripheren Lymphozyten von insgesamt 101 radiotherapeutisch teil- oder ganzkörperbestrahlten Krebspatienten angewendet. Mittels der gamma-H2AX Quantifizierung konnten unmittelbar nach Teilkörperexpositionen auf Basis in-vitro generierter Kalibrierungskurven äquivalente Ganzkörperdosen erfolgreich rekonstruiert werden. Nach Ganzkörperexpositionen war dies noch bis zu 9 h nach der Exposition möglich. Die Quantifizierung chromosomaler Aberrationen nach Teilkörperexpositionen führte zu deutlichen Überschätzungen der äquivalente Ganzkörperdosen, erlaubte jedoch eine erfolgreiche Bestimmung der applizierten Teilkörperdosen sowie der äquivalenten Ganzkörperdosen nach Ganzkörperexpositionen.
- TP3: Es wurden an 40 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. Weiterhin wurden die Immunfluoreszenzfärbungen gegen glykolytische Marker (MCT-1, MCT-4, GLUT-1; GLUT-3) an den Biopsien durchgeführt.
- TP5: In unterschiedlichen in vitro Assays (Zellvitalität und Clonogenic Assay) wurde eine höhere Strahlensensitivität der transfizierten humanen Krebszelllinien, die den dominant negative IGF1-Rezeptor überexprimieren i. V. zu den nicht transfizierten Zelllinien, nachgewiesen werden. Nach Strahlenexposition (6Gy) wurde eine Reduktion der Koloniebildung der transfizierten Zelllinien von 63,6 % für Caco2 Zellen und eine Reduktion von 40 % bei Panc1 Zellen gemessen.
- TP6: Die Datenerhebung aus dem RIS wurde in allen Kliniken abgeschlossen. Eine Klinik stellte die Daten erst nach Oktober bereit und wurde nicht mehr eingeschlossen. Für alle Kollektive wurde der Abgleich mit dem Kinderkrebsregister abgeschlossen. Die Auswertung wird aktuell ausgeführt.
- TP7: Die Kontrollen der molekular-epidemiologischen Fall-Kontroll-Studie KIKME in der Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz wurden rekrutiert. Die ausgefüllten Fragebögen und die aus Hautbiopsien kultivierten Zelllinien von 15 Kontroll-Probanden ohne Krebserkrankung liegen vor und wurden mehrfach pseudonymisiert. Der Antrag bei der Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie (GPOH) wurde eingereicht.
- TP8: Kooperationstreffen des Verbundes fanden im Juli und Dezember 2013 statt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- TP1: Endauswertung und Publikationen.
- TP2: Endauswertung und Publikationen.
- TP3: An den derzeit zur Verfügung stehenden 40 Glioblastomen und 57 Rektaltumoren werden die imBI-Messungen durch noch ausstehende Messungen ergänzt. Die Ergebnisse werden mit Patientendaten abgeglichen, die zurzeit von den kooperierenden Abteilungen generiert werden. Darüber hinaus wird mit Hilfe der Immunfluoreszenz das Expressionsniveau von Monocarboxylattransportern (MCT-1 und MCT-4) Glukosetransportern (GLUT-1 und GLUT-3) sowie weiterer Marker an den noch fehlenden Biopsien analysiert.
- TP5: Die Strahlensensitivität der transfizierten Zelllinien soll im tumortragenden Nacktmausmodell beurteilt werden. Dazu werden IGF1-Rezeptor positive als auch dominant negative IGF1-Rezeptor-Tumore nach Strahlenexposition hinsichtlich ihrer Wachstumsrate klassifiziert.
- TP6: Abschluss der Auswertungen. Verfassen des Abschlussberichts für TP6. Publikation der Ergebnisse.
- TP7: Rekrutierung von Fällen und weiteren Kontrollen, Beenden der Pilotstudie KIKME, Publizieren der Ergebnisse und Schreiben des Abschlussberichtes für TP7.
- TP8: Schreiben und Zusammenstellen des Abschlussberichtes.

### 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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Computertomographie 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

Die im Berichtshalbjahr durchgeführten Arbeiten stellen im Wesentlichen eine Fortführung und Vertiefung der bisher geleisteten Arbeiten dar. Insbesondere wurden eingereichte wissenschaftliche Publikationen revidiert sowie weitere Publikationen vorbereitet.

Folgende Publikationen befinden sich derzeit in Bearbeitung bzw. unter Begutachtung:

- Conversion factors for determining organ doses received by children in single slice computed tomography with narrow collimation
- Organ doses received by paediatric patients in high-resolution single slice computed tomography with narrow collimation
- Radiation exposure of children during topograms in paediatric chest computed tomography (CT). Part I: Topogram and scan lengths
- Radiation exposure of children during topograms in paediatric chest computed tomography (CT). Part II: Organ dose calculations
- Kumulative Strahlenexposition von Kindern in der konventionellen radiologischen Diagnostik und in der Computertomographie

Zur Dosisrekonstruktion im Rahmen des Gesamtprojektes wurde die Entwicklung des Dosisrekonstruktionsverfahrens weitestgehend beendet. Aufgrund des Großteils dosimetrisch sehr heterogenen Informationsgehaltes der bundesweit erhobenen Datensätze zur CT-Exposition wurden - wie teilweise bereits im vorhergehenden Bericht ausgeführt - folgende Maßnahmen getroffen:

- Definition von Standard-Scanlängen u. a. anhand einer Analyse der im DvHK durchgeführten CT-Untersuchungen für die CT-Untersuchungen des Schädels, der Halswirbelsäule, des Thorax, der Brustwirbelsäule, des Abdomens, des Oberbauchs, der Lendenwirbelsäule und des Beckens
- Aufbau einer CT-Scanner-Datenbank zur Erfassung der Standard-Expositionsparameter der CT-Scanner diverser Hersteller
- Berechnung geräte- und untersuchungsspezifischer CT-Konversionsfaktoren anhand der im Rahmen des Projektes durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen unter Berücksichtigung der Standard-Scanlängen, der Datenbasis der CT-Expositionsparameter sowie unter Zugrundelegung einer Standard-Formfilterung
- Weiterentwicklung des auf dem Konversionsfaktoren-Konzept basierenden Dosisrekonstruktionsverfahrens zur automatischen Ermittlung von rund 40 Organ- und Effektivdosen aus den vom IMBEI Mainz zur Verfügung gestellten Permos-Datensätzen
- Anwendung des Dosisrekonstruktionsverfahrens auf bisher rund 95.000 CT-Untersuchungen mit einer Rechenleistung von derzeit etwa 25.000 Fällen pro Stunde, wobei in etwa 90 % der Fälle eine Dosisrekonstruktion möglich war

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

Folgende weitere Publikationen sind geplant:

- Cumulative radiation exposure in paediatric radiology: A survey of organ doses achieved in 350.000 children during a 35 year period
- Radiation exposure of the mammarian glands in children: Volume and tissue density of the mammarian gland as a function of age
- Radiation exposure of the lungs in children: Volume, tissue density and ventilation of the lungs as a function of age

Verfeinerung des Dosisrekonstruktionsalgorithmus, soweit erforderlich

Anwendung des Dosisrekonstruktionsverfahrens auf den Gesamtdatenbestand des IMBEI Mainz

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

Keine.

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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**

- Abschluss PACS-Erhebung am Standort Hannover (Januar 2013)
  - Abschluss der RIS-Erhebung am Standort Bremen Ende Juni 2013, nach erheblichen Verzögerungen und mangelhafter Kooperationsbereitschaft
  - Aufbereitung der bereits erhobenen Klinikdaten seit Anfang 2013 und abschließender Übermittlung zwischen März und Juni 2013 an das Gesamtstudienzentrum Mainz
  - Der Beitrag des Studienzentrums Nord an der Gesamtkohorte beträgt nach Abschluss aller Erhebungen 18.247 Patienten aus dem RIS und 1.511 Untersuchungen aus den PACS-Systemen
  - Teilauswertung der Kohorte mit Blick auf den Einfluss des sozioökonomischen Status (SES) auf die CT-Häufigkeit als Maß der Exposition
- Erstellung von SAS-Programmen:
- Aufbereitung und Zusammenführen des German Index of Multiple Deprivation (GIMD) mit den Kohortendaten
  - Deskriptive Auswertungen
  - Abstimmungen der Auswertestrategie

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Finale Abstimmung der Auswertestrategie mit der Gesamtstudienleitung
- Fortführung der statistischen Auswertungen
- Einreichung Abstract für Konferenzen: Frühjahr 2014

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

Manuskript in Vorbereitung.

<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 31.12.2013	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

*AP1 (TP4):* Nach Abschluss der experimentellen Arbeiten zur G2-Checkpoint-Sensitivität erfolgte innerhalb des aktuellen Berichtszeitraumes die statistische Analyse der Rohdaten in Zusammenarbeit mit dem IMBEI (Mainz). Die Resultate zeigten, dass die von uns etablierte Methode grundsätzlich statistisch belastbare Ergebnisse liefert, jedoch konnte kein signifikanter Unterschied im G2-Checkpointverhalten zwischen der Gruppe der Ein-Tumor-Patienten und der Gruppe der Patienten mit sekundärer Neoplasie nachgewiesen werden. Eine Auswertung der Daten der jeweils gegeneinander gematchten Patienten-Paare steht noch aus.

Des Weiteren wurde die Ermittlung der  $\gamma$ H2AX-Focizahlen abgeschlossen und dem IMBEI (Mainz) zur statistischen Auswertung übermittelt. Die Ergebnisse der  $\gamma$ H2AX-Foci-Zählung zeigten zwischen den einzelnen Zelllinien innerhalb der G1-Phase grundsätzlich nur sehr geringe Schwankungen hinsichtlich der individuellen Focizahlen, während in der G2-Phase die  $\gamma$ H2AX-Werte deutlicher variierten. Inwieweit auch hier statistisch signifikante Unterschiede vorliegen, und ob eine mögliche Korrelation des individuellen Checkpointverhaltens mit den jeweils korrespondierenden  $\gamma$ H2AX-Foci-Daten vorliegt, wird in Kooperation mit dem IMBEI ermittelt.

*AP2 (TP7):* Im aktuellen Berichtszeitraum wurden die in digitaler Form archivierten und aufbereiteten Rohdaten zur Messung des DSB-Schadensniveaus nach niedrigen Dosen ionisierender Strahlung mit dem Fokusdetektionsprogramm vollständig ausgewertet. Diese Auswertung umfasste alle verfügbaren Zelllinien der GenKIK-Studie und Zelllinien mit bekannter genetischer Prädisposition aufgrund eines heterozygoten Defekts in Brca1 oder Brca2. Parallel dazu wurden Parameter zur Interpretation der erhaltenen Daten final definiert und angewendet. Die Auswertung der DSB-Reparaturkapazität in der G1- und G2-Phase nach einer hohen Dosis IR wurde in den verfügbaren Zelllinien ebenfalls erfolgreich beendet. Somit konnte der experimentelle Teil des Teilprojekts abgeschlossen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Projekt wurde zum Ende des Berichtszeitraums abgeschlossen. Durch abschließende Arbeiten sollen nun die im Rahmen dieses Projekts erlangten Ergebnisse ergänzt und zur Veröffentlichungen aufgearbeitet werden.

*Arbeitspaket 1 (TP4):* An der Universitätsmedizin Mainz wurden von insgesamt zwölf gesunden Probanden (Probanden der KIKME-Studie) Hautstanzen entnommen, vor Ort in Kultur genommen und stehen zur Abholung bereit. Innerhalb der nächsten Wochen soll deren Transfer nach Darmstadt und deren Vervielfältigung und Kryokonservierung erfolgen, damit eine ausreichende Menge an Zellmaterial für nachfolgende Experimente zur Verfügung steht.

Die statistische Analyse der Rohdaten sowohl aus den Checkpoint- als auch den DSB-Reparatur-Experimenten wird weiter fortgesetzt und sollte im Laufe der nächsten Wochen abgeschlossen werden. Abschließend sollen die der Daten zur Publikation aufgearbeitet werden.

*Arbeitspaket 2 (TP7):* Die finale Auswertung wird in den nächsten Wochen im engen Austausch zwischen dem Standort Darmstadt (AG Löbrich) und dem Standort Mainz (IMBEI) stattfinden. Die experimentell gewonnenen Datensätze werden in einem ersten Schritt aufbereitet und ergänzt. Unter Berücksichtigung von epidemiologischen Parametern und unter Verwendung geeigneter statistischer Modelle, sollen sie in einem zweiten Schritt final ausgewertet und interpretiert werden. Parallel wird die Veröffentlichung der Ergebnisse vorbereitet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Jahrestagung der Gesellschaft für Biologische Strahlenforschung (GBS), 24.9-27.9.2013, Darmstadt.

Posterbeitrag, Titel: "Inter-individual variation in the sensitivity of cell cycle control and DSB repair"

Autoren: Ratna N. Weimer<sup>1</sup>, Dorothee Deckbar<sup>1</sup>, Steffen Naumann<sup>1</sup>, Manuela Marron<sup>2</sup>, Claudia Spix<sup>2</sup>, Danuta Galetzka<sup>3</sup>, Maria Blettner<sup>2</sup>, Markus Löbrich<sup>1</sup> / <sup>1</sup>Radiation Biology and DNA Repair, TU Darmstadt, Germany / <sup>2</sup>Institute of Medical Biostatistics, Epidemiology and Informatics (IMBEI), University Mainz, Germany / <sup>3</sup>Institute of Human Genetics, University Mainz, Germany

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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: Der Betrieb der Radonexpositions-kammer konnte fortgesetzt werden. Es wurden einige Zellkulturexperimente sowie ein erstes Tierexperiment erfolgreich durchgeführt. Die Messung der Radon-Zerfallsprodukte mittels Gammaskopie konnte etabliert werden.



- AP3: Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildete die Analyse von Chromosomenschäden in peripheren Lymphozyten und Knochenmarkszellen von transgenen arthritischen Mäusen und Wildtyp-Mäusen, die von der Gruppe Gaipf (AP9) zur Verfügung gestellt wurden. Erste Ergebnisse (Giemsa-Analyse) weisen darauf hin, dass arthritische Tiere strahlenempfindlicher sind als der Wildtyp. Weiterhin wurde die Untersuchung von Strahlenschäden in Lymphozyten von Patienten aus Bad Steben (mFISH-Analyse) fortgesetzt, um statistisch relevante Aussagen treffen zu können.
- AP4: (a) Eine Publikation zur Phagozytose wurde in Zusammenarbeit mit AP9 konzipiert und dabei einige ergänzende Experimente vereinbart. Die Untersuchungen zur Adhäsion wurden für Ea.hy.926-Zellen zusammen mit AP5 fortgesetzt. Hierbei zeigte sich, dass der NF $\kappa$ B-Signalweg unter entzündlichen Bedingungen unabhängig von Bestrahlung aktiviert wird, obwohl sich die Adhäsion von Immunzellen im gleichen Experiment durch Bestrahlung ändert. Eine Inhibition von NF $\kappa$ B könnte auf der strahleninduzierten Aktivierung des TGF- $\beta$  Signalweges basieren. Die Etablierung eines Immunfluoreszenz-Protokolls zur Quantifizierung von Komponenten des Signalwegs (Smad 2/3) mit verbesserter Reproduzierbarkeit wurde begonnen.
- (b) Zur Quantifizierung der Expression von an der Differenzierung mesenchymaler Zellen beteiligten Transkriptionsfaktoren wurden PCR und ELISA Protokolle etabliert und optimiert. Erste Ergebnisse bestätigen unsere Daten, dass Bestrahlung die Differenzierung beschleunigt. Die Etablierung einer Methode zur Untersuchung von resorbierender Aktivität von Osteoklasten auf Knochenplättchen wurde begonnen.
- Der Anteil von immunsuppressiven Treg Zellen, die unter entzündlichen Bedingungen aus CD4<sup>+</sup>-Vorläuferzellen hervorgehen, nimmt im Gegensatz zu Th17 Zellen nach Bestrahlung zu. Dies ist unter neutralen Bedingungen nicht der Fall. Erste Untersuchungen in Patientenblut, welches vom AP9 zur Verfügung gestellt wurde, zeigen ebenfalls eine Zunahme dieses Zelltyps nach Radontherapie.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Der Experimentierbetrieb mit den anderen Arbeitspaketen kann bis zum Beginn von Bauarbeiten am bisherigen Standort weitergeführt werden. Diese werden voraussichtlich ein Jahr dauern. Zwischenzeitlich soll die Radonkammer in ein anderes Labor umgezogen werden. Dadurch werden eine neue Inbetriebnahme sowie Testmessungen erforderlich. Der Experimentier-Betrieb soll aber grundsätzlich fortgesetzt werden.
- AP3: Für die Untersuchung zur Induktion von Chromosomenschäden in Lymphozyten und Knochenmarkszellen von arthritischen Mäusen und Wildtyp Tieren wird die mFISH-Technik eingesetzt. Weiterhin wird die Patientenstudie (Bad Steben) beendet und eine erste Publikation zur Wirkung von Alphastrahlen vorbereitet.
- AP4: (a) Zur Ergänzung der Phagozytose-Experimente soll die Monozyten-Ausgangspopulation mit Markern charakterisiert werden. Die detaillierten Experimente zur Dosis-Wirkungsbeziehung in der Adhäsion von Immunzellen sollen für Röntgenstrahlung fortgeführt und ebenfalls mit Kohlenstoff-Ionen für verschiedene primäre Endothelzellen durchgeführt werden. Gemeinsam mit AP5 sollen die Experimente zu Adhäsion und Aktivierung von NF $\kappa$ B auf primäre Endothelzellen ausgedehnt werden.
- (b) PCR-Messungen von Transkriptionsfaktoren, die an der Differenzierung von MSCs zu Osteoblasten beteiligt sind, sowie die Quantifizierung der strahleninduzierten Freisetzung von Zytokinen sollen weitergeführt werden. Ausgesuchte Entzündungsfaktoren sollen im Blutplasma von Radonpatienten (Bereitstellung durch AP9) untersucht werden. Zudem soll die Hypothese überprüft werden, dass bestrahlte synoviale Fibroblasten aus Gelenken von RA-Patienten (Kollaboration Universitätsklinikum Münster) die Aktivierung von Osteoklasten beeinflussen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- C. Fournier, G. Kraft, A. Maier: Untersuchungen zum genetischen Risiko und der entzündungshemmenden Wirkung von Radon (GREWIS). StrahlenschutzPRAXIS (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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 wurden die elektrophysiologischen Messungen zum stimulierenden Effekt von  $\alpha$ -Strahlung auf  $K^+$ -Kanalaktivität in A549 Zellen fortgesetzt und detailliert. Die Daten bestätigen die anfänglichen Messungen, aus denen hervorgeht, dass schon niedrige Dosen (12.5 cGy alpha-Partikel (3.66 MeV/u)) ausreichen, um eine Zunahme an Strom zu erzielen. In komplementären Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass es sich bei dem aktivierten Kanal um den humanen intermediären  $Ca^{2+}$  aktivierten  $K^+$ -Kanal (hIK) handelt, der auch durch Röntgenstrahlung aktiviert wird. Der betreffende Kanal ist von großer Wichtigkeit in der Zelle, da er Prozesse wie Apoptose, Zellproliferation und Zellmigration mit reguliert. Unsere Daten zeigen, dass eine Blockierung des Kanals in der Tat zu einer veränderten Migration und Apoptose führt. In parallelen Messungen haben wir die Signaltransduktionskaskade untersucht, die der Kanalaktivierung zu Grunde liegt. Die Daten zeigen die zentrale Rolle von Sauerstoffradikalen und von zytosolischem  $Ca^{2+}$  bei der Kanalaktivierung in Folge von Strahlung.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Schon in dem vergangenen Bericht wurde in Aussicht gestellt, dass die oben genannten Untersuchungen auf Lymphozyten, also Zellen die für das Immunsystem und für Entzündungsreaktionen von größerer Bedeutung sind, auszudehnen. Diese Experimente haben sich verzögert, da sich die Notwendigkeit ergeben hat, dass die betreffenden Zellen für unser System erst einmal grundlegend charakterisiert werden müssen. Die Arbeiten werden gerade von einem neuen Doktoranden mit Erfolg durchgeführt und sollten bald abgeschlossen sein. Danach werden wir den Effekt von  $\alpha$ -Partikeln auf die Transportprozesse in Lymphozyten systematisch im Kontext ihrer Bedeutung von Entzündungsreaktionen untersuchen

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Eine Publikation über die Wirkung von Strahlung auf einen wichtigen  $K^+$ -Kanal ist in Arbeit und steht vor der Einreichung zur Publikation.

Eine Promotion zum Thema steht vor dem Abschluss; die Dissertation ist eingereicht und am 07.02.14 wird die Verteidigung sein.

Poster-Präsentationen:

Bastian Roth: Ionizing irradiation causes rapid and cell specific activation of two types of  $K^+$  channels and hyperpolarization in A549 cells; 9<sup>th</sup> Europ. Biophys. Congress, Lissabon, Juli 2013.

Christine Gibhardt: Radiation induced activation of potassium channels: the role of ROS and calcium; GBS-Tagung, Darmstadt, September 2013

Fluorescent reporter proteins monitor the role of ROS and calcium in radiation generated potassium channel activation; EMBO|EMBL Symposium: Seeing is Believing- Imaging the Processes of Life, Heidelberg, Oktober 2013

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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

Der letzte Bericht befasste sich mit unseren bisherigen Resultaten zu Effekten der Röntgenbestrahlung hinsichtlich von Knorpel- und Osteoblasten-Differenzierung, wobei sowohl humane Osteoblasten wie auch mesenchymale Zellen aus den Extremitätenanlagen des Mausembryos (E11.5) zum Einsatz kamen. Diese Resultate wurden auch bei der jährlichen GREWIS-Tagung an der GSI im November 2013 vorgetragen. Da die Gewinnung genügender Mengen von humanen Knochenmarkszellen bisher noch nicht immer ausreichend war (s. AG Fournier), haben wir gleichzeitig begonnen, auch mit Knochenmark aus der Maus zu arbeiten. Wir sind derzeit intensiv dabei, die Zucht von mesenchymalen Stammzellen (MSCs) aus dem Knochenmark der Maus zu verbessern, wobei die MSCs unter Einsatz von geeignetem Differenzierungsmedium zu Osteoblasten differenziert werden. Mit diesen Zellen können dann unsere Bestrahlungs-experimente beginnen, die aber auch mit humanen Osteoblasten fortgesetzt werden sollen. In der Zwischenzeit haben wir in unserem Zellansatz der murinen MSCs die Expression von verschiedenen relevanten Genen der Knorpel- und Knochendifferenzierung analysiert, wie etwa Indian hedgehog (IHH), Matrix-Metalloproteinase-13 (MMP 13), Collagen II, Collagen X (Col II, Col X), etc.. Ferner haben wir nach demselben Zellansatz auch differenzierende MSCs aus einer AChE<sup>-/-</sup>, BChE-WT Mäuselinie untersucht, um dieselben Genexpressionen unter Abwesenheit der AChE zu analysieren, denn wir wissen aus vorherigen Arbeiten (Diss. Janine Klaczinski, 2012), dass in dieser Maus die Knorpel- und Knochenbildung stark gestört ist. Auch haben wir eine *In-situ*-Hybridisierung (ISH) für den alpha7-nikotinischen Acetylcholinrezeptor ( $\alpha 7nAChR$ ) etabliert, weil dieser Rezeptor im Verdacht steht, bei vielen Erkrankungen beteiligt zu sein. Dabei haben wir erste Resultate hinsichtlich des  $\alpha 7nAChR$  in Wildtyp P7 und P8-Mäusen erhalten. Auffälligerweise war die  $\alpha 7nAChR$ -Expression deutlich stärker in den Diaphysen als in den Epiphysen der betrachteten Embryos. Da die transgenen arthritischen Mäuse aus der AG Gaipf und Frey (AP9, Erlangen) erhältlich sind, haben wir nun die ersten Schnitte aus dieser Maus erhalten, in denen die Expression des  $\alpha 7nAChR$  nun untersucht wird. Auf die Befunde sind wir gespannt, da dies ein wichtiger Durchbruch im Verständnis der Rolle des cholinergen anti-inflammatorischen Signalwegs (CAIP) während der Behandlung und Bestrahlung von Arthritis sein könnte.

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 582.853,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Cardoso

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundprojekt 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).

Speziell 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)*

I. (Monate 1-6)

- NF- $\kappa$ B Expression in Knochen-resorbierenden Osteoklasten, Makrophagen, und 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

## II. (Monate 6-24)

- 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

## III. (Monate 25-36)

- 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

## IV. (Monate 18-24)

- Untersuchung von Expression und Aktivierung von NF- $\kappa$ B im cholinergen Signalweg

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

Nachdem wir die Aktivierung von NF- $\kappa$ B nach Bestrahlung in Lebendzell-Experimenten analysiert haben, untersuchten wir die Aktivierungskinetik von endogenem NF- $\kappa$ B. Zu diesem Zweck bestrahlten wir Endothelzellen und fixierten sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Mittels Immunfluoreszenz Färbung konnte das endogene NF- $\kappa$ B via „Operetta High-content/High-throuput imaging system“ detektiert und quantifiziert werden.

Die Intensitätsanalysen von durchschnittlich 2500 Zellen zu fünf Zeitpunkten von sechs verschiedenen Proteinen des Signalweges zeigten Änderungen des endogenen NF- $\kappa$ B Niveaus. Nach Bestrahlung mit niedriger Dosis (0.5 Gy), jedoch nicht mit hoher Dosis (6 Gy), reduzierte sich die Intensität von NF- $\kappa$ B (p65) in den Zellen nach 30 min um durchschnittlich 40 %.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im Laufe der nächsten sechs Monate werden wir die oben beschrieben und getesteten Analysen auf primäre menschliche Zellen und auf Gewebe der Mausmodelle anwenden. Des Weiteren werden wir die Auswirkung auf anti-entzündliche Prozesse analysieren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Groo, A.; Kraft, D.; Meyer, S.; Durante, M.; Cardoso, M. C.; Fournier, C.: Impact of ionizing radiation on differentiation and proliferation of human osteoblasts, GSI Report 2013-1, 446 (2013).

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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. In diesem Berichtszeitraum wurde die Radonexpositionskammer fertiggestellt und war im November 2013 für den ersten Tierversuch einsatzbereit.

Entzündlich-rheumatische Erkrankungen der Gelenke und chronische Schmerzen des Bewegungsapparates zählen zu den Hauptindikationen für eine therapeutische Radonbehandlung. Im Rahmen dieses Versuchsvorhabens soll untersucht werden, wie Radongas sich im Körper verteilt und ob eine Anreicherung des Gases in bestimmten Organen zu beobachten ist. Eine der zentralen Fragestellungen ist wie Radongas auf den Knochen wirkt und ob es eventuell zu einer Anreicherung von Radon oder dessen Tochternukliden im Knochengewebe kommt. Um dies zu untersuchen, müssen die durch die radioaktiven Zerfälle des Radongases hervorgerufenen DNA Schäden im Knochen mittels Immunfluoreszenzfärbung nachgewiesen werden. Daher wurden in Vorexperimenten drei C57BL/6 Mäuse mit 10 mGy Röntgenstrahlung bestrahlt. Die Knochen der Vorderbeine wurden 15 Minuten nach Bestrahlung entnommen und mit Hilfe einer EDTA-Lösung für maximal 24 Stunden dekalzifiziert und anschließend in Paraffin eingebettet. Es wurden Gewebeschnitte angefertigt und eine  $\gamma$ H2AX/53BP1-Immunfluoreszenzfärbung der angefertigten Knochenschnitte durchgeführt. In vorherigen Versuchen hatte sich diese Färbung besonders schwierig erwiesen aufgrund einer hohen Autofluoreszenz des Knochengewebes. Durch intensive Optimierungsarbeiten ist es uns inzwischen gelungen sowohl  $\gamma$ H2AX Foci als auch 53BP1 Foci im Knochen nachzuweisen. DNA Schäden konnten sowohl im Knochenmark als auch im Periost (Knochenhaut) und in der Substantia compacta (kompakte Substanz) durch Immunfluoreszenzfärbungen sichtbar gemacht werden.

Der Tierversuchsantrag wurde am 5. November 2013 genehmigt. Daraufhin wurde am 26. November 2013, in Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern, der erste Radon Tierversuch durchgeführt. Insgesamt wurden sechs Mäuse in der Radonexpositionskammer einer Radonkonzentration von  $440 \text{ kBq/m}^3$  ausgesetzt. Die Tiere befanden sich eine Stunde in der Kammer und wurden anschließend nach 15 Minuten, 24 Stunden und 7 Tagen getötet für die Organentnahme. Des Weiteren wurden die Organe von zwei unbestrahlten Tieren zur Kontrolle entnommen. Zurzeit werden die ersten Immunfluoreszenzfärbungen der Paraffinschnitte angefertigt um mit der biodosimetrischen Auswertung zu beginnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im ersten Halbjahr 2014 ist die Auswertung des ersten Radon Tierversuches geplant. Des Weiteren ist die Durchführung des nächsten Tierversuchs bereits für Februar 2014 angesetzt. Neben Experimenten mit der Radonkammer sind weiterführende Versuche mit der Röntgenröhre und der  $\alpha$ -Quelle geplant.

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 280.992,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Prof. 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

Nicht-lineare Dosis-Wirkungsbeziehungen sind ein wesentliches Charakteristikum der entzündungshemmenden Wirkung niedriger Strahlendosen. Obwohl aktuelle Daten die Beteiligung einer Vielzahl von molekularen Mechanismen für die Ausprägung dieser Effekten belegen, ist der Einfluss von reaktiven Sauerstoffmetaboliten (ROS), der DNA-Schadensreparatur und der zellulären Stressantwort erst wenig untersucht. In diesem Kontext gelang es im Berichtszeitraum, unabhängig von einer Stimulation mit dem Zytokin TNF- $\alpha$ , in der Endothelzell-Linie EA.hy926 diskontinuierliche Dosis-Wirkungsprofile für die Expression des Hitzeschockproteins 70 (Hsp70) (AP2), von ROS (AP3) und von residuellen  $\gamma$ -H2AX-Foci (AP1) mit maximalen Effekten nach Bestrahlung mit einer Dosis von 0,5 bis 0,7 Gy zu detektieren. Die nicht-lineare Detektion von  $\gamma$ -H2AX-Foci konnte zudem durch Vorinkubation mit dem Radikalfänger N-Acetyl-L-Cystein (NAC) und dem Einsatz von Hemmstoffen für die DNA-Reparaturmechanismen homologe Rekombination (HR) und Nicht-homologe Endverknüpfung (NHEJ) (AP4) weitgehend aufgehoben werden. Parallel dazu wurde mittels kolorimetrischer und Western-Blot Analysen als ein möglicher vermittelnder Mechanismus eine lokal (0,5 Gy) verminderte Proteinexpression und Aktivität des Enzyms Superoxiddismutase (SOD, AP3) identifiziert (Ergebnisse zur Publikation eingereicht). Diese Daten belegen eine funktionelle Relevanz der ROS-Produktion, der SOD-Aktivität und von DNA-Reparaturmechanismen für die diskontinuierliche Detektion residualer  $\gamma$ -H2AX-Foci in Endothelzellen nach Bestrahlung mit Dosen  $< 1$  Gy.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten in AP1 werden plangemäß weitergeführt und auf Untersuchungen nach Radonbestrahlung und auf Lymphozyten des peripheren Blutes erweitert. Funktionell soll zudem der Einfluss der ROS-Produktion, der SOD Aktivität und der DNA-Reparaturwege HR und NHEJ auf den funktionellen Endpunkt Adhäsion evaluiert werden. Im Rahmen von AP2 wird die Bedeutung von sekretiertem Hsp70 mittels ELISA-Technologie sowie die Expression des Faktors High-Mobility-Group-Protein B1 (HMGB1) untersucht. Der Nachweis von reaktiven Stickoxid-Metaboliten und der Aktivität/Expression der Enzyme Glutathionperoxidase und Katalase in Endothelzellen und Lymphozyten stellt den Schwerpunkt weiterführender Analysen im AP3 dar.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum sind folgende Publikationen entstanden:

Frischholz B, Wunderlich R, Rühle PF, Schorn C, Rödel F, Keilholz L, Fietkau R, Gaipl 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 0.7 Gy of ionizing radiation. *Autoimmunity* 2013;46:323-8.

Rödel F, Frey B, Multhoff G, Gaipl U. Contribution of the immune system to bystander and non-targeted effects of ionizing radiation. *Cancer Lett* 2013, epub ahead of print.

Large M, Reichert S, Hehlhans S, Fournier C, Rödel C, Rödel F. A non-linear detection of phosphohistone H2AX in EA.hy926 endothelial cells following low-dose X-irradiation is modulated by ROS (zur Publikation eingereicht).

Gaipl U, Multhoff G, Scheithauer H, Lauber K, Hehlhans S, Frey B, Rödel F. Kill and spread the word: Stimulation of anti-tumour immune responses in the context of radiotherapy (zur Publikation eingereicht).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schloss- platz 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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, Zytokinfreisetzung, 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. Zu AP1: Die Biomaterialsammlung der „RAD-ON01“-Studie (Ethik-Kommission Nr. 12131) konnte im Oktober 2013 erfolgreich mit 100 Patienten abgeschlossen werden. Allen Patienten wurde, wie geplant, zu fünf verschiedenen Zeitpunkten (t0: direkt vor Therapie, t1: direkt nach Therapie, t2: 12 Wochen nach Therapie, t3: 18 Wochen nach Therapie, t4: 30 Wochen nach Therapie) Blut entnommen und analysiert. Am Tag der Blutabnahme erfolgte eine umfangreiche Immunphänotypisierung (IPT) mittels Mehrfarben-Durchflusszytometrie. Außerdem wurden für spätere Analysen (entzündliche und anti-entzündliche Zytokine im Serum, RNA-Transkriptions- und Telomerase-Aktivität in Leukozyten) die Proben entsprechend aufbereitet und eingelagert. Momentan erfolgt eine detaillierte Auswertung der Messdaten inklusive der Korrelationsanalysen von veränderten Immunparametern mit Parametern des Patientenabschlussfragebogens wie Schmerzlinderung, Schmerzverlauf und Empfehlung der Radonbadtherapie. Auch wurden die Messparameter der IPT noch etwas erweitert, um in der Folgestudie zur Untersuchung der Wirkung niedrigdosierter Röntgenstrahlung auf periphere Immunzellen in Patienten mit entzündlichem, schmerzhaftem Krankheitsbild, Anwendung zu finden. Die Grundprotokolle sind identisch und somit ist eine direkte Vergleichsmöglichkeit der Ergebnisse beider Studien gegeben. Für die Fortsetzung der Arbeiten zu AP2 (funktionelle ex vivo Analysen von Immunzellen) werden die IPT-Ergebnisse beider Studien abgewartet, um festzulegen, welche Immunzellpopulationen am geeignetsten für weitere Untersuchungen sind. Beim 2. Projekt wurde der Fokus weiterhin, wie geplant, auf die AP3 und AP5 gelegt. Zu AP3: Der Folgeversuch mit Bestrahlung der hTNF- $\alpha$  transgenen Mäusen mit 2x0.5Gy konnte abgeschlossen werden und zeigte, dass sich vor allem die Griffstärke der behandelten Tiere über den gesamten Beobachtungszeitraum von 30 Tagen hinweg signifikant verbessert hat. Hierbei zeigten vor allem männliche Tiere eine stabile, langanhaltende Verbesserung die, im Gegensatz zu den Weibchen, auch eine signifikante Reduktion der Schwellung beinhaltete. Des Weiteren wurde ein 3. Bestrahlungsversuch mit wiederum 2x0.5Gy mit dem Ziel gestartet, die histomorphologischen Veränderungen und Vorgänge in den Gelenken zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Bestrahlung im Detail zu untersuchen. Zu AP5: Die Arbeiten der ex vivo Mausosteoklasten-Differenzierungsversuche sind abgeschlossen und zum größten Teil ausgewertet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Beeinflussung der Osteoklastenzahl durch eine Niedrigdosisbestrahlung ausgeschlossen werden kann. Die funktionellen Analysen dauern noch an. Die Etablierungsarbeiten, um verlässlich ausreichende und zur qPCR-Analyse geeignete Mengen an mRNA aus ex vivo differenzierten Mausosteoklasten zu erhalten, wurden ebenfalls erfolgreich beendet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Vorbereitungen (Ethikantrag, Organisation der Logistik der Blutabnahme) für die Folgestudie zur Untersuchung niedrigdosierter Röntgenstrahlung auf periphere Immunzellen sollen in den kommenden Wochen abgeschlossen sein. Die erweiterten Protokolle zur Immunphänotypisierung werden, analog zur RAD-ON01-Studie, zunächst mit Vollblut von gesunden Spendern gemessen, um einen Standard-Level der Verteilung der peripheren Blutzellen zu erhalten (AP1). Auch wird die Vermessung der Serumproben aus der RAD-ON01-Studie stattfinden, da hierfür nun die notwendigen Vorbereitungen zur Untersuchung verschiedenster Zytokine mittels LUMINEX-System abgeschlossen sind. In Analogie zum Bestrahlungsversuch der Mäuse mit 1x0.5Gy werden die aufwendigen histomorphometrischen Auswertungen von Pfoten und Tibien der Mäuse nach Bestrahlung mit 2x0.5Gy, sowie eines Zeitverlaufes nach einmaliger Bestrahlung fortgesetzt (AP3). Nach der Optimierung des „pit-formation assays“ sollen funktionelle Analysen zur Osteoklastenaktivität nach Strahlenexposition folgen. Im Rahmen des Osteoklasten-Differenzierungsversuches soll eine mögliche Veränderung der Genexpression nach Bestrahlung anhand der gewonnenen cDNA untersucht werden. Durch eine in vitro Charakterisierung von fibroblast like synoviocytes (FLS) nach Bestrahlung soll herausgefunden werden, ob dieser Zelltyp für die beobachtete Verbesserung des Inflammationsgewebes, sowie der Reduktion des Knorpelabbaus in den Gelenken mit verantwortlich ist. Des Weiteren wird mit dem Aufbau einer Osteoblastenkultur begonnen, um die Auswirkungen von niedrig dosierter Strahlung auf den Knochenstoffwechsel ausführlicher charakterisieren zu können (AP5).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Ott OJ, Hertel S, Gaipf US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R. The Erlangen Dose Optimization trial for low-dose radiotherapy of benign painful elbow syndrome: Long-term results. *Strahlenther Onkol.* 2014 Jan 16.

Rödel F, Frey B, Multhoff G, Gaipf U. Contribution of the immune system to bystander and non-targeted effects of ionizing radiation. *Cancer Lett.* 2013 Oct 15. pii: S0304-3835(13)00669-1. doi: 10.1016/j.canlet.2013.09.015.

Frey B, Rubner Y, Kulzer L, Werthmüller N, Weiss EM, Fietkau R, Gaipf US. Antitumor immune responses induced by ionizing irradiation and further immune stimulation. *Cancer Immunol Immunother.* 2014 Jan;63(1):29-36. doi: 10.1007/s00262-013-1474-y.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter		<b>Förderkennzeichen:</b> 02 NUK 024A
<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 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 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 Kandidatengenen regulierte Zelllinien und strahlenresistente Zelllinien der Verbundpartner ein.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Identifizierung und Validierung von Targetproteinen

- AP1.1: Proteom-Profile von Zellkulturmodellen strahlenüberempfindlicher normaler Zellen und strahlenresistenter HNSCC-Zellen (BfS/ HMGU/ LMU)
- AP1.2: Validierung regulierter Proteine in Proteinextrakten aus den verschiedenen Zelllinien und zusätzlich in Proteinextrakten aus stimulierten/ nicht-stimulierten Lymphozyten (BfS)
- AP1.3: Proteom-Profile von Modellzelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression von Targets (BfS/ HMGU/ LMU)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1: Für die Generierung der Proteom-Profile mit Hilfe der 2D-DIGE-Analyse wurden 2 strahlenüberempfindliche und eine resistente normale lymphoblastoide Zelllinie kultiviert, mit 1 Gy und 10 Gy (<sup>137</sup>Cs-Quelle) bestrahlt und 4 h und 24 h post-Bestrahlung für die 2D-Proteomanalyse mit eingegrenzten pH-Bereichen (pH 4-7, und pH 3-10) geerntet. Die 24 h- Proben wurden im Vergleich zur Kontrolle analysiert (4 biologische Replikate). Es wurden zwischen 5 und 69 Proteine detektiert, die 24 h nach Bestrahlung mit 1 Gy oder 10 Gy signifikant reguliert sind, wobei die überempfindlichen Linien, im Vergleich zu der resistenten Linie eine größere Anzahl von Proteinänderungen aufweisen. Ein Vergleich der Linien untereinander zeigte, dass der interindividuelle Unterschied, im Vergleich zur intraindividuellen Varianz auf Proteinebene sehr hoch ist. Hier werden 581 Proteine (Kontrollen) und 567 Proteine (10 Gy 24 h) unterschiedlich exprimiert. Aktuell werden die Proben für die massenspektrometrische Untersuchung analysiert.

2 OKF6-Zelllinien (1 strahlenresistente FancA-überexprimierende Zelllinie, 1 Vektorkontrolle; HMGU) wurden für die 2D-Analyse kultiviert mit 4 Gy bestrahlt und nach 24 h geerntet und die Proteinexpression analysiert (4 biologische Replikate).

AP1.2: Es wurden bereits die mittels Proteomanalyse aus dem Vorgängerprojekt ermittelten Kandidatenproteine Vinculin, Vimentin, Clic, Msh2, Rad50, Nbs1 und Atm im Westernblot in 11 lymphoblastoiden Zelllinien getestet. Es konnte jedoch keine Korrelation zwischen Strahlenempfindlichkeit und Expression der Kandidatenproteine ermittelt werden.

AP1.3: Die Expression von der Zielprotein Mcm7 und SerpinB9 wurde in 7 HNSCC-Zelllinien (von AP6) untersucht. MCM7-Expression wurde nachgewiesen und kann somit für die Generierung von Zelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression verwendet werden. Die Zelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression sind noch nicht generiert.

Austausch und Planung mit AP2 und Übergabe der lymphoblastoiden Zelllinien sind abgeschlossen.

Das zweite Jahrestreffen des ZiSS-Verbunds fand am 21. November 2013 beim Verbundpartner AG Kirsten Lauber am Klinikum München-Großhadern statt.

Vom 1.8.2013 bis 31.1.2014 übernimmt Frau Monika Hauptmann 25 % der Wissenschaftlerstelle in AP1.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag bei der 16. Jahrestagung der Gesellschaft für biologische Strahlenforschung (GBS) in Darmstadt: A proteomic approach to identify low abundant proteins that modulate radiation sensitivity. A. Guertler, U. Kulka, S. Hornhardt, M. Gomolka

B. Maroschnik, A. Gürtler, A. Krämer, U. Rößler, M. Gomolka, S. Hornhardt, S. Mörtl, A.A. Friedl: Radiation-induced alterations of histone post-translational modification levels in lymphoblastoid cell lines. Radiation Oncology 9: 15, 2014 (Vorgängerprojekt 03NUK007C)

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 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: siehe Förderkennzeichen 02NUK024 A bis E.

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 Kandidatengenen übermittelt. Die in AP6 generierten strahlenresistenten Zelllinien werden in AP2 im Hinblick auf verschiedene omics-Ebenen 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:- Insgesamt konnten bisher 39 Subklone aus primären Zelllinien des Kopf-Hals-Bereichs (aus Tumor- und Normalgewebe) generiert werden. Die Charakterisierung dieser Subklone (Zytokeratinfärbung zum Nachweis des epithelialen Zellursprungs, Wachstumskurven, Überlebenskurven nach in vitro Bestrahlung) wird derzeit weitergeführt. 28 Klone wurden mittels qRT-PCR hinsichtlich ihrer endogenen FancA-mRNA-Expression analysiert, wobei kein Klon eine endogene FancA-Überexpression aufwies. Die von AP6 erhaltenen kommerziell erworbenen HNSCC-Zelllinien wurden mittels Array-CGH- und SKY-Analyse hinsichtlich genomweiter Kopienzahlveränderungen und chromosomaler Rearrangierungen charakterisiert. Auf Basis der in AP5 durchgeführten Untersuchungen zur Tumorigenität der HNSCC-Zelllinien im Xenograft-Modell, wurde im Konsortium beschlossen, eine der HNSCC-Zelllinien für die zukünftige Generierung von HNSCC-Zelllinien mit regulierter Targetgen-Expression (FancA und MCM7) zu verwenden. Die Generierung dieser Zelllinien läuft derzeit an.
- Die aus FancA-überexprimierenden-Zellen sowie aus Vektorkontroll-Zellen isolierte DNA und RNA nach zwei Zeitpunkten nach in vitro Bestrahlung wurde nach Qualitätskontrolle Microarray-basierten Array-CGH (genomweiter Nachweis von Kopienzahlveränderungen) und mRNA-Expression Analysen unterworfen. Die Experimente verliefen erfolgreich, so dass die Datenanalyse der generierten Datensätze in AP3 ablaufen kann.
  - Die aus den LUCY Zelllinien 4060-200 (strahlenüberempfindlich) und 20037-200 (normal empfindlich) isolierte DNA und RNA wurde nach Qualitätskontrolle einer globalen zeitaufgelösten genomischen Kopienzahl (Array-CGH), bzw. einer Microarray Transkriptomanalyse unterzogen. Die Experimente verliefen erfolgreich, so dass für beide Zelllinien komplette und auswertbare Datensätze generiert werden konnten, so dass sie für die Datenanalyse in AP3 verwendet werden konnten.
- AP3:- Die Datenanalyse der strahlenhypersensitiven (4060-200) und normalsensitiven (20037-200) LUCY Zelllinien hinsichtlich globaler genomischer Kopienzahl und Gesamttranskriptom (zeitaufgelöst) wurde vollständig durchgeführt. Die Strahlenantwort der strahlenhypersensitiven Zelllinie war im Vergleich mit der normal-sensitiven Zelllinie auf Transkriptomebene wesentlich stärker ausgeprägt. Beide Zelllinien zeigten differentielle Expression von mehreren hundert Genen (über d. natural spline Regressionskoeffizienten) darunter auch das Gen MCM7, welches bereits in der Proteomanalyse gefunden wurde.
- Die zeitaufgelösten Transkriptomdaten werden derzeit zum Zwecke der Rekonstruktion des frühen und späten strahleninduzierten Genregulationsnetzwerkes analysiert und die Ergebnisse verschiedener Methoden (partial correlation, WGCNA, bayesian network reconstruction) verglichen und gegebenenfalls zusammengeführt.
  - Die Integration der genomischen Kopienzahl mit der Transkriptomebene wird derzeit durchgeführt.

Seit 9. September 2013 befindet sich Frau Verena Zangen in Mutterschutz/Elternzeit. Ihre Aufgaben werden von Frau Julia Heß übernommen. Das 2. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 21. November 2013 in München (Klinikum Großhadern) statt. Hieran haben für das AP2 Igor Gimenez Aznar, Julia Heß, Agata Michna, Kristian Unger und Horst Zitzelsberger teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die Charakterisierung der generierten Subklone primärer Zelllinien des Kopf-Hals-Bereichs wird weitergeführt. Es werden weitere Zelllinien mit regulierter Targetgen-Expression (FancA und MCM7) generiert, um den Effekt dieser regulierten Expression auf die Strahlenempfindlichkeit der Zellen in vitro und in vivo zu analysieren. Im Anschluss wird mit der „Omics“-Charakterisierung dieser Zelllinien begonnen.
- AP3: Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm, wobei die Erstellung eines integrativen „Frameworks“ und die Rekonstruktion von Deregulationsnetzwerken und die Identifizierung von Schlüssel-molekülen, die als mögliche therapeutische Zielmoleküle in Frage kommen, im Vordergrund stehen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Poster Präsentationen GBS Jahrestagung 2013, 25.-27.09.2013, Darmstadt:

Identification of molecular targets and signaling networks that influence hypersensitivity and resistance to ionizing radiation (ZiSS): A. Michna, A. Gürtler, I. Gimenez Aznar, M. Selmsberger, A. Pitea, V. Zangen, H. Zitzelsberger, K. Unger.

FancA overexpression and radiation resistance in head and neck squamous cell carcinoma cells: I. Gimenez Aznar, A. Michna, L. Hieber, K. Lauber, K. Unger, H. Zitzelsberger, V. Zangen.

<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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 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. 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

AP6.1: Generierung von strahlenresistenten HNSCC-Zelllinien für AP1, AP2 und AP4 (HMGU/ LMU)

AP6.2: *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)

AP6.3: *In vivo*-Analyse der Strahlenwirkung nach Behandlung mit Substanzen, die unter AP6.2. strahlensensitivitätsmodulierende Wirkung gezeigt haben (LMU/ IFZ)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP6.1: Die Generierung radioresistenter HNSCC-Klone wurde fortgesetzt. Dazu wurden von drei etablierten HNSCC-Zelllinien (UPCI SCC 099, UPCI SCC 131 und UPCI SCC 154) insgesamt 16 Klone generiert und hinsichtlich ihrer Strahlenresistenz in Koloniebildungs- und Viabilitätsanalysen charakterisiert. Dabei zeigten die verschiedenen Klone eine große Varianz in ihrer Strahlensensitivität, da sowohl radioresistente als auch radiosensitive Phänotypen identifiziert werden konnten. Die vielversprechendsten Kandidaten werden nun an AP1, AP2 und AP4 weitergegeben.

Darüber hinaus wurden Zellen der Linien UPCI SCC 099, UPCI SCC 131 und UPCI SCC 154 einem modifizierten Bestrahlungsschema unterzogen, um weitere Klone zu generieren.

Außerdem wurde mit der Generierung radioresistenter/radiosensitiver Klone von zwei weiteren HNSCC-Zelllinien (SCC 9, Cal 33) begonnen. Die resultierenden Klone sollen anschließend ebenfalls hinsichtlich ihrer Strahlenresistenz in Koloniebildungs- und Viabilitätsanalysen charakterisiert werden.

AP6.2: Im Rahmen des Projektverbunds sind bisher noch keine potentiellen Zielstrukturen für eine therapeutische Manipulation identifiziert worden.

Daher werden zunächst molekular zielgerichtete Substanzen (Targeted agents), die von anderen Tumorentitäten her bekannt sind und dort vielversprechende Ergebnisse gezeigt haben, hinsichtlich ihrer radiosensibilisierenden Eigenschaften in verschiedenen HNSCC-Zelllinien getestet. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, inwiefern sich die Radiosensitivität der HNSCC-Zelllinien mit Hilfe des Tyrosinkinase-Inhibitors Dasatinib bzw. eines neuartigen Hsp90 Inhibitors modulieren lässt. Die Daten hierzu werden zurzeit ausgewertet.

AP6.3: Die behördliche Genehmigung zur Durchführung der geplanten in vivo Experimente wurde eingeholt (Az.84-02.04.2013.A092). Zur Etablierung der heterotopen Xenograft-Modelle, an denen die strahlensensitivitätsmodulierende Wirkung der in AP6.2.) erfolgreich getesteten Substanzen in vivo untersucht werden soll, wurden die erworbenen HNSCC-Zelllinien mit AP5 ausgetauscht, und mit der Etablierung wurde begonnen (siehe Fortschrittsbericht AP5).

Sonstiges:

- Mit AP1, AP2 und AP5 wurden verschiedene Zelllinien ausgetauscht.
- Das 2. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 21. November 2013 in München statt und wurde von unserer Arbeitsgruppe (AP6) ausgerichtet. Daran haben für das AP6 Kirsten Lauber und Linda Kinzel teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das formulierte Arbeitsprogramm für AP6 wird wie geplant weiter bearbeitet. Allerdings ist mit leichten Verzögerungen der Weiterarbeiten zu rechnen, da die PostDoc Wissenschaftlerin das Projekt seit 01.07.2013 mit reduzierter Arbeitszeit (30 Stunden) bearbeitet und die zwischenzeitliche Unterstützung durch eine aus dem Abteilungshaushalt finanzierte TA seit 01.01.2014 nicht mehr zur Verfügung steht. Wir werden uns bemühen, dass die dadurch entstehenden Verzögerungen in der weiteren Projektbearbeitung auf AP6 beschränkt bleiben und die anderen APs möglichst nicht betroffen werden.

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<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 und 5.2:

Weitere 6 HNSCC-Zelllinien wurden zur Verifizierung der Tumorigenität in Xenograft-Tumoren getestet. Hierzu wurde das Wachstum der experimentellen Tumoren kontinuierlich verfolgt (Ermittlung der Wachstumskurven). Es wurden folgende Parameter erfasst: i) die Latenzzeit bis zum Anwachsen der Tumoren, ii) die Tumorinzidenz, iii) die Zeit bis zum Erreichen eines Tumolvolumens von  $1000 \text{ mm}^3$ . Aus den 6 getesteten Zelllinien konnte neben der geeigneten Kandidaten-Zelllinie aus den ersten vier getesteten Zelllinien (vgl. Zwischenbericht 2013/1) eine weitere in vitro strahlenresistente HNSCC Zelllinie als sehr guter Kandidat für die geplanten Untersuchungen zur Strahlensensitivitätsmodulation in vivo identifiziert werden. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde im Konsortium entschieden, bevorzugt diese beiden tumorigenen Zelllinien für die Generierung von HNSCC Zelllinien mit regulierter Expression potentiell Radiosensitivitäts-modulierender Gene und die weiteren Untersuchungen in AP6.2 zu nutzen. In aktuellen Arbeiten werden tumorigene HNSCC Zelllinie mit stabiler Überexpression eines potentiell Strahlensensitivitäts-modulierenden Gens zur vergleichenden Charakterisierung der Radiosensitivität von Vektorkontrollzellen und Zellen mit Targetexpression in vitro und in vivo etabliert.

AP6.3: Die beiden in AP5.2 als geeignet identifizierten Zelllinien wurden für erste in vivo Analysen der Auswirkungen einer Gabe von im Rahmen der Arbeiten in AP 6.2 identifizierter potentiell Strahlensensitivitätsmodulierender Substanzen auf die Effektivität der Strahlentherapie in vivo eingesetzt. Hierzu wurde der Effekt einer Kombinationstherapie aus Bestrahlung und der Gabe eines in vitro als radiosensibilisierend identifizierten small molecule Inhibitors mit den Effekten der Einzeltherapien und einer Lösungsmittelkontrolle im Xenograftmodell verglichen. Zu diesem Zweck wurde für beide Zelllinien jeweils die Zeit bis zum Erreichen eines Tumolvolumens von  $1000 \text{ mm}^3$  in vier Gruppen untersucht: i) Lösungsmittelkontroll-behandelte Tiere, ii) Inhibitor-behandelte Tiere, iii) Tiere mit Lösungsmittelkontroll-Behandlung plus Bestrahlung, iv) Tiere mit Inhibitor-Behandlung plus Bestrahlung. Eine erste Analyse der Ergebnisse zeigt trotz viel versprechender in vitro Daten keine Radiosensibilisierung in vivo. Derzeit werden isolierte Tumorgewebe histologisch aufgearbeitet um Rückschlüsse auf mögliche Gründe für die unterschiedliche Effektivität in vitro und in vivo zu erhalten.

Die neue Studentische Hilfskraft Roze Imsak hat zum 15.08.2013 ihre Arbeit im Projekt aufgenommen. Sie wurde im Rahmen der oben beschriebenen Experimente bereits erfolgreich eingearbeitet und arbeitet in den aktuellen Experimenten mit.

Das 1. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 21. November 2013 in München (Klinikum Großhadern) statt. Hieran hat für das AP5 Verena Jendrossek teilgenommen.

### 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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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**

Eine Datenauswertungs- und -annotierungspipeline inklusive eines Programms zur Annotation, mit dem die Samples/Perturbationen der in den 96er-Platten erhobenen Daten systematisch erfasst und so die Daten standardisiert auswertbar werden, wurden im Berichtszeitraum fertiggestellt. Weiterhin wurden Methoden zur Netzwerkrekonstruktion aus Transkriptionsdaten entwickelt, die auf verschiedenen Ähnlichkeitsmaßen beruhen (Mutual Information und Correlation/Partial correlation AP4.5). Diese Methoden werden derzeit systematisch verglichen. Weiterhin haben wir ein existierendes Modul zur Identifizierung von Signalwegsaktivitäten aus Transkriptomdaten verbessert (alte Version online unter: [speed.sys-bio.net](http://speed.sys-bio.net), die neue Version noch in der Evaluierung). Hier wurden sehr große Expressionspanel zusammengestellt, aus denen Signaturen extrahiert werden, um die Expressionsdaten und die Signalwegsaktivitäten zu verbinden (AP4.1, und auch AP4.5). Die Methoden zur Extraktion der Signaturen werden derzeit systematisch evaluiert. Weiterhin wurden genregulatorische Netzwerke aus Datenbanken und durch Text-mining extrahiert (AP4.5). Zur Vorbereitung der Semi-quantitative Analyse der Signalnetzwerke (AP4.2) haben wir verschiedene Pathway-Assays ausgetestet und evaluiert, die 2014 mit der magnetischen Luminex-Technologie eingesetzt werden.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Zum einen wird die Signatur-Datenbank zur Rekonstruktion von Netzwerken weiter ausgebaut und fertig gestellt. Zweitens werden die Daten für AP4.2. generiert, sobald das entsprechende Gerät angeschafft ist.

### **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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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

In vorangegangenen Arbeiten haben wir den Einfluss von dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die Aufrechterhaltung der Pluripotenz und die Myokardbildung als eine der frühesten Organogenesen der pränatalen Entwicklung anhand von murinen ES-Zellen untersucht (siehe Punkt 5). Basierend auf diesen Arbeiten werden die Effekte ionisierender Strahlung nun im humanen System untersucht. Da allerdings die für Mausstammzellen üblichen kardialen Differenzierungsprotokolle, die auf der Bildung von 3D-Zellaggregaten beruhen, nicht uneingeschränkt auf hES-Zellen übertragbar sind, müssen neue Differenzierungsstrategien etabliert werden. Im Berichtszeitraum wurden die Voraussetzungen für derartige neue Ansätze zur Differenzierung von hES-Zellen der Linie WA09 (H9) in Kardiomyozyten durch Modulation des Wnt-Signalwegs geschaffen. Die zur Differenzierung verwendeten Protokolle nach X. Lian et al. (Nature Protocols 8, 2013, 162-175) und I. Minami et al. (Cell Reports 2, 2012, 1448–1460) erfordern die Kultur der embryonalen Stammzellen unter Feeder-freien Bedingungen ohne Beeinträchtigung der Pluripotenz. Dies konnte erfolgreich mithilfe eines durch embryonale Mausfibroblasten konditionierten Mediums und der Beschichtung der Kulturplatten mit MatrigelTM-Matrix erreicht werden. Darüber hinaus wurde die quantitative PCR für Marker des Mesoderms, kardialen Mesoderms und von kardialen Vorläuferzellen bzw. Kardiomyozyten etabliert.

Nach der erfolgreichen Erweiterung des für die Arbeiten mit hES-Zellen erforderlichen Ethikantrags konnte mit der entodermalen Differenzierung der hES-Zellen nach K. A. D'Amour et al. (Nature Biotechnology 11, 2006, 1392-1401) sowie der Charakterisierung der Differenzierungsprodukte begonnen werden. Erste Versuche mit Röntgenstrahlen waren erfolgreich und liefern Vergleichswerte für die im Februar und März 2014 geplanten Bestrahlungsversuche mit Kohlenstoff- und Eisenionen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Derzeit werden Vorbereitungen für Bestrahlungsversuche mit Kohlenstoff- und Eisenionen getroffen, um die Auswirkungen von Schwerionenstrahlung auf die entodermale Differenzierung hES-Zellen untersuchen zu können. Ebenfalls fortgeführt wird die gerichtete Differenzierung von hES-Zellen der Linie WA09 in Kardiomyozyten durch Modulation des Wnt-Signalwegs. Da inzwischen die Genehmigung weiterer Zelllinien erfolgte, wurden die Zelllinien HUES-2 und 3, die besonders für die kardiale Differenzierung geeignet sind, beschafft und sollen in den nächsten Monaten an der GSI etabliert werden. Ein Vergleich der Zelllinien mit der Linie WA09 erlaubt so, strahlenbedingte Effekte von zelllinienspezifischen Effekten zu unterscheiden, eine für die weitere Bewertung und Publikation der Ergebnisse unerlässliche Voraussetzung.

Die Arbeiten zur genaueren Charakterisierung der WA09-Zellen (Zellzyklusprogression, Apoptoserate, Induktion von Chromosomenaberrationen und die Expression von Pluripotenzmarkern) werden fortgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Franco, A.: Effects of X-rays on Cor.AT cardiomyocytes. 2013 Summer Student Program, Book of Reports, p. 51-53.

Luft S., Helm A., Hessel P., Pignalosa D., Brons S., Layer P.G., Durante M., Ritter S.: Influence of ionizing radiation on the potency state of murine embryonic stem cells. GSI-Report 2013-1, p. 448.

Luft S., Pignalosa D., Nasonova E., Arrizabalaga O., Helm A., Durante M., Ritter S.: Fate of D3 mouse embryonic stem cells exposed to X-rays or carbon ions. Mutation Research (in press).

Nieri D., Nasonova E., Hartel C., Diaz-Carballo D., Durante M., Ritter S.: Telomere length measurements of human and mouse cells by Fluorescence in situ Hybridization. GSI-Report 2013-1, p.456.

Pignalosa D., Luft S., Arrizabalaga O., Helm A., Natale F., Durante M., Ritter S.: First experiments using human embryonic stem cells as a model to examine radiation effects on early embryonic development: emphasis on gene expression, GSI-Report 2013-1, p. 442.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Anton-Günther-Str. 1, 72488 Sigmaringen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 025BX</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> 01.07.2013 bis 30.09.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<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 Entwicklungsstadien (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. Des Weiteren 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**

Seit dem letzten Zwischenbericht ist das Projekt nun erfolgreich an die Hochschule Albstadt Sigmaringen verlagert worden und erste Arbeiten und Mittelabrufe haben begonnen. Der neue Student ist den Kollegen von AP1 und AP3 anlässlich eines Projekttreffens in Darmstadt vorgestellt worden und erste Diskussionen über Implementierung elektrophysiologischer Messungen von hESC-derivierten Zellen in Aschaffenburg haben bereits stattgefunden.

Des Weiteren sind die hESCs (Linie H9) nach der Weihnachtsschließung erfolgreich von der Uni Konstanz nach Sigmaringen transferiert worden und in Kultur genommen worden. Der geplante Inkubator ist bestellt und in Funktion genommen worden. Erste neurale Differenzierungs-Versuche mit humanen iPSCs (da die H9 erst mit WiCell's [Patent-Inhaber] Zustimmung transferiert werden mussten) sind schon erfolgreich gelaufen, was ermöglichen wird parallel-Versuche mit iPSCs zu planen. In Anbetracht der Tatsache, dass iPSCs nicht epigenetisch 100 % reprogrammiert sind, wird es interessant sein zu sehen wie diese auf Bestrahlung reagieren, verglichen mit hESCs.

Inzwischen ist auch das alte Röntgengerät an der Uni Konstanz gegen ein neues, modernes Modell ersetzt worden, welches einen eingebauten Inkubator enthält, der es ermöglicht die Zellen für längere Zeit zu bestrahlen. Es ist somit möglich ‚chronische‘ Bestrahlungsexperimente bei sehr geringer Dosis durchzuführen, was interessante neue Fragenstellung ermöglichen wird.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Ab Februar werden die neuangesetzten H9 Zellen ausreichend adaptiert sein und bereit sein, die ersten Differenzierungen zu starten. Es sind erste Röntgenbestrahlungsexperimente geplant um das neue Gerät zu testen und zu ermitteln welche Strahlendosis subletal ist, und wie lange man bei sehr niedriger Dosis bestrahlen kann. Besonders interessant wird es sein zu erfassen, was für Folgen eine sehr niedrige Bestrahlung über längere Zeit auf die neurale Differenzierungskapazität hat. Es werden Effekte auf neurale Stammzellen, neurale und neuronale Vorläuferzellen und junge Neuronen untersucht werden. Es werden parallel auch humane iPSCs bestrahlt um zu erfassen ob es Unterschiede gibt. In einer ersten Zeit werden Effekte mit qPCR und Marker-Färbung untersucht. Es werden auch bestrahlte Neurosphären zu den Kollegen nach Dortmund geschickt um mit Scanning Konfokaler Mikroskopie zu sehen ob sich innerhalb der Neurosphären Veränderungen erfassen lassen.

Des Weiteren sind im Juli bis September erste Strahlenversuche in Darmstadt geplant, wofür der Student seine Tätigkeiten für eine enge Kooperation mit Frau Ritter für kurze Zeit dorthin verlagern wird.

### **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> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 186.606,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Thielemann	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das vorrangige wissenschaftliche Anliegen des Projektes ist es, zu einem besseren Verständnis der zytotoxischen und gentoxischen 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 (Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Dr. S. Kadereit).
- AP3: Elektrophysiologische Untersuchung kardialer und neuraler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. Dr. C. Thielemann).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wie bereits im Zwischenbericht des Jahres 2013 vorgestellt, wurden die Versuche mit primären kortikalen Neuronen aus der Ratte weitergeführt. Die Zellen wurden auf Mikroelektroden Array Chips (MEA) kultiviert und deren elektrische Signale abgeleitet. Ziel dieser Untersuchungen war es die frühe Entwicklung des Netzwerks und die elektrophysiologischen Eigenschaften des ausgereiften Netzwerks nach einer Exposition mit Röntgenstrahlung zu untersuchen. Mögliche strahleninduzierte Effekte auf die Netzwerkentwicklung bzw. auf die elektrophysiologische Kommunikation sollten wertvolle Hinweise für die geplanten Experimente mit humanen iPS Neuronen liefern (siehe Abschnitt 4).

Die abgeleiteten Daten wurden mithilfe des auf MATLAB-basierenden Programms Dr. Cell (C. Nick et al., Signal Processing 7, 2013, 96-109) ausgewertet. Untersucht wurden dabei Parameter wie beispielsweise die Anzahl der Spikes und Bursts in einem definierten Zeitraum, die Anzahl der Spikes pro Burst, die Höhe der Amplitude und die Dauer der Bursts. Insbesondere die Spikerate scheint ein sehr wichtiger Parameter zu sein, der durch die Zugabe unterschiedlicher Medikamente und Neurotoxine beeinflusst wird. So konnten wir in ersten Versuchen im Rahmen einer Masterarbeit sehen, dass sich die Anzahl der Spikes durch die Zugabe von Carbamazepin verringert. Dabei handelt es sich um ein Arzneimittel, das vor allem zur Behandlung von Epilepsie eingesetzt wird. Y. Outinen et al. konnten zeigen, dass eine Exposition mit dem Toxin Methylquecksilberchlorid ebenfalls zu einer Abnahme der Spikerate in einem neuronalem Netzwerk führt (Frontiers in Neuroengineering 3, 2010).

Die Auswertung der Daten, die nach den ersten Röntgenexperimenten vorlagen, legen nahe, dass die Funktionalität des neuronalen Netzwerks eine hohe Robustheit gegenüber Röntgenstrahlung aufweist und durch die applizierten Strahlendosen von 1 Gy und 2 Gy (90 kV, 33,7 mA) keine offensichtlich Effekte auftreten. Keiner der untersuchten Parameter, auch nicht die absolute Anzahl der Spikes, scheint durch die Bestrahlung signifikant verändert zu sein.

Weiterhin wurde ein Protokoll für die Aussaat und Kultivierung von kommerziell erhältlichen, humanen iPS (induzierte pluripotente Stammzellen) Neuronen auf den MEA Chips etabliert. Hierbei handelte es sich um zerebrale, kortikale Neurone, die von der Firma Axol Bioscience, Cambridge, GB angeboten werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Zur Verifikation der in Abschnitt 3 beschriebenen Versuche werden weitere Röntgenexperimente mit Kulturen kortikaler, primärer Neurone aus der Ratte auf MEA Chips durchgeführt und elektrophysiologische Parameter der bestrahlten Zellen analysiert. Neben den bisher verwendeten Strahlendosen von 1 Gy und 2 Gy, sollen nun auch Dosen von 0,5 Gy und 7 Gy verwendet werden um das Bild zu vervollständigen. Diese Röntgenexperimente sind als Vorbereitung für die im März 14 geplanten Strahlungs-Experimente mit Kohlenstoff-Ionen an der GSI gedacht.
- Das Protokoll für die Aussaat und Kultivierung der kommerziell erhältlichen humanen iPS Neurone der Firma Axol Bioscience soll optimiert werden.
- Zusätzlich sollen diverse Antikörperfärbungen z. B. gegen Synapsen, Gliazellen und strahleninduzierte Doppelstrangbrüche durchgeführt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Mayer M., Ritter S., Kadereit S., Thielemann C., Electrophysiological Effects of Ionizing Radiation on the Early Prenatal Development in human embryonic stem cells in vitro, Beitrag zur 16. Jahrestagung der GBS 2013, Darmstadt.

Kaiser N., Mayer M., Frohns F., Layer P., Biological Effects of Radiation on the Central Nervous System, as analyzed in Embryonic Chicken Retina (IBER), Beitrag zur 16. Jahrestagung der GBS 2013, Darmstadt.

Frohns F., Mayer M., Durante M., Fournier C., Layer P.G., Effects of heavy ionizing radiation on neuronal development, as analyzed in the retina of chick embryos, GSI-Report 2013-1, p. 440.

Mayer M., Ritter S., Thielemann C., Electrophysiological Effects of Ionising Radiation on Cortical Rat Neurons in vitro, GSI-Report 2014 (noch nicht veröffentlicht).

Mayer M., Kaiser N., Layer P.G., Frohns F., Cell cycle regulation and apoptotic responses of the embryonic chick retina on ionizing radiation, GSI-Report 2014 (noch nicht veröffentlicht).

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 026A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2013 bis 31.12.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.059.340,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Jacob	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziele von PASSOS sind die Modellierung von Gesundheitsrisiken nach Exposition mit ionisierender Strahlung unter Berücksichtigung individueller Risikofaktoren und die Anwendung der Modelle auf Verfahren der Brustkrebstherapie und der Diagnose von Herzerkrankungen. In AP2 und AP3 (HMGU-AMSD) wird die Bestimmung der Dosisverteilung im Körper für unterschiedliche Verfahren der Therapie von Brustkrebs und der Diagnose von Herzerkrankungen für verschiedene Patientengruppen vorgenommen. In AP4 (HMGU-ISS) werden die relativen und absoluten Risiken für Krebs und Herz-Kreislaufkrankungen abgeschätzt. AP5 (HMGU-ISS) erstellt zwei Softwarepakete zur Abschätzung des Risikos von Krebs und Herz-Kreislaufkrankungen nach Strahlenexposition, zum einen beim Vorliegen einer definierten Organdosis, und zum anderen zur Unterstützung der personalisierten Auswahl einer Brustkrebstherapie oder einer Herzuntersuchung.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Für die Dosisverteilung im ganzen Körper nach Anwendung von Therapieverfahren gegen Brustkrebs (AP2) sollen die Partner bei der Erstellung der Patientenmodelle beraten werden. Die Bestimmung der Ganzkörper-Dosisverteilung bei verschiedenen Untersuchungsverfahren des Herzens (AP3) soll patientenspezifisch durchgeführt werden. Dazu sind individuelle biokinetische Modelle zu erstellen, mittels derer die zeitliche und räumliche Verteilung der PET- und SPECT-Tracer in den Organen bestimmt werden kann. Außerdem sind aus den CT-Datensätzen der jeweiligen Patienten individuelle virtuelle Modelle zu erzeugen, um durch Kombination mit Monte-Carlo-Transport-Rechnungen die Dosen in jedem Organ relativ zur Aktivität berechnen zu können (SAFs). Durch Kombination der biokinetischen Modelle mit den SAFs lässt sich sowohl der zeitliche Dosisverlauf jedes Organs des Patienten bestimmen, wie auch dessen gesamte Strahlendosis. Für die Risikomodelle (AP4) werden sowohl empirische Modelle des relativen und absoluten Risikos, wie auch mechanistische Modelle der Pathogenese unter Berücksichtigung individueller Risikofaktoren entwickelt. Es werden Risiken für Herz-Kreislaufkrankungen, für Leukämie und für solide Tumoren in Darm, Lunge, Magen, Schilddrüse, Speiseröhre und weiblicher Brust modelliert. AP5 implementiert die Ergebnisse von AP1-4 in numerisch effizienter Weise als zwei Anwendungen mit graphischer Benutzeroberfläche. Dabei werden neben den Risikowerten auch die entsprechenden Unsicherheitsintervalle berechnet.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen von AP2 wurde von der Universität Mainz beobachtet, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen der gemessenen und der von der Bestrahlungssoftware vorhergesagten Dosisverteilung gibt. Um außerdem die Dosis in den einzelnen Bereichen des Herzens besser ermitteln zu können, wird ein Herzmodell mit höherer als der bisherigen Auflösung benötigt. Anfragen bzgl. geeigneter CT-Aufnahmen wurden bereits an Münchner Kliniken gestellt, und erste Daten werden in Kürze erwartet. Innerhalb des AP3 wurde in verschiedenen Projekttreffen zwischen HMGU-AMSD und der TUM das weitere Vorgehen konkretisiert. So sollen für das weitere Projekt vor allem PET-Messungen mit  $^{18}\text{F}$ -FDG und SPECT-Messungen mit  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI im Rahmen der oben genannten Zielsetzung miteinander verglichen werden. Ein Ethikantrag zur Durchführung der PET-Messungen wurde bereits genehmigt. Ein weiterer Ethikantrag zur Durchführung der SPECT-Messungen ist in der Vorbereitung, hat sich jedoch verzögert. In der Zwischenzeit wurden jedoch grundlegende Fragen bezüglich Abhängigkeit von Patientenparameter und individueller Organdosen anhand einer von der TUM zur Verfügung gestellten und bereits abgeschlossenen Studie untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutliche patientenspezifische Unterschiede bei den durch individuelle biokinetische Modellierung erhaltenen Organdosen.

Das Arbeitspaket AP4 (Risikomodelle) hat ab Monat 7 begonnen, AP5 (Implementierung, Software) fängt ab Monat 25 an. Es wurden Untersuchungen zu Risikomodellen von strahleninduziertem Brustkrebs und Darm durchgeführt und verschiedene deskriptive ERR und EAR Modelle identifiziert. Es wurden mechanistische Modelle für Brustkrebs und Darm untersucht (Kohorte der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki sowie die Schwedischen Hämangioma Patienten). Der Übertrag der strahleninduzierten Risikomodelle von epidemiologischen Kohorten (z. B. japanische Kohorte der Atombombenüberlebenden) auf eine Zielpopulation (Deutschland) wird unter der Annahme eines additiven oder multiplikativen Übertrags modelliert. Da die Form des Übertrags nicht bekannt ist, werden Gewichte für die jeweilige Übertragungsform stochastisch erzeugt. Bei unbekanntem Hintergrundraten kann dadurch dennoch eine Verteilung der Risikowerte erzeugt werden. Diese Methode ist insbesondere für PASSOS von Bedeutung, da die Patienten, die bereits mit einem primären Tumor diagnostiziert sind, ein höheres Risiko für Zweittumoren als die Normalbevölkerung (u. a. auch wegen des Screening-Effekts und der sog. "Reverse causation", siehe z. B. Boice 2013) aufweisen.

JD Boice Jr (2013) Paediatric CT and Recent Epidemiological Studies.

<http://www.icrp.org/docs/John%20Boice%20Paediatric%20CT%20and%20Recent%20Epidemiological%20Studies.pdf>

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im AP2 wurde auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse vereinbart, dass in der AMSD begleitende Monte Carlo Simulationen durchgeführt werden sollen.

Im AP3 ist geplant, weitere Patientendaten für die  $^{18}\text{F}$ -FDG-Messungen zu generieren sowie den Ethikantrag zur Durchführung der SPECT-Messungen erfolgreich voranzubringen. In diesem Zusammenhang muss die Frage geklärt werden, wie ein optimales SPECT-Protokoll aussehen kann, das die im Projekt geforderten Ansprüche genügt.

Die mechanistischen Modelle von Brustkrebs und Darm sollen auf die Qualität der Beschreibung der Daten in verschiedenen epidemiologischen Kohorten untersucht werden, zudem sollen die Parameterwerte biologisch plausibel sein. Die Untersuchungen sollen auf weitere Krebsarten wie Lunge und Magen ausgedehnt werden. Für die Abschätzung der Unsicherheiten sollen sowohl die statistischen Unsicherheiten (Parameterfehler der einzelnen Modelle sowie Korrelationsmatrix) als auch die Modellunsicherheiten berücksichtigt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 026B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2013 bis 31.12.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 795.048,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Blettner	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Vorhaben *Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin* (PASSOS) thematisiert die Frage wie Risiken von Krebs und Herz-Kreislaufkrankungen nach Strahlenexposition von individuellen Faktoren abhängen. Gegenwärtige Abschätzungen von Gesundheitsrisiken, z. B. durch UNSCEAR oder BEIR VII, beschränken sich in der Individualisierung der Risiken auf Geschlecht, Alter bei Exposition und Alter bei Diagnose einer Erkrankung. PASSOS wird, soweit entsprechende epidemiologische und strahlenbiologische Daten vorliegen, weitere Faktoren wie Lebensgewohnheiten, genetische Faktoren, reproduktive Faktoren oder den Gesundheitszustand in der Modellierung des Strahlenrisikos berücksichtigen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

*AP1 (Epidemiologische Studie von Herz-Kreislauftrisiken nach Brustkrebstherapie):* Die sog. PASSOS-Herzstudie ist eine retrospektive Kohortenstudie, die den Zusammenhang zwischen der Strahlentherapie und dem langfristigen Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko durch kardiovaskuläre Herzerkrankungen unter Berücksichtigung individueller Risikofaktoren bei Brustkrebspatientinnen untersucht. Eingeschlossen werden zum einen ca. 11.000 Patientinnen, die im Rahmen der sog. BRENDA-Kohorte (Quality of Breast Cancer Care Under Evidence-based Guidelines, BMBF 01ZP0505) in Ulm bereits rekrutiert worden sind. Am Standort Mainz muss eine Kohorte neu aufgebaut werden. Die gemeinsame Kohorte berücksichtigt Brustkrebspatientinnen mit guter Prognose. Einschlusskriterien: primäres Mammakarzinom, Erstdiagnose 1998 – 2008, keine Metastasen. Phasen der PASSOS-Herzstudie:

- Rekrutierung der Kohorte am Standort Mainz und Erhebung klinischer Daten mittels Krankenakten-Recherche.
- Durchführung eines Mortalitäts-Follow up (Todesursachenrecherche) mit Beobachtungsende zum 31.12.2012.
- Befragung zur kardialen Morbidität und zu individuellen kardiovaskulären Risikofaktoren.
- Dosimetrie (Klinik und Poliklinik für Radioonkologie und Strahlentherapie/Prof. Schmidberger): Bestimmung der Herzdosis (Organdosis) nach Strahlentherapie für eine Stichprobe, Extrapolation für die gesamte Kohorte und Dosis-Wirkungs-Analyse.
- Statistische Analyse und Publikationen.

*AP4 (Personalisierte Risiken für Spätfolgen nach Strahlenexposition):* Ziel ist die Erarbeitung von Risikomodellen, aus denen nach einer Strahlenexposition die zusätzlichen relativen und absoluten Risiken bei vorgegebenen Zeiten nach Exposition sowie die Lebenszeitrisiken bestimmt werden können. Dabei sollen die Risiken sowohl für die wichtigsten (Sekundär-)Tumoren als auch für Herz-Kreislaufkrankungen bestimmt werden. Individuelle Risikofaktoren sollen, soweit Daten in ausreichender Qualität vorhanden sind, in den Modellen berücksichtigt werden. Die Modellierung wird für zwei Dosisbereiche durchgeführt: < 4Gy (Umsetzung Helmholtz Zentrum, Institut für Strahlenschutz) und > 4 Gy für therapeutische Strahlenanwendungen (Umsetzung IMBEI, Mainz).



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Koordinative Arbeiten:

- Konzeption eines Auswertepplans. Einreichung des Datenschutzkonzeptes beim Datenschutzbeauftragten des Landes Rheinland-Pfalz. Einreichung des Studienprotokolls bei der Ethik-Kommission der Landesärztekammer. Organisatorische Vorbereitungen für ein Mortalitäts Follow up. Fertigstellung der Studierendatenbank (ACCESS). Entwicklung eines Kurzfragebogens zur Patientinnenbefragung.
- Aufbau einer Kohorte am Standort Mainz:  
Aktenrecherche im Archiv der Frauenklinik Mainz. Anzahl in die Kohorte eingeschlossener Patientinnen: n=900 (Stand 31.11.2013).
- Dosimetrie (Mainz):  
Ziehung einer zweiten Stichprobe von 100 Patientinnen mit Strahlentherapie, Altersstrata (< 50 J, 50-70 J., > 70 Jahre). Analyse der Stichprobe bezüglich der Behandlungsaspekte Bestrahlung links / Bestrahlung rechts; Dosierung und Fraktionierung; Bestrahlungszeitraum; Strahlenart (Elektronen / Photonen); Zielvolumenkonzepte (nur Mamma / Mamma + Supra / Mamma + Parasternal). Erstellen eines Programms zur automatisierten Auswertung von Eclipse Dosis-Volumen-Histogrammen. Entwicklung einer SOP zur Herzdosisanalyse und Abstimmung mit dem Ulmer Kooperationspartner sowie den Partnern des AP2 (Rostock, Leipzig und München).

AP4: Durchführung von Literaturrecherche.

Erstellen eines Programms zur Simulation realistischer Ereignisdaten. Exemplarische ERR/EAR-Modellierung mit Daten der Atombomben-Überlebenden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Abschluss der Vorarbeiten: Pilotierung des Kurzfragebogens. Entwicklung eines Fragenkataloges für ein telefonisches Interview.
- Fortsetzung der Rekrutierung der Kohorte in Mainz. Prüfung der Vollständigkeit der Kohorte mit Studierendatenbanken der Universitäts-Frauenklinik.
- Mortalitäts Follow up: Start im Januar/Februar 2014.
- Dosimetrie: Vergleich unterschiedlicher Dosisberechnungsalgorithmen (AAA, CC, PB) und Bestrahlungsplanungssysteme und deren Auswirkungen auf die Dosisverteilung im Allgemeinen sowie auf die für die Studie relevanten Parameter. Herzdosisanalyse bei 100 Patienten auf Grundlage der aktuellen SOP. Festlegung der für die Risikoanalyse relevanten Parameter.

AP4: Erstellung einer aktuellen Übersicht zu vorhandenen Studien und Modellen und Durchführung einer systematischen Literaturübersicht (zu Zweittumoren und kardiovaskulären Erkrankungen). Es wird dann mittels publizierter Daten, Simulationen und biologisch plausiblen Argumenten eine geeignete Auswahl von Modellen für die weitere Modellierung vorgenommen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Ulm, Helmholtzstr. 16, 89081 Ulm		<b>Förderkennzeichen:</b> 02 NUK 026C
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2013 bis 31.12.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 283.332,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Wiegel	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel der PASSOS Untersuchungen ist eine personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition im Rahmen einer Brustkrebs-Therapie. Aus epidemiologischen Untersuchungen ist bekannt, dass nach Strahlentherapie der weiblichen Brust ein erhöhtes Risiko von Herzerkrankungen (vor allem Veränderungen an Koronargefäßen und Herzklappen) besteht. Individuelle Vorhersagen - insbesondere mit Berücksichtigung Therapie-unabhängiger Risikofaktoren - sind jedoch bisher kaum möglich.

An den Universitätskliniken in Ulm und Mainz sollen Daten zu Art und Häufigkeit kardiologischer Störungen bei bestrahlten und unbestrahlten Brustkrebspatientinnen erhoben werden, die eine individualisierte Risikoabschätzung sowie die Darstellung der Dosiswirkungsbeziehung zwischen Strahlung und kardiologischen Spätreaktionen erlauben.

Wesentliche Arbeitsschritte nach der rechtlichen Projektfreigabe sind die Identifizierung geeigneter Studienpatientinnen, Kontaktaufnahme zur ergänzenden Dokumentation, Schichtung nach ausgewählten Begleitfaktoren, retrospektive Dosimetrie und die Modellierung der Dosiswirkungsbeziehung.

Die Auswahl der Patientendatensätze für Ulm erfolgt in Kooperation zwischen Universitäts-Frauenklinik und Strahlentherapie. Dabei wird auf die bestehende BRENDA-Studiendatenbank mit 13.300 Patientinnen zurückgegriffen. Entsprechend der PASSOS-Fragestellung werden Follow-up Informationen zentral an der Frauenklinik ergänzt. Die Dosimetrie findet an der Klinik für Strahlentherapie statt. Die Risiko-Modellierung ist Gegenstand von AP4 des Gesamt-Projektes.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1 ist eine retrospektive epidemiologische Studie zu Herz-Kreislaufisrisiken nach Brustkrebstherapie. In Ulm werden ausschließlich Patientinnen aus dem BRENDA Kollektiv eingeschlossen. Die zwischen 1998 und 2008 behandelt wurden und M0 sind. Phasen der PASSOS-Herzstudie am Standort sind:

- Durchführung eines Mortalitäts-Follow up (Todesursachenrecherche) für PASSOS und BRENDA mit Beobachtungsende zum 31.12.2008.
- Befragung zur kardialen Morbidität und zu individuellen kardiovaskulären Risikofaktoren.
- Bestimmung der Herzdosis (Organdosis) nach Strahlentherapie an einer Stichprobe zur Extrapolation auf die gesamte Kohorte und zur Dosis-Wirkungs-Analyse.
- Statistische Analyse und Publikationen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In der aktuellen Berichtszeit wurde in Ulm das Datenschutzkonzept mit der Datenschutzbeauftragten des Universitätsklinikums etabliert. Von datenschutzrechtlicher Perspektive aus ist es nicht notwendig eine explizite Stellungnahme des Landesdatenschutzbeauftragten zu erhalten. Der Umgang mit Todesbescheinigungen ist im § 22 Abs. 4 des Landesgesetzes BW (Gesetz über das Friedhofs- und Leichenwesen) geregelt. Hinsichtlich der Abfrage der genauen Todesursache bei den Gesundheitsämtern ist zu beachten, dass Inhaber des Rechts auf informationelle Selbstbestimmung nur natürliche Personen, d. h. lebende Einzelpersonen sein können und ist deshalb in diesem Zusammenhang unmittelbar (in der PASSOS-Studie) nicht anwendbar. Dennoch unterliegen Todesursachen (bzw. die Einholung dieser Information über Gesundheitsämter) zwar nicht mehr dem Datenschutz, jedoch der ärztlichen Schweigepflicht. Allerdings überwiegt aufgrund der Bedeutung des Forschungsvorhabens, das berechtigte Interesse der Allgemeinheit an der Durchführung des Forschungsvorhabens das Interesse einer verstorbenen Person, dass das über den Tod hinaus gelten-

de Arztgeheimnis gewahrt wird. Die Datenübermittlung seitens der Gesundheitsämter zur Durchführung dieses wissenschaftlichen Forschungsvorhabens ist somit zulässig.

Zusätzlich wurde auch in Kooperation mit Frau Dr. Merzenich der Ethikantrag nach positivem Ethikvotum durch die Universität Mainz eingereicht. Hier gilt es noch einige kleinere Anfragen der Ethikkommission zu bearbeiten. Es wird erwartet, dass in der nächsten Sitzung der Kommission Anfang Februar 2014 die Änderungen diskutiert werden.

Am Standort Ulm und an den Partnerkliniken konnten wir bereits mit dem Mortalitäts-Follow-up durch Anfrage an die Einwohnermeldeämter beginnen. Eine Sonderstellung nehmen die Netzwerkkliniken ein, da patientenbezogene Daten die behandelnde Klinik nicht verlassen dürfen. Somit ist es unabdingbar aus datenschutzrechtlichen Beweggründen den Follow-up für PASSOS Daten dezentral an der jeweiligen Partnerklinik zu erheben und zu erfassen. Die Dokumentarin Frau Schneck koordiniert diese Besuche und führt sie auch selbständig durch. Diese Daten dürfen erst in der Folge in anonymisierter Form an die Studienleitung nach Ulm für BRENDA bzw. Mainz für PASSOS versandt werden.

Ebenfalls in Kooperation mit Frau Dr. Merzenich in Mainz wurden der PASSOS Follow-up Fragebogen vollständig erstellt und der Ethikkommission zur Begutachtung vorgelegt. Die noch lebenden Patientinnen werden diesen nach Mortalitäts-Follow-up erhalten. Es wurde mit der Datenschutzbeauftragten und der Ethikkommission ein Konzept entwickelt, das es ermöglicht, diese Daten von Ulm zentral aus in anonymisierter Form einzupflegen. Es wäre sonst aus datenschutzrechtlichen Gründen unabdingbar gewesen, diese Daten dezentral in Partnerkliniken einzupflegen, was erheblichen Mehraufwand bedeutet hätte.

Zur Nachdokumentation der Komorbiditäten, welche in der retrospektiven BRENDA Studie nur als ASA und NYHA klassifiziert wurden, wurde eine IT-Plattform erstellt, die es ermöglicht den Charleson Score zu erheben. Beim Charleson Score handelt es sich um einen validierten Komorbiditätsscore der letztendlich pro Patientin einen Zahlenwert ergibt. Aus diesen Beweggründen eignet sich der Charleson Score besonders für die Dokumentation der Komorbiditäten für das PASSOS Projekt.

Das Arbeitsprogramm zur retrospektiven Dosimetrie wurde zwischen den Universitätskliniken Mainz und Ulm abgestimmt: Aus digitalen Therapieplänen des Behandlungszeitraums 1998 bis 2008 sollen für je ca. 400 Patientinnen beider Kliniken die Herzdosen bestimmt werden. Da strahlentherapeutische Planungs-CTs ohne Kontrastmittel aufgenommen werden, sind anatomische Details nur eingeschränkt darstellbar. Nach Abschluss der Pilotphase wird nun ein SOP basiertes Verfahren genutzt, um geometrisch-anatomisch definierte Teilstrukturen in Herzen darzustellen. Die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit sind dabei gegenüber einer rein anatomischen Charakterisierung mit starkem Observer-Einfluss deutlich verbessert. Für die Teilstrukturen (z. B. rechte / linke vordere Herzwand; Reizleitungssystem, Herzklappen) und das Gesamtorgan werden Dosis-Volumen-Histogramme (DVH) als Kriterium der Strahlenbelastung aus Photonenfeldern erstellt. Bisher wurden 100 Fälle randomisiert, die Akten gesichtet und die digitalen Archivdaten in das Planungssystem eingelesen. Die 20 im Planungssystem ECLIPSE verfügbaren Datensätze wurden nach SOP konturiert, DVHs erstellt und dem Projektpartner in Mainz zur Verfügung gestellt.

Das Verfahren zur reproduzierbaren Analyse von Elektronenfeldern wird zurzeit bearbeitet.

Abweichungen zwischen Planungs-Programversionen (unterschiedliche Algorithmen zur Dosisbestimmung: Pencil-beam vs. AAA) wurden bei einem Expertengespräch in Oxford (AG Darby) diskutiert. Sie sind relativ zu den durch biologische Bewegungen verursachten Dosisverschiebungen vernachlässigbar.

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

Direkt nach dem Mortalitäts-Follow-up kann mit dem Anschreiben der noch lebenden Patientinnen begonnen werden. Hierzu wird der PASSOS Follow-up Bogen verwendet. Diese Daten werden anschließend zentral in Ulm in anonymisierter Form eingepflegt. Für die bereits verstorbenen Patientinnen werden die Gesundheitsämter angeschrieben um die Todesursache zu ermitteln. Auch diese Anschreiben können erst nach vollständiger Abwicklung des Mortalitäts-Follow-up anlaufen.

Aus den Erfahrungen mit der BRENDA Studie muss für die Erhebung der Daten insgesamt ein Zeitraum von 9-12 Monaten eingeplant werden. Dies gründet vor allem auf der datenschutzrechtlichen Problematik. So wird es notwendig sein, eine Partnerklinik insgesamt 2x zu besuchen (1x Einwohnermeldeamtanschreiben, 1x Gesundheitsamt oder Patientin selbst).

Neben dem Follow-up werden ab Mitte Januar 2014 auch die Komorbiditäten anhand des validierten Charleston Score der Patientinnen der UFK Ulm nacherhoben. Da es sich in der BRENDA Studie um eine retrospektive Studie handelte wurde lediglich der ASA und der NYHA Score erhoben. Die Nachdokumentation erfolgt in Ulm anhand des Anästhesieprotokolles, welches für jede Patientin im Zeitraum 1998-2008 im SAP System der Klinik verfügbar ist.

Nach Komplettierung der Dosimetrie der ersten 100 Fälle wird die Eignung der erfassten Strata für die Risiko-Analyse überprüft. Nach Abklärung durch das IMBEI wird die SOP-basierte Konturierung mit entsprechend geschichteten Fällen weitergeführt.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universitätsmedizin Rostock, Schillingallee 35, 18057 Rostock		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 026D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2013 bis 31.12.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 372.000,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Hildebrandt	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In den S3 Leitlinien für die Behandlung von Brustkrebspatientinnen werden in Abhängigkeit vom Risikofaktorenprofil eine oder mehrere Strahlenanwendungen unterschiedlicher Komplexität empfohlen. Es ist allerdings in verschiedenen Studien gezeigt worden, dass sowohl Krebs als auch Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems nach Strahlenexposition erhöht auftreten. Aktuelle Untersuchungen zeigen zum Teil deutliche Unterschiede der Dosisverteilung bei Bestrahlungsvolumen-nahen Organen, jedoch ist weniger bekannt, wie sich diese unterschiedlichen Techniken hinsichtlich der Dosisverteilung in weiter entfernten Organen unterscheiden. Komplexe Therapieverfahren werden in der Hoffnung eingesetzt bessere Therapieerfolge bei weniger Nebenwirkungen zu erzielen. Zur Bewertung der Langzeitfolgen ist eine genaue Abschätzung der Dosisverteilung notwendig.

Ziel von AP2, das neben der berichtenden Einrichtung vom Universitätsklinikum Leipzig und Helmholtz Zentrum München bearbeitet wird, ist der Vergleich von Dosisverteilungen im Körper durch unterschiedliche Bestrahlungstechniken bei Brustkrebspatientinnen mit guter Prognose unter Berücksichtigung patientenspezifischer und gerätetechnischer Parameter. Dazu sollen (1) Phantome, die wesentliche Parameter der Anatomie einzelner Patientengruppen widerspiegeln, erarbeitet werden; und (2) Bestrahlungsplanungsstudien von (a) 3D-konformalen Bestrahlungstechniken, (b) interstitieller Brachytherapie und (c) intraoperativer Strahlentherapie mittels gängiger Planungssysteme für die Umgebung des Planungsvolumens sowie Dosisvergleichsanalysen mittels Berechnung und Messung an Phantomen für weiter entfernt liegende Organe und Gewebe durchgeführt werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

I: Selektion und Gruppierung der Patienten:

- Festlegung der zu erfassenden klinischen Patientenparameter
- Richtlinien zu Auswahl und Konturierung der einzelnen Organe

II: Auswahl Bestrahlungstechnik und Dosisberechnung:

- Analyse und Auswahl der Dosisberechnungsverfahren für die zu untersuchenden Bestrahlungstechniken
- Messtechnische Evaluation der Präzision des implementierten Dosisberechnungsverfahrens (Collapsed Cone) für die Ermittlung der Organdosen im Bereich der Primärstrahlung
- Erarbeitung und Parametrisierung einer Methodik zur Abschätzung des Doseintrags der Durchlassstrahlung, messtechnische Verifikation an geeigneten Phantomen

III: Patienten-Datenbank:

- Erstellen einer Patientendatenbank der erfassten Parameter
- Prospektive Erhebung der klinischen Daten

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Aufbau Datenbank mit Patientenparametern: Die primäre Datenbank wurde im Excel-Format erstellt und folgende Parameter werden erfasst: persönliche Daten / klinische Parameter / Behandlungsart / physikalische Bestrahlungsparameter

Konturierung der betrachteten Risikoorgane: Folgende Vorgaben zur endgültigen Konturierung des Herzens sowie eine Liste zusätzlicher Risikoorgane wurden festgelegt:

- Herz: standardisierte Konturierung von Herz, Aortenklappe, Pulmonalklappe, Myokard (als 10 mm Ringstruktur), AMT (anterior myocardial territory) links und rechts, Reizleitungssystem (AVH)  
Zusätzlich rechter und linker Ventrikel, rechter und linker Vorhof
- Lunge rechts und links, Ösophagus, Magen, Rückenmark, Plexus brachialis rechts und links, Axilla Level 1-3, Schilddrüse, kontralaterale Brust

Bewertung der Bestrahlungsplanungsalgorithmen: Es wird für jeden konventionellen 3D Plan mit Tangenten mindestens ein IMRT Plan erstellt und dessen Parameter in die Datenbank mit aufgenommen. Des Weiteren wurde an der Klinik für Strahlentherapie Rostock ein Programm entwickelt, welches die NTCP Werte für Herz und Lunge durch die EBRT berechnet (Lyman-Kutcher-Burman und relative-seriality Modelle mit verschiedenen Parametern mit und ohne Volumenabhängigkeit); die hiermit berechneten Komplikationswahrscheinlichkeiten werden in die Datenbank mit aufgenommen; insbesondere sollen die NTCP zusätzlich zu den üblichen Kriterien (wie z. B. V30, V50, mittl., max. Dosis ...) die Qualität der parallel erstellen IMRT Pläne beurteilen und helfen mittels Streudiagramm die NTCP einzelner Pläne in die Gesamtheit aller Pläne einzuordnen. Zusätzlich werden CLD (Central Lung Distance) und MHD (Maximal Heart Distance) bestimmt und in die Datenbank mit aufgenommen.

Phantommessungen für Dosisabschätzung: Erste Messungen haben ergeben, dass das in Rostock (OTP) und Leipzig (RaySearch) verwendete BPS innerhalb des Hauptstrahlenganges die Dosis für verschiedene Pläne (2x 3D-CRT mit/ohne Keile + 2x IMRT) um bis zu 2.5 % (Rostock) und 2.8 % (Leipzig) unterschätzt (zentraler Messpunkt im PTV). Außerhalb des Hauptstrahlenganges überschätzt das BPS der Universität Rostock die Dosis der kontralateralen Mamma je nach Plan im Bereich von 45-87 % je nach Plan und Messpunkt. Das BPS der Universität Leipzig unterschätzt hingegen die Dosis der kontralateralen Mamma um rund 35 %.

In Bezug auf die Messungen in Leipzig und Rostock können folgende Abweichungen des BPS von den Messungen als aktueller ‚buest guess‘ notiert werden:

- Dosis ipsilaterale Mamma: Dosisunterschätzung um 0.5 %...2.8 % (minimale und maximale Abweichung aus Leipziger und Rostocker Daten)
- Dosis kontralaterale Mamma: Dosisüberschätzung um 62 % (Mittelwert aus Abweichung von vier gemessenen und berechneten Plänen – Uni Rostock), bei Uni Leipzig Dosisunterschätzung,
- Dosis Herz: Dosisüberschätzung um 36 % (maximale Abweichung zwischen Messung und BPS anhand Vergleichen mehrerer Pläne und insgesamt drei Messpunkten [anhand Daten Uni Rostock]), bei Uni Leipzig Dosisunterschätzung

→ weitere Absprachen zwischen Leipzig und Rostock innerhalb kommender Wochen für endgültige Angabe der Fehlergrenzen notwendig.

Für Unterschiede zwischen verschiedenen Plänen der Uni Rostock unter alleiniger Betrachtung der Messdaten hat sich ergeben:

- Messpunkte am Herz: Abweichungen von ~45 % zwischen einem konventionellen 3D-CRT Plan mit und einem ohne Keil sowie ~18 % zwischen zwei verschiedenen IMRT Plänen
- Der am nächsten am PTV gelegene Dosismesspunkt im Herzen zeigt eine um das drei- bis vierfach erhöhte Dosis für zwei IMRT Pläne im Vergleich zum konventionellen 3D-CRT Plan.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Geplante Arbeitsschritte zur weiteren Bewertung der Bestrahlungsplanungsalgorithmen: Die Bewertung der Pläne soll über Dosis-Volumenbeziehungen, Statistiken (min, max, avg, median) sowie NTCP und TCP Werte erfolgen. Hierzu werden Parameter aus Publikationen zu den bei Mamma-Bestrahlung relevanten Risikoorganen wie Herz, Lunge, Speiseröhre und Schilddrüse verwendet.

Erweiterte klinische Auswertung: Im Rahmen der Datenerhebung für das PASSOS-Projekt werden neben prospektiv erfassten Patientinnen ebenfalls retrospektiv die o. g. Daten für bereits analog behandelte Patientinnen erhoben, um aufgrund eines längeren Nachsorgezeitraums bereits Aussagen über die klinische Relevanz treffen zu können.

Publikation von ersten Ergebnissen: evtl. Publikationen zu (I) Unterschieden zwischen Pencil Beam und Collapsed Cone bei MammaKa mit statistischen Vergleichen der Dosis an Risikoorganen und deren NTCP Werten sowie (II) Unterschiede zwischen berechneter Dosis in Monaco, OTP und RaySearch Bestrahlungsplanungssystemen im Vergleich zu Monte Carlo Simulationen (in Zusammenarbeit mit Mainz und Leipzig), (III) Vergleich IMRT vs. 3D-CRT für ~100 rechts und linkseitige Brustkrebspatientinnen (Uni Rostock).

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 026E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2013 bis 31.12.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 317.424,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Wolf	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In den S3 Leitlinien für die Behandlung von Brustkrebspatientinnen werden in Abhängigkeit vom Risikofaktorenprofil eine oder mehrere Strahlenanwendungen unterschiedlicher Komplexität empfohlen. Es ist allerdings in verschiedenen Studien gezeigt worden, dass sowohl Krebs als auch Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems nach Strahlenexposition erhöht auftreten. Aktuelle Untersuchungen zeigen zum Teil deutliche Unterschiede der Dosisverteilung bei bestrahlungsvolumennahen Organen, jedoch ist weniger bekannt, wie sich diese unterschiedlichen Techniken hinsichtlich der Dosisverteilung in weiter entfernten Organen unterscheiden. Komplexe Therapieverfahren werden in der Hoffnung eingesetzt bessere Therapieerfolge bei weniger Nebenwirkungen zu erzielen. Zur Bewertung der Langzeitfolgen ist eine genaue Abschätzung der Dosisverteilung notwendig.

Ziel von AP2 ist der Vergleich von Dosisverteilungen im Körper von unterschiedlichen Bestrahlungstechniken bei Brustkrebspatientinnen mit guter Prognose unter Berücksichtigung patientenspezifischer und gerätetechnischer Parameter. Dazu sollen (1) Phantome, die wesentliche Parameter der Anatomie einzelner Patientengruppen widerspiegeln, erarbeitet werden; und (2) Bestrahlungsplanungsstudien von (a) 3D-konformalen Bestrahlungstechniken, (b) interstitieller Brachytherapie und (c) intraoperativer Strahlentherapie mittels gängiger Planungssysteme für die Umgebung des Planungsvolumens sowie Dosisvergleichsanalysen mittels Berechnung und Messung an Phantomen für weiter entfernt liegende Organe und Gewebe durchgeführt werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- I. Selektion und Gruppierung der Patienten:
  - Festlegung der zu erfassenden Patientenparameter
  - Richtlinien zu Auswahl und Segmentierung der einzelnen Organe
- II. Auswahl Bestrahlungstechnik und Dosisberechnung:
  - Analyse und Auswahl der Dosisberechnungsverfahren für die zu untersuchenden Bestrahlungstechniken
  - Messtechnische Evaluation der Präzision des implementierten Dosisberechnungsverfahrens (Collapsed Cone) für die Ermittlung der Organdosen im Bereich der Primärstrahlung
  - Erarbeitung und Evaluierung eines Verfahrens zur Ermittlung von Organdosen bei der interstitiellen Brachytherapie (Monte-Carlo) einschl. messtechnischer Verifikation an geeigneten Phantomen
  - Erarbeitung und Parametrisierung einer Methodik zur Abschätzung des Dosisetrags der Streu- und Durchlassstrahlung, einschl. messtechnische Verifikation
- III. Patienten-Datenbank:
  - Erstellen einer Patientendatenbank der erfassten Parameter

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

I:  
Die Festlegung der in die Untersuchungen einzubeziehenden Risikostrukturen sowie deren Standardisierung der Konturierung sind zusätzlich zu den bereits im vorherigen Zwischenbericht erwähnten dergestalt erweitert worden, dass die Segmentierung des Herzens in Abstimmung mit den Arbeiten im AP1 durchgeführt werden soll.

Die vom API erstellte Anweisung wird derzeit auf die Spezifik und Möglichkeiten des in Rostock und Leipzig vorhandenen Planungssystems angepasst.

II:

Messungen am speziell konstruierten Phantom haben ergeben, dass das in Rostock und Leipzig verwendete BPS (OTP) im Hochdosisbereich die Dosis für verschiedene Pläne (2 x 3D-CRT mit/ohne Keile + 2 x IMRT) um bis zu 2.5 % (Rostock) bzw. 2.8 % (Leipzig) unterschätzt (zentraler Messpunkt im PTV). Außerhalb des Hauptstrahlenganges überschätzt das BPS der Universität Rostock die Dosis der kontralateralen Mamma je nach Plan zwischen 45 und 87 %. Das BPS der Universität Leipzig unterschätzt hingegen die Dosis der kontralateralen Mamma je nach Plan zwischen 32 und 38 %.

In Bezug auf die Messungen in Leipzig und Rostock können folgende Abweichungen des BPS von den Messungen als aktueller ‚buest guess‘ notiert werden:

- Dosis ipsilaterale Mamma: Dosisunterschätzung um 0.5 %...2.8 % (minimale und maximale Abweichung aus Leipziger und Rostocker Daten)
- Dosis kontralaterale Mamma: Dosisüberschätzung um 62 % (Mittelwert aus Abweichung der vier gemessenen und berechneten Pläne - Uni Rostock), bei Uni Leipzig Dosisunterschätzung von drei gemessenen und berechneten Plänen (3D-CRT mit /ohne Keile, IMRT mit FFF-Beams) im Mittel um 23 %
- Dosis Herz: Dosisüberschätzung um 36 % (maximale Abweichung zwischen Messung und BPS anhand Vergleichen mehrerer Pläne und insgesamt drei Messpunkten - Daten nur Uni Rostock), bei Uni Leipzig Dosisunterschätzung im Mittel um 19 % (Mittelwert über alle betrachteten Pläne und 3 Messpunkten im Herzen)

Unterschiede zwischen verschiedenen Plänen der Uni Rostock unter alleiniger Betrachtung der Messdaten haben sich ergeben:

- Messpunkte am Herz: Abweichungen von ~45 % zwischen einem konventionellen 3D-CRT Plan mit und einem ohne Keil sowie ~18 % zwischen zwei verschiedenen IMRT Plänen
- Der am nächsten am PTV gelegene Dosismesspunkt im Herzen zeigt eine um das drei- bis vierfach erhöhte Dosis für zwei IMRT Pläne im Vergleich zum konventionellen 3D-CRT Plan

III.:

- Grundstruktur der Datenbank ist in Abstimmung mit Uni Rostock definiert

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

I.:

- Einbeziehung der Datensätze bereits behandelter Patienten in die Untersuchungen, um die Datenbasis zu verbreitern und die erforderliche Anzahl an Patienten zu realisieren
- Konturierung der Risikostrukturen und Zielvolumina im Planungs-CT für EBRT und für die Brachytherapie
- Untersuchungen zur Übereinstimmung der Ergebnisse der Konturierung in Rostock und Leipzig

II.:

- Ausdehnung der Messungen der Dosisverteilungen im Nutzstrahlenfeld und im erweiterten Streustrahlungsbereich zur Erfassung der Rechengenauigkeit der eingesetzten Planungssysteme auch in anderen Institutionen (Mainz, API)
- Weitere Anpassung der Beam-Modelle im Planungssystem zur Verbesserung der Genauigkeit
- Untersuchungen zur Möglichkeit eines einfachen Konzeptes zur Korrektur der Abweichungen in den Dosisberechnungen außerhalb des Hochdosisbereiches
- Monte-Carlo-Modellierung der Dosisberechnung für die Brachytherapie sowie messtechnische Erfassung der Dosiswerte in den Risikostrukturen
- Ausdehnung der Untersuchungen auf ein weiteres Bestrahlungsplanungssystem, das mit Monte-Carlo-Algorithmen arbeitet
- Registrierung des Planungs-CT für die Brachytherapie mit dem für die EBRT zur einheitlichen Definition von Risiko- und Zielvolumina

III.:

- Start der prospektive Erhebung klinischen Daten und Erfassung in Patientendatenbank

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Ismaninger Str. 22, 81675 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 026F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2013 bis 31.12.2016	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 329.328,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Schwaiger	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Diagnose der koronaren Herzerkrankung ist heute durch den Einsatz ionisierender Strahlung geprägt – durch die Myokard-Szintigraphie, die CT-gestützte Koronarangiographie oder die interventionelle Koronarangiographie mittels Röntgenstrahlung. Für die Zukunft werden darüber hinaus auch multimodale Konzepte (SPECT/CT oder PET/CT) diskutiert. Bei derartigen Untersuchungen werden die Patienten zum Teil erheblichen Strahlenexpositionen ausgesetzt. In diesem Projekt sollen die resultierenden Organdosen zur Abschätzung von Spätfolgen und der personalisierten Optimierung der Untersuchungsverfahren bestimmt werden. Insbesondere der Vergleich der Dosisverteilung für PET-Verfahren wird von Interesse sein, da die kurzlebigen Isotope der PET-Radiopharmazeutika die Strahlenexposition verringern können. Existierende Methoden (z. B. Koronarangiographie) und neue, in der aktuellen Bewertung stehende (PET/CT, Herz-CTA) sollen hinsichtlich der Strahlenexposition und der entsprechenden diagnostischen Aussagekraft vergleichend untersucht werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Auflistung Untersuchungsverfahren, Zuordnung zu Patienten und Fragestellungen, Festlegung der Datenaufnahmeparameter
- Entwicklung von Protokollen für Patientenuntersuchungen zur Einreichung bei Ethikkommission und dem Bundesamt für Strahlenschutz.
- Validierung biokinetischer Modelle, Parameter-Festlegung, Biokinetik, Erstellung personalisierter Modelle
- klinische Evaluation, diagnostische Aussagefähigkeit verschiedener Verfahren
- Berechnung Organdosisverteilungen, Zuordnung klinische Evaluation, statistische Auswertung Aufnahmeparameter



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

Der Ethikantrag für Ganzkörper-PET-MR-Aufnahmen und das Auswerten von Urinproben wurde verfasst, eingereicht und genehmigt. Der Ethik- und BfS-Antrag für Ganzkörper-PET-CT-Aufnahmen und das Auswerten von Urin- und Blutproben wurde verfasst und wird Anfang 2014 eingereicht. Das Untersuchungsverfahren für Ganzkörper-PET-MR-Aufnahmen mit dem radioaktiven Tracer  $^{18}\text{F}$ -FDG wurde optimiert. Ganzkörper-Dosimetriedaten von zwei Patienten wurden akquiriert. Das Aufnahmeverfahren für SPECT-Messungen des radioaktiven Tracers  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI wurde definiert und mit ersten Phantommessungen getestet. Die bereits vorliegenden Daten aus früheren Studien (TIM-1 und TIM-2) werden derzeit in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum München mit Hilfe verbesserter Auswertungsmethoden neu analysiert, um die neue Methode zu evaluieren und die Ergebnisse mit den konventionell ermittelten Dosimetriedaten zu vergleichen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im 1. Halbjahr 2014 werden weitere Ganzkörper-PET-MR- und SPECT-Aufnahmen erstellt, weitere Zeitaktivitätskurven ermittelt und biokinetische Modelle an die Daten adaptiert. Außerdem werden die noch erforderlichen Ethik- und BfS-Anträge eingereicht sowie die Auswertung der TIM-1- und TIM-2-Studie abgeschlossen.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 1.582.482,00 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 TransAqua in sechs Arbeitspaketen Nachwuchskräfte ausgebildet und neue Erkenntnisse auf folgenden Gebieten erarbeitet werden: Verhalten und Ausbreitung von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen, insbesondere Schnee, heterogene Grundwassersysteme sowie Auswirkungen auf Trinkwasserversorgung und Stadtentwässerung, Untersuchungen zur Biokinetik inkorporierter Radionuklide zur Dosisabschätzung. Zusammenarbeiten mit den Verbundpartnern Universität Bremen, Leibniz Universität Hannover, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Karlsruher Institut für Technologie, Technische Universität München, Hochschule Ravensburg-Weingarten, Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf und VKTA Rossendorf sind in den Programmen der jeweiligen Arbeitspakete festgelegt.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm ist in sechs Arbeitspakete (AP) gegliedert. Im Einzelnen haben die AP folgende Themen:

- AP1.2: Transport von Radionukliden von einem Schneefeld in Vorfluter: Bilanzierung am Beispiel des Reintals, Zugspitze (Hürkamp, Tschiersch)
- AP1.3: Das Verhalten von Plutonium in der Schnee-Hydrosphäre (Shinonaga)
- AP2.5: Untersuchung und Bewertung des reaktiven Stofftransports von Radionukliden in heterogenen Grundwassersystemen (Maloszewski, Stumpp)
- AP3.1: Untersuchungen zur Biokinetik inkorporierter Radionuklide aus aquatischen Ökosystemen zur verbesserten Dosisabschätzung (Oeh, Höllriegl, Li)
- AP4.2: Abschätzung der radiologischen Auswirkungen von Nuklearunfällen auf die städtische Trinkwasserversorgung und Stadtentwässerung (Kaiser, Staudt)
- AP5: Ausbildung und Nachwuchsförderung: Forschungsaufenthalte, Austauschprojekte, Sommerschule (Rühm)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.2: Die Vorbereitungen für die Installation eines Schneelabors inkl. Kühlzelle wurden getroffen. Die auf der Zugspitze erhobenen Schneeparameter wurden ausgewertet und graphisch dargestellt. Die Zeitpunkte und Dauer der Sommer-Schneesmelze und damit der Freisetzung potentiell in der Schneedecke enthaltener Radionuklide konnten daraus bestimmt werden.
- AP1.3: Weitere Diskussionen zur Zusammenarbeit mit AP1.5 in Bezug auf chemische Analysen wurden geführt.
- AP2.5: Die Stelle des Arbeitspakets wurde ausgeschrieben und zum 01.01.2014 durch Franziska Rühle besetzt.
- AP3.1: Im September 2013 ist Herr Kamil Brudecki als Post-Doc für das Projekt eingestellt worden. Es folgten ein Operator Trainingskurs für TIMS-Messungen und erste Messungen zur Optimierung des TIMSs. Erste Tests mit einem neuen Chromatographie-Harz zur Abtrennung von Cer aus biologischen Proben werden durchgeführt.
- AP4.2: Es wurden potentielle Kontaminationsereignisse von für die Trinkwasserversorgung genutzten Wasserressourcen definiert und die Transportpfade von Radionukliden in der Trinkwasserversorgung identifiziert. Daraus wurden relevante Parameter und Szenarien zur Modellierung identifiziert und aus der bestehenden Literatur gesammelt. Beispielszenarien für den Radionuklidtransport in Trinkwasserverteilungssystemen wurden in EPANET implementiert. Aus diesen Daten soll eine Risikobewertung für den Fall eines Eintrages von Radionukliden in Oberflächengewässer entwickelt werden. Mit dem IUP der Universität Bremen wurden in einem Treffen potentielle Kooperationsfelder abgesprochen.
- AP5: Vom 11.8. bis 23.8.2013 fand in Bad Honnef am Physikzentrum der Deutschen Physikalischen Gesellschaft die WE-Heraeus Physikschule zum Thema „Ionising Radiation and the Protection of Man“ statt. Diese Veranstaltung war auch offen für Mitglieder des TransAqua-Projekts des KFVS. Es nahmen drei Personen teil, die im Rahmen von AP5 über Mittel des TransAqua-Projekts gefördert wurden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Akquirierung zur Stellenbesetzung wird weiter vorangetrieben. Die Arbeitspakete werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans abgearbeitet.

Eine Homepage für das Verbundprojekt wurde unter <http://transaqua.helmholtz-muenchen.de> eingerichtet. Sie beinhaltet eine Vorstellung des Verbundes und der Teilprojekte und wird in Zukunft fortlaufend mit News, Terminen sowie neuen Publikationen aktualisiert.

- AP2.5: Die Versuche werden im Labor aufgebaut. Nach einer Literaturrecherche werden die zu untersuchende Radionuklide ausgewählt und die die Durchführung der Versuche weiter geplant.
- AP3.1: Weitere Optimierungsarbeiten zur TIMS-Messung und chemischer Auftrennung von Cer. Erste Messungen von biologischen Proben.

### 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 030B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 164.749,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Breustedt	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Radionuklide im Trinkwasser und die daraus resultierenden Strahlenexpositionen können eine Gefährdung für die Bevölkerung darstellen. Dies gilt sowohl für Anreicherungen natürlicher Radionuklide im Trinkwasser als auch für den Eintrag anthropogener Radionuklide nach deren Freisetzung. Im Arbeitspaket 2.1 „Entwicklung eines Detektors zum empfindlichen Online-Nachweis von Radionukliden im (Trink-)Wassernetz“ soll ein Detektorsystem entwickelt werden, mit dem Radionuklide im Trinkwasser empfindlich nachgewiesen werden. Algorithmen für die Online-Analyse sollen entwickelt werden um einen Dauerbetrieb des Detektorsystems als Aktivitätsmonitor zu ermöglichen. Die Arbeiten erfolgen in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern. So sollen z. B. mit Hilfe der Kollegen aus AP3.1 „Untersuchung zur Biokinetik inkorporierter Radionuklide“ die für den sicheren Nachweis vorgegebener Dosiswerte notwendigen (Aktivitäts-)Nachweisgrenzen des Detektorsystems für ausgewählte Radionuklide ermittelt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Arbeitspaket 2.1 ist in drei Teilschritte unterteilt:

- *Design des Detektors:* Test und Auswahl verschiedener Detektormaterialien. Ein modernes akkreditiertes Messlabor zur Analytik von Radionukliden kann dabei in vollem Umfang genutzt werden. Endgültiges Design und Optimierung für das Detektormaterial und die Messgeometrie erfolgen durch die Simulation des Strahlungs- und Lichttransports
- *Aufbau eines Prototypen:* Test und Optimierung unter Laborbedingungen. Nach der Entwicklung von Analysealgorithmen zur getrennten Erfassung von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung sowie der Anpassung von zum Teil vorhandener Standardelektronik für den online Betrieb, sollen erste online Messungen in einem Testsystem erfolgen.
- *Test und Bewertung des Systems:* Der Test des Systems soll in einem simulierten Wassernetz unter verschiedenen Szenarien erfolgen. Dabei werden für ausgewählte dosisrelevante Nuklide auch die erreichbaren Nachweisgrenzen experimentell bestimmt. Die Ermittlung der zu betrachteten Radionuklide und der Dosisfaktoren erfolgt in Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern (z. B. AP3.1).

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

- Da noch kein Projektbearbeiter eingestellt ist, gibt es im Berichtszeitraum keine durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse.
- Die Suche nach einem geeigneten Projektbearbeiter wurde erfolgreich abgeschlossen, die Einstellungsformalitäten im KIT werden bearbeitet.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Der ausgesuchte Projektbearbeiter wird eingestellt und kann die Arbeiten im ersten Halbjahr 2014 aufnehmen.
- Der Meilensteinplan bleibt in der genannten Form bestehen, lediglich der Beginn der Arbeiten wird auf einen späteren Zeitpunkt verschoben. Der Abschluss des Projektes in der Verbundlaufzeit ist möglich.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 398.304,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Büchel	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das hier vorgestellte Teilprojekt soll einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Freisetzung, des Transports und der Immobilisierung der Radionuklide im System Gestein/Wasser liefern. Die möglichst genaue Kenntnis der beteiligten hydrogeochemischen und mikrobiologischen Prozesse trägt gezielt zur Reduzierung des negativen Einflusses der Radionuklide auf das Trinkwasser bei. Das Teilprojekt setzt unmittelbar bei den Verbund-Schwerpunkten „Verständnis der hydrogeochemischen und biologischen (mikrobiellen) Prozesse bei der Freisetzung und beim Transport von Radionukliden“ sowie „Bewertung der Sensitivität von unterschiedlichen Reservoirs in den Kompartimenten Grundwasser und Trinkwasser“ an. Die gewonnenen Ergebnisse bzgl. Radionuklideinträge lassen Abschätzungen zu den Prozessen in fluvialen Systemen und Abwassersystemen zu. Damit werden die in den ersten Förderrunden des BMBF begonnenen Kooperationen zwischen der Friedrich-Schiller-Universität Jena mit anderen Hochschulen und Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft intensiviert.

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses anhand konkreter Forschungsprojekte und die Einbindung in die forschungsorientierte Lehre an der Universität im Rahmen der Studiengänge B.Sc. und M.Sc. Biogeowissenschaften leistet einen erheblichen Beitrag zum Kompetenzerhalt in der Radioökologie.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Es werden drei wichtige Lithotypen untersucht:

AP1: Grundwasser-führende Gesteine des Mittleren Buntsandsteins (z. B. Umgebung von Jena und Eichsfeld). Sie stellen einen der wichtigsten Grundwasser-Aquifere in Deutschland und darüber hinaus dar. Die Grundwässer enthalten häufig erhöhte Urangelhalte ( $> 10 \mu\text{g/L}$ ).

AP2: Tiefenwasser-führende Rhyolithe (z. B. Kreuznacher Rhyolith, Saar/Nahe-Gebiet). Sie enthalten neben Uran auch Radium und sind für Radon-Emanation bekannt.

AP3. Oberflächennahe Grundwasser-führende Schwarzpelite bzw. Schiefer. Sie sind für hohe Radionuklid-, u. a. Uran- und Radiumgehalte und hohe Emanationsraten bekannt.

In den geplanten Untersuchungen wird auf der einen Seite die Mineralogie der Festkomponenten und auf der anderen Seite die Hydrochemie und die Mikrobiologie der aus dem Gestein stammenden Grund- und Tiefenwässer bestimmt und in Relation zu den Lithotypen gesetzt. An den Gesteinsproben sind parallel Laborversuche (Batch- und Säulenexperimente) geplant. Aus den Ergebnissen können konkrete Hinweise auf die vorherrschenden Prozesse der Radionuklidmigration gewonnen werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die in Unterbreizbach/Thüringen im mittleren Bundsandstein abgeteufte Bohrung dient als Forschungsgrundlage, um eine mögliche Beeinflussung des Hauptgrundwasserleiters durch Haldenwässer der ESTA-Rückstandshalde Hattorf näher zu untersuchen. Im Auftrag der K+S GmbH wurde bereits im Vorfeld das Bohrloch mittels Gamma-Ray-Log auf radioaktive Gesteinsschichten untersucht. Anhand lithologischer Aufnahmen und Messungen der magnetischen Suszeptibilität konnte ein Wechsel zwischen tonigen und sandigen Gesteinsschichten am Bohrkern nachgewiesen werden. Mit Hilfe eines Totalaufschluss-Verfahrens konnten sowohl in den oberen Bereichen des Bohrkerns, als auch in einer Tiefe von 54,40 m erhöhte Thorium- (31 µg/g) und Uran-Konzentrationen (7 µg/g) nachgewiesen werden (Bartsch, M., 2013; unveröffentlicht).
- AP2: Nach einer umfangreichen Literaturrecherche wurde das Grundwasser verschiedener Kreuznacher Mineralbrunnen physikochemisch, hydrochemisch und mikrobiologisch untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Urankonzentrationen (0,05-0,29 µg/L) vergleichsweise niedrig sind. Für weitere Interpretationen wurde zudem als Analoga für die Actinide, die Lanthanide (La-Lu) aus der Wasserphase angereichert. Hinsichtlich der mikrobiologischen Charakterisierung konnten aus den Grundwässern der Brunnen durchschnittlich je 30-40 Stämme kultiviert werden. Phylogenetische Untersuchungen wiesen auf eine teilweise geringe mikrobielle Diversität hin. Weiterhin wurden die Isolate auf die Produktion von Siderophoren getestet, da diese möglicherweise die Mobilität von Radionukliden beeinflussen können.
- AP3: Für die Untersuchung der in der Schmiedefelder Bergbauregion gelegenen Schauberghöhle „Morassina“ erfolgte zunächst eine ausführliche Literaturrecherche sowie die Planung der folgenden Probenahmen. Darauf basierend wurden Fragestellungen klar definiert sowie die grundlegende hydrochemische Kartierung geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Im weiteren Verlauf sollen bereits angefertigte Dünnschliffe auf deren geochemische Zusammensetzungen untersucht werden. Um Radionuklideinträge eindeutiger zu quantifizieren soll im Anschluss das Grundwasser dieser Bohrung physiko- und hydrochemisch analysiert werden. Basierend auf den erhöhten Radionuklid-Konzentrationen soll das Grundwasser ebenfalls mikrobiologisch untersucht werden.
- AP2: Zeitnah soll ein weiterer Grundwasserbrunnen in Bad Kreuznach mit der zuvor beschriebenen Methodik untersucht werden. Die gewonnenen Daten werden mit den vorab erzielten Ergebnissen verglichen. Ein weiteres Ziel stellt die Detektion der aktuellen Radongehalte in den Grundwässern vor Ort dar. Weiterhin soll das Wirtsgestein geochemisch auf Radionuklide hin untersucht und mineralogisch charakterisiert werden.
- AP3: Die im vorangegangenen Zwischenbericht geplanten Weiterarbeiten stehen weiterhin im Vordergrund. Dazu zählen die geochemische Charakterisierung der Bodenphase im Bergwerk sowie die physiko- und hydrochemische Kartierung der austretenden Sickerwässer. Anschließend sollen Überlegungen angestellt werden an welchen Probenahmestellen in der Höhle „Morassina“ mikrobiologische Untersuchungen möglich sind.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bartsch, M. (2013): Geochemische Vorbetrachtung der Bohrung GWM 24/2012 Hattorf. Projektmodulbericht Friedrich-Schiller-Universität Jena. Unveröffentlicht.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 317.916,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Riebe	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Freisetzung von Radionukliden aus kerntechnischen Anlagen im Rahmen zulässiger Emissionen führt zu einer diffusen Belastung von großräumigen Reservoirs wie der Atmosphäre, den Ozeanen und Binnengewässern und der Böden. Im Rahmen des Verbundprojektes „Strahlung und Umwelt III: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen (TransAqua)“ wird im vorliegenden Arbeitspaket die Sensitivität von Trinkwassergewinnungsgebieten – einem nicht überdeckten Grundwasserleiter und zweier Talsperren – gegenüber dem Eintrag von künstlichen Radionukliden untersucht. 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: Zusammenstellung der Kenntnisse über Stoffkreisläufe (Stoffflüsse, Inventare, Austauschzeiten, Reaktionen)
- AP2: Organisation der Probenahme, Einrichtung der Messstellen
- AP3: Entnahme von Gewässer-, Sediment- und Bodenproben
- AP4: Vorbereitung der Proben für die Analyse (radiochemische Trennung etc.)
- AP5: Messungen (LSC/AMS/ICP-MS/Gammaspektrometrie), Auswertung der Ergebnisse
- AP6: Modellierung, Langzeitsicherheitsanalyse



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Mit den theoretischen Vorarbeiten zu den Stoffkreisläufen der Elemente H, C, Cl, Sr, I, Pu, und der Einordnung der Radionuklide  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$  in diese Kreisläufe ist begonnen worden.
- AP3: Aus zwei der von der BGR eingerichteten Multilevel-Messstellen wurden Wasserproben für die Etablierung der Analyse- und Messverfahren entnommen. Hierbei handelt es sich um Proben die, bezogen auf den Grundwasserstrom, vor bzw. hinter dem Wasserwerk Fuhrberg gewonnen wurden. An beiden Messpunkten wurde Wasser aus 3 m und 14 m Tiefe gepumpt.
- AP4: Erste Schritte zur Etablierung der benötigten Messverfahren sind unternommen worden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterführung der theoretischen Vorarbeiten zu den Stoffkreisläufen der Elemente H, C, Cl, Sr, I, Pu, und der Einordnung der Radionuklide  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$  in diese Kreisläufe.
- Mit einsetzendem Frühjahr ist die Entnahme von Grundwasserproben im Fuhrberger Feld aus unterschiedlichen Tiefen geplant. Weiterhin ist vorgesehen, im gleichen Gebiet Bodenproben zu gewinnen, sowie Wasser- und Sedimentproben aus ausgewählten Vorflutern.
- Fortsetzung der Etablierung der Analyseverfahren, sowie Vorbereitung der ersten Proben zur Messung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030E</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 140.292,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Schönert	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel ist es eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, anthropogene, langlebige Spaltprodukte und zusätzlich Plutoniumisotope in derselben Probe in aquatischen Ökosystemen nachzuweisen und ihre Ausbreitung zu verfolgen. An den verschiedenen Messplätzen der Beschleuniger-Massenspektrometrie am Münchner Tandem Beschleuniger sollen dazu dedizierte Tests durchgeführt werden, die durch numerische Simulationen begleitet werden sollen. Als Anwendung sollen in Schneeproben zum einen Profile von Spaltnukliden und zum anderen Plutonium-Profile bestimmt werden. Zudem sind geplant erstmals Radionuklidkonzentrationen in Schnee-, Wasser- und Regenwasserproben zu bestimmen. Diese Arbeiten stellen einen ersten Schritt zur Quantifizierung des globalen Inventars der oben genannten Nuklide dar.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Um die unterschiedlichen Methoden zu optimieren, sind sehr umfangreiche Messungen nötig. Diese umfassen sowohl die Optimierung und Bestimmung der geeigneten negativen Molekül-Ionen zur Isobaren-Unterdrückung als auch der effizienten Ausbeute. Detaillierte Simulationsrechnungen müssen dabei zu allen Schritten der Isobaren-Trennung bei den beschleunigten Ionen durch Absorber bzw. Magnete durchgeführt werden, um die optimalen Parameter zur isobarischen Trennung zu finden.

Ressourcen: Beschleuniger mit AMS Anlage (Flugzeitmessung, Gasgefüllter Magnet, Q3D Spektrograph), chemisches Labor und Rechneranlage sind vorhanden.

Entsprechend der Fortschritte werden Messungen an Schneeproben durchgeführt.

Geeignete Schneeproben werden parasitär in enger Zusammenarbeit mit AP1.3 uns zur Verfügung gestellt.

Die Arbeitsgruppe, in der die Arbeiten durchgeführt werden sollen, besteht aus auf dem Gebiet der AMS erfahrenen Wissenschaftlern sowie aus Doktoranden.

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

Das Projekt wurde ab 01.06.2013 bewilligt. Nach intensiver Suche nach einem geeigneten Doktoranten für dieses Projekt hat sich inzwischen ein Kandidat herauskristallisiert, der zu Beginn 2014 eingestellt werden soll. Es konnten bereits erste Testmessungen durchgeführt werden, die zum einen der Kontrolle zur Pu Chemie und zum anderen zur Bestimmung der Trennung der Pu Isotope mittels der Beschleuniger-Massenspektrometrie dienen. Die Ergebnisse waren sehr vielversprechend; weitere Messungen sind Anfang 2014 geplant.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Entsprechend des Antrages sind die Weiterarbeiten geplant.

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

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. v., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030F</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 596.288,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Arnold	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der vorgeschlagene Kompetenzverbund „Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen“ hat zum Ziel, die Abschätzung von Strahlenexpositionen über aquatische Ökosysteme und die damit einhergehende Dosisermittlung für den Menschen zu verbessern. Durch multidisziplinäre Zusammenarbeit sollen die verschiedenen Aspekte des Eintrages, des Transportes und der Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächen-, Grund-, Trink- und Abwasser sowie in fluviale oder limnische Sedimente, des Transfers an Grenzflächen in biologisches Material und in die Nahrungskette bis hin zu biokinetischen Stoffwechselmodellen der Radionuklide im Menschen zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können Maßnahmen bei Störfällen kerntechnischer Anlagen, zur Sanierung von Altlasten und bei Betrieb von Anlagen, die natürliche Radionuklide durch ihre Prozessführung anreichern (TENORM), abgeleitet werden. Es ist beabsichtigt, die in den ersten Förderrunden des BMBF begonnene Kooperation zwischen Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft und Hochschulen fortzusetzen und durch verstärkte Vernetzung zu intensivieren. Damit wird auch die Erfüllung der Zielstellungen des Kompetenzverbundes, Forschungsarbeiten unterschiedlicher Disziplinen auf einen gemeinsamen Schwerpunkt zu bündeln - hier der Radionuklidtransfer in aquatischen Ökosystemen - sowie durch moderne Fragestellungen einen effizienten Wissenstransfer und nachhaltigen Kompetenzerhalt auf den Feldern der Strahlenforschung zu erreichen, vorangetrieben. Das Vorhaben ist thematisch in fünf Teilprojekte gegliedert, wobei das hier vorliegende im Teilprojekt drei „Biokinetik“ und vier „kontaminierte Wässer“ angesiedelt ist. Das Institut für Ressourcenökologie des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf bearbeitet innerhalb des Teilprojekts 3 das AP „Spektroskopische Bestimmung der Bindungsform (Speziation) trivalenter Actinide/Lanthanide in Biofluiden des menschlichen Gastrointestinaltraktes und im Blut“ und im Teilprojekts 4 das AP „Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen unter Tage lebenden Mikroorganismen mit Uran und deren Einfluss auf das Migrationsverhalten von Uran in gefluteten Urangruben“. 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

AP3.2:

- Modellierung der Speziation von Ln(III)/An(III) in natürlichen Wässern
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Eu(III) und Cm(III) im Gastrointestinaltrakt
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Eu(III) und Cm(III) im Blut
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Ce(III) im Urin

AP4.3:

- Anziehen von Reinkulturen und Durchführung von Bioakkumulationsexperimenten
- REM und TEM Untersuchungen
- Untersuchungen mit der zeitaufgelöste Laser Fluoreszenz Spektroskopie und Anfärben der Zellen
- Konfokales Laser Scanning Mikroskop kombiniert mit der Laser induzierten Fluoreszenz Spektroskopie
- Dokumentation: Technische Berichte, Zwischenberichte, Abschlussberichte

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde eine Auswahl der im Rahmen des Projektes zu untersuchenden Mikroorganismen getroffen und erste Voruntersuchungen durchgeführt. Bei der Auswahl bezog man sich auf die Ergebnisse aus der Promotionsarbeit von Frau Isabel Zirnstein, die im Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II in Grubenwässern des ehemaligen Uran-Bergwerks Königstein/Sachsen der WISMUT GmbH die mikrobielle Diversität mittels CARD-FISH, PCR und Pyrosequenzierung bestimmte. Vor der Flutung war ein breites Spektrum von Arten der Gruppen Flagellaten (*Bodo saltans*), Ciliaten, Amoebozoa (*Vannella*, *Vahlkampfia*), Rotatoria, Fungi etc. in den unter Tage-Biofilmen detektiert worden. Für das Verbundprojekt Strahlung und Umwelt III wurde *Bodo saltans* als Vertreter der Gruppe der Flagellaten, *Acidocella aromatica* ( $\alpha$ -Proteobakterium) und *Ferroplasma acidiphilum* als Vertreter der acidophilen Archaeen ausgewählt. Nach langen Recherchen war es möglich, *Bodo saltans* Kulturen von der Arbeitsgruppe von Dr. Antonis Chatzinotas (Mikrobielle Systemökologie) der Abteilung Umweltmikrobiologie des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung - UFZ in Leipzig zu erhalten.

*Acidocella aromatica* und *Ferroplasma acidiphilum* wurden bei der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH (DSMZ) angefordert. Um *Bodo saltans* Kulturen am Leben zu erhalten, werden diese in einem mineralischen Nährmedium zusammen mit dem Futterbakterium *Acidovorax* und den für dessen Wachstum nötigen Weizenkörnern bei einem pH von 7.2 bei 15 °C aufbewahrt. Zusätzlich wachsen Kulturen in einem aus Fleisch- und Hefeextrakt bestehenden mineralischen Nährmedium (NSY) bei 25 °C – 30 °C. Diese werden wöchentlich 1:10 überimpft, um eine große Anzahl an neuen Kulturen zur Verfügung zu haben. Als Vorbereitung für Untersuchungen zur Wechselwirkung mit Uran werden *Bodo saltans* Kulturen auf eine schrittweise pH-Erniedrigungen des Nährmediums um 0.5-Einheiten (6.5, 6.0, 5.5, 5.0, 4.5, 4.0, 3.5) eingestellt. Für *Bodo saltans* Kulturen mit einem pH von 7.0 und 6.0 wurden bereits Wachstumskurven erstellt und zusätzlich durch die Färbung der Mikroorganismen mit SYTOX 59/SYTOX BLUE oder ViaGram Red der Nachweis des lebend/tot-Verhältnisses mittels Konfokaler Laser Scanning Mikroskopie erbracht. Erste Bioakkumulationsversuche mit Uran wurden bereits im neutralen pH-Bereich durchgeführt. Hierbei wurden die *Bodo saltans/Acidovorax* Suspension bei 3500 rpm für 10 Minuten zentrifugiert. Danach wurde der Überstand entfernt. Das Pellet wurde mit autoklavierten H<sub>2</sub>O gewaschen und mit 30 mL H<sub>2</sub>O versetzt. Bei den darauffolgenden Sorptionsversuchen wurde UO<sub>2</sub>(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>-Lösungen eingesetzt, um Uran-Ausgangskonzentrationen von  $1 \times 10^{-5}$  M,  $5 \times 10^{-5}$  M und  $1 \times 10^{-4}$  M zu erreichen. Die Sorptionsdauer betrug 48 h. Nach Beendigung der Experimente und anschließender Ultrazentrifugation standen die Überstände für ICP-MS Analysen zur Verfügung. Die Biomasse wurde kryogetrocknet und ebenfalls analysiert.

Aufgrund längerer Krankheit der Teilprojektleiterin Dr. A. Barkleit konnte mit AP3.2 im Jahr 2013 noch nicht begonnen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP4.3:

Es ist angestrebt, eine große Biomasse (0.1 - 0.2 g dry weight L<sup>-1</sup>) von den Kulturen zu produzieren. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus den Wachstumskurven sollen die Idealbedingungen nach verschiedenen Versuchsreihen abhängig von Temperatur, pH und Komposition des Nährmediums eruiert werden. Da die *Bodo saltans* Kulturen auch das Futterbakterium *Acidovorax* enthalten, sollen Bioakkumulationsversuche mit *Bodo saltans* Kulturen mit und ohne das Futterbakterium *Acidovorax* durchgeführt werden. Das Letztere setzt eine Abtrennung durch Filtration vor Zugabe der Uranyl-Lösung voraus. Für mikroskopische Untersuchungen werden nach den Experimenten *Bodo saltans* Kulturen für rasterelektronenmikroskopische (REM) und transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Untersuchungen präpariert.

Die von der DSMZ zugesandten Flüssigkulturen der Stämme *Acidocella aromatica* und *Ferroplasma acidiphilum* sollen in sauren Nährmedien (pH = 3.5, bzw. 1.7) kultiviert werden. Es handelt sich bei diesen Stämmen naturgemäß um acidophile Organismen. Nach der Kultivierung der Stämme sollen geeignete Nährmedien für die geplanten Untersuchungen zur Wechselwirkung von Uran mit diesen Mikroorganismen eruiert werden. Im Anschluss daran werden Proben zur Kontrolle der optischen Dichte mittels Photometrie untersucht. Geeignete Proben werden anschließend für erste Sorptionsuntersuchungen mit U-Konzentrationen von  $1 \times 10^{-5}$  M,  $5 \times 10^{-5}$  M und  $1 \times 10^{-4}$  M verwendet.

AP3.2:

- Modellierung der Speziation von Eu(III) in natürlichen, kontaminationsgefährdeten Wässern
- Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Biofluide im Gastrointestinaltrakt
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Eu(III) im Magensaft

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. v., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030G</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 326.236,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Hampe	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

$^{226}\text{Ra}$  und  $^{228}\text{Ra}$  sind für die Ingestion von Trinkwasser als expositionsrelevante Nuklide zu berücksichtigen. Außerdem werden sie zur Untersuchung von Transport- und Austauschprozessen im Ozean herangezogen. In hochsalinen Fluiden aus der Nutzung tiefer geothermischer Quellen sind  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  und  $^{224}\text{Ra}$  mit Aktivitätskonzentrationen von einigen  $10 \text{ Bq l}^{-1}$  beobachtet worden.

Die Freisetzung von Radium aus dem Gestein in die flüssige Phase erfolgt sowohl durch chemische als auch physikalische Prozesse. Um den Einfluss des Alpharückstoßes zu quantifizieren und von den chemischen Vorgängen zu unterscheiden, werden hier geeignete Laborexperimente durchgeführt. Dabei werden das Grenzflächensystem Aquifergestein-Fluid durch geeignete Bohrkerne aus Porenspeichern, realen hydrothermalen Tiefenwässern sowie Modellwässern abgebildet und im Experiment verschiedene apparative und chemische Parameter variiert. Der physikalischen, mineralogischen und (radio-)chemischen Charakterisierung der Bohrkerne folgen Experimente unter Variation von Druck, Temperatur und chemischer Zusammensetzung der wässrigen Lösungen in Anlehnung an verschiedene Typen von Gesteins-, Grund- bzw. Tiefenwasser-Systemen. Nach definierten Verweilzeiten werden in den wässrigen Lösungen  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  und  $^{222}\text{Rn}$  mit Hilfe radiochemischer Analysemethoden sowie die Elementzusammensetzung analysiert. Innerhalb des Verbundprojektes ist eine Zusammenarbeit mit AP2.4 geplant. Weitere Vernetzungsmöglichkeiten bestehen zu AP2.2.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben umfasst folgende Teilaufgaben:

- 1) Nach intensiver Recherche und Studium einschlägiger Literatur auf hydrogeologischem, kernphysikalischem und radiochemischem Gebiet sind von dem Doktoranden geeignete Experimente zur Beobachtung des Radiumtransfers aus Gesteinen ins Wasser zu konzipieren.
- 2) Zur Durchführung von Versuchen unter Variation von Druck und Temperatur ist eine Druckzelle oder ein Autoklavensystem aufzubauen und hinsichtlich konstanter Versuchsbedingungen zu testen.
- 3) Um die experimentellen Daten auf reale hydrogeologische Aquifergestein-Fluid-Systeme übertragen zu können, sind reale Bohrkerne aus Porenspeichern sowie hydrothermale Tiefenwässer zu beschaffen und physikalisch, mineralogisch und (radio-)chemisch zu charakterisieren.  
Die Versuchsdurchführung beinhaltet die Variation von Druck, Temperatur, Laufzeit und chemische Zusammensetzung der wässrigen Lösungen sowie die Bestimmung verschiedener chemischer und radiologischer Parameter mithilfe radiochemischer Trenn- und Messmethoden.
- 4) Mit den experimentellen Daten werden zum einen Vergleiche schon durchgeführter Modellrechnungen zur Erklärung der Radiumgehalte in hochsalinen Fluiden aus der Geothermie und zum anderen Optimierungen und Verbesserungen eines darauf basierenden Prognosemodells erarbeitet.
- 5) Die Ergebnisse der experimentellen und modelltheoretischen Untersuchungen werden sowohl im Rahmen einer Promotionsarbeit als auch in einem Abschlussbericht gegenübergestellt sowie Auswertungen und Schlussfolgerungen zusammengefasst.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen der Ausschreibung einer Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter wurden die Bewerbungsunterlagen gesichtet und mehrere Bewerbungsgespräche geführt. Zum 02. September 2013 wurde Dipl.-Chem. Norman Dietrich als wissenschaftlicher Mitarbeiter eingestellt.

Im Rahmen der Einarbeitung des neuen Projektmitarbeiters erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche, welche neben der Thematik Hydrogeologie, die Bereiche der radiochemischen Grundlagen, der Radioanalytik und des Alpharückstoßes umfasste. Hohe Radiumaktivitäten, aber auch hohe Konzentrationen an Calcium, Barium und Strontium, vorrangig in hochsalinen Thermalwässern festgestellt. Durch die vorherrschenden Bedingungen am Entnahmehorizont (hoher Druck, Temperatur und Salzgehalt) wird die Löslichkeit der Minerale dieser Elemente (besonders der Sulfate) erhöht oder eine Übersättigung stabilisiert. Dadurch wird auch die Bildung von Mischkristallen mit Radium unterdrückt. Diese Stabilität von Radium im Fluid ist eine Grundannahme für Aussagen zur möglichen maximalen gelösten Aktivitätskonzentration durch den Alpharückstoß. Den bei Alphaumwandlungen freigesetzten  $^4\text{He}$ -Kerne stehen der Impulserhaltung entsprechend Tochterkerne mit entgegengesetztem, gleich großen Impuls gegenüber. Diese Rückstoßkerne werden im Gestein abgebremst und erreichen mittlere Reichweiten im nm-Bereich. In Oberflächennähe des Gesteins können die Rückstoßkerne in das Fluid übergehen.

Durch die Bearbeitung ausgewählter radioanalytischer Fragestellungen wurden praktische Erfahrungen im Labor gewonnen, welche für die spätere Versuchsdurchführung wichtig sind.

Zusätzlich zum Literaturstudium und zur praktischen Einarbeitung fand ein Erfahrungsaustausch mit dem GFZ Potsdam (Kompetenzcluster Geothermische Fluide) statt. Es wurden sowohl die Geothermieforschungsanlage in Groß Schönebeck als auch die Laborversuchsstände am Standort Potsdam besichtigt und Anregungen für die notwendige Versuchsinfrastruktur gewonnen.

Für die Versuche zur Fluid/Gesteins-Wechselwirkung wird die Nutzung eines Autoklavensystems angestrebt. Unter Beachtung der notwendigen Anschlüsse und des Korrosionsverhaltens der verwendeten Materialien wurde die Beschaffung des Autoklavensystems initiiert.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- 1) Das Literaturstudium wird hinsichtlich neuer/aktueller Erkenntnisse zu hydrogeologischen, kernphysikalischen und radiochemischen Vorgängen in Gesteinssystemen aus Aquifer und Fluid fortgesetzt.
- 2) Nach Anschaffung und Aufbau des Autoklaven-Versuchstandes werden Testversuche durchgeführt. Im Anschluss wird mit der Durchführung von Experimenten unter Parametervariation fortgesetzt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030H</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 391.716,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Fischer	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel von AP1.1 ist die Entwicklung eines Modelles für Fließgewässer (tidenabhängiger Teil der Weser), welches basierend auf Messdaten natürlicher und künstlicher Radionuklide die Konzentrationsverläufe vom Einleiter über Wasser und Schwebstoffe bis zu den Flusssedimenten beschreibt. In AP4.1 soll ein Modell für die Partitionierung und Speziation von natürlichen und künstlichen Radionukliden in und außerhalb von Kläranlagen entwickelt werden. Zur Validierung und Verfeinerung des Modells sollen Aktivitätsmessungen in den einzelnen Anlagenkompartimenten vorgenommen werden.

Vorgesehenes Untersuchungsgebiet ist die Stadt Bremen mit der städtischen Kläranlage Seehausen bzw. 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.

Die Ergebnisse aus AP1.1 liefern Radionuklidkonzentrationen, die als Berechnungsgrundlage für den Radionuklidtransfer in aquatischen Organismen, AP1.4. genutzt werden können. Aufgrund der im Projekt verwendeten Messmethode der Gammaskopie ergeben sich Vernetzungsmöglichkeiten mit Arbeitspaket 1.2 "Transport von Radionukliden von einem Schneefeld in Vorfluter". Die Ergebnisse der Speziations- bzw. Partitionierungsmodelle aus AP4.1 können als Inputparameter für weitere Projekte dienen. Beispielsweise kann die ermittelte Verteilung von Radionukliden in der Kläranlage für eine bessere Abschätzung von Dosisumwandlungsfaktoren in diesem Kompartiment in AP4.2 hilfreich sein. Weiterhin kann der Output des Kläranlagenmodells mit dem Input für das fluviale Transportmodell aus AP1.1 bzw. für die Reservoirare aus AP2.2 gekoppelt werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1.1 (Fließgewässer):

Nach Vorarbeiten und Literaturrecherchen zum Stand der Wissenschaft für Transportmodelle von Fließgewässern und Recherchen zu Messmethodik von Flussproben sollen geeignete Messstellen im Verlauf der Weser identifiziert und dort Proben von Sedimenten, Wasser und Schwebstoffen genommen und gammaspektroskopisch untersucht werden. Parallel dazu wird ein fluviales Transportmodell für jedes ausgewählte Radioisotop entwickelt, wobei der Eintrag in das Gewässer, die Ausbreitung und Deposition des Nuklids im Flusssediment berücksichtig



sichtigt wird. Die experimentellen Ergebnisse werden mit dem Modell verglichen und das Modell ggf. angepasst.

AP4.1 (Kläranlage):

Zunächst soll eine Literaturrecherche zur chem. Zusammensetzung der Wässer und Sedimente/Schlämme in den einzelnen Kläranlagenkompartimenten und zur Speziation der einzelnen Radionuklide unter den relevanten Bedingungen sowie zu Stoffflussprozessen in Kläranlagen durchgeführt werden. Anschließend wird für jedes Kompartiment mit Hilfe des geochemischen Speziationsprogramms PHREEQC ein Speziationsmodell für  $^{131}\text{I}$  und  $^{137}\text{Cs}$  (und ggf. für weitere Nuklide) erstellt. Mit Hilfe dieses Modells werden Verteilungskoeffizienten bzw. Retentionsfaktoren für das Stoffflussmodell berechnet. Im nächsten Schritt erfolgt die Messung des zeitlichen Verlaufs der Nuklidkonzentrationen (beispielsweise nach einem Eintrag von  $^{131}\text{I}$  durch Schilddrüsenpatienten) und der Partitionierung in den einzelnen Kläranlagenkompartimenten. Parallel dazu wird ein Stoffflussmodell für die Kläranlage entwickelt und in MATLAB bzw. C++ implementiert. Danach erfolgt ein Vergleich der experimentellen Daten mit dem Modell und ggf. eine Modifikation des Modells.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1: Im Zeitraum vom 1. August bis 30. September 2013 wurden noch keine Arbeiten durchgeführt, da die Doktorandenstelle noch vakant war. Ab 1. Oktober 2013 wurde die Stelle durch Frau Maria-Evangelina Souti besetzt. In der Zeit bis zum 31. Dezember 2013 wurde mit der Einarbeitung in die Theorie der Modellierung von Stofftransport in Flusswasser begonnen.

AP4.1: Im Zeitraum vom 1. August bis zum 31. Dezember 2013 wurde eine Literaturstudie zum Verhalten von Radionukliden in der Umwelt durchgeführt. Es wurden insbesondere die zur Erstellung der Speziationsmodelle verwendbaren Daten bewertet und zusammengestellt. Des Weiteren wurde eine Literaturstudie zu den relevanten Prozessen bzw. Stoffflüssen in Kläranlagen durchgeführt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Folgende Arbeiten sind für den nächsten Berichtszeitraum geplant:

AP1.1:

- Literaturrecherche zur Modellierung von Stofftransport in Flusswasser und zur Probenahme und Auswertung von Wasser- und Sedimentproben
- Planung der ersten Probenkampagne

AP4.1:

- Modellierung der Speziation mit PHREEQC
- Erste Messungen der Nuklidverteilung an ausgewählten Kompartimenten der Kläranlage

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Hochschule Ravensburg-Weingarten, Doggenriedstraße, 88250 Weingarten		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 030I</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 139.260,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Klemt	

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Wie nukleare Katastrophen gezeigt haben, tragen im wesentlichen  $^{131}\text{I}$  sowie  $^{134,137}\text{Cs}$  zur Dosis für die Bevölkerung bei.  $^{137}\text{Cs}$  mit einer Halbwertszeit von etwa 30 Jahren kann relativ lange einen Beitrag zur Dosis für den Menschen hervorrufen. In kleinen, flachen eutrophen Seen sowie in ihren Einzugsgebieten ist Cs zu einem großen Teil reversibel an organische Materie gebunden, wohingegen die Fixierung von Cs an Tonmineral-Partikel von geringerer Bedeutung ist. Dies hat zur Folge, dass auch viele Jahre nach dem Cs-Fallout noch nennenswerte Mengen Cs aus dem Einzugsgebiet in den See transportiert werden. Die Aktivitätskonzentration im Seewasser und der Transfer in Wasserpflanzen und Fische sind relativ hoch. Der Vorsees, etwa 30 km nördlich des Bodensees, ist ein eutropher See, der intensiv zur Befischung genutzt wird. Im Sinne einer langfristigen Strahlenschutzvorsorge soll das Verhalten von Radiocäsium in diesem Seesystem untersucht werden.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Es soll das  $^{137}\text{Cs}$  im Boden des Einzugsgebietes, die Aktivitätskonzentration im Wasser, in den Schwebstoffen des Sees, in Wasserpflanzen sowie in verschiedenen Arten von Fischen gemessen werden. Zusätzlich sollen  $^{137}\text{Cs}$  im Sediment und die  $^{137}\text{Cs}$ -Bindung an das Sediment untersucht werden.

Die Konzentration der Cs-Konkurrenzionen  $\text{K}^+$  und  $\text{NH}_4^+$  sowie die  $\text{O}_2$ -Konzentration, der pH-Wert und die Temperatur des Wassers sollen bestimmt werden. Die zeitabhängige Verteilung und der Transport des  $^{137}\text{Cs}$  im Seesystem soll dann mit Hilfe von Compartment-Modellen bzw. mit Sedimentations-Diffusionsmodellen verstanden werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bestimmung des  $^{137}\text{Cs}$  Bodeninventars im Einzugsgebiet des Vorsees:

An jeder der neun Positionen im Einzugsgebiet wurden mit einem rohrförmigen Stecher ( $\varnothing$  56 mm) Bodenproben entnommen. Die Länge des Rohres betrug 250 mm, um nahezu das gesamte Inventar zu erfassen. Um den Einfluss lokaler Fluktuationen des Inventars zu verringern, wurden im Umkreis jeder Position drei Proben entnommen, wobei eine Probe jeweils aus dem Material von zwei bis drei Einstichen mit dem Stecher besteht. Der Mittelwert berechnet sich somit aus dem Material von sechs bis neun Einstichen. Die Bodenproben wurden in Marinelli-Becher eingefüllt und gamma-spektrometrisch untersucht. Der Mittelwert des an den 9 Positionen im Einzugsgebiet gemessenen und auf den 01.05.1986 korrigierten  $^{137}\text{Cs}$  Inventars beträgt etwa  $20 \text{ kBq/m}^2$ . Vermutlich ist durch im Boden stehendes Wasser ein Teil des Inventars weggespült worden, so dass das ursprüngliche Inventar wohl mehr dem maximalen Wert von  $30 \text{ kBq/m}^2$  entspricht. Mit dem ursprünglich vorgesehenen U-Profil-Stecher konnte kein Profil zur Tiefenverteilung des  $^{137}\text{Cs}$  ausgegraben werden, da der Boden entweder mit zu vielen Wurzeln und Steinen durchsetzt war oder das Profil unter Wasser stand. Deshalb wird ein Bodenprobennehmer nach Pürckhauer, der einen wesentlich kleineren Durchmesser hat, gebaut, um damit die Tiefenverteilung der spezifischen Aktivität zu bestimmen.

Monatliche Messungen der  $^{137}\text{Cs}$  Wasserkontamination und der  $^{137}\text{Cs}$  Aktivitätskonzentration in Schwebstoffen des Vorsees:

Die Wasserproben wurden mit einem sogenannten „Large Volume Water Sampler“ (Midiya-System) genommen. Dabei pumpt eine Unterwasserpumpe größere Wasservolumina durch einen Stapel von 10 parallel angeordneten Papier-Filtern ( $\varnothing = 150$  mm) mit anfänglichen effektiven Porengrößen von 7-12  $\mu\text{m}$  (obenliegender Vorfilter) und 2  $\mu\text{m}$  (untenliegender Hauptfilter). Nach der Probennahme werden die Filter getrocknet, gewogen und es wird die  $^{137}\text{Cs}$  Aktivität in den Filtern und damit in den Schwebstoffen bestimmt.

Das so gefilterte Wasser wird als nächstes durch einen  $^{137}\text{Cs}$  Adsorber gepumpt. Der Adsorber namens „Anfezh“ ist ein Ionentauscher auf der Basis des Eisen-Hexacyan-Komplexes  $\text{K}_x\text{Fe}_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  in einer Holzzellulose-Matrix. Über die  $^{137}\text{Cs}$  Aktivität im Adsorber und den Wasserdurchfluss, der mit einem Durchflussmesser bestimmt wird, wird die Aktivitätskonzentration im Vorsee-Wasser bestimmt.

Im Wasser des Vorsees variierte die  $^{137}\text{Cs}$  Aktivitätskonzentration zwischen 5 und 18  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , mit höheren Werten von Mai bis August und niederen Werten von September bis Dezember. Niederschlagswerte nahegelegener Wetterstationen werden aufgezeichnet, um eventuelle Einflüsse der Regenmengen zu erkennen. Die Bindung des  $^{137}\text{Cs}$  an Schwebstoffe wird im Gleichgewicht durch den Verteilungskoeffizienten  $K_d^{\text{tot}}$  (Aktivitätskonzentration im Feststoff in  $\text{Bq}/\text{kg}$  / Aktivitätskonzentration im Wasser in  $\text{Bq}/\text{L}$ ) beschrieben. Der mittlere Messwert des Verteilungskoeffizienten beträgt bislang  $30 \cdot 10^3$   $\text{L}/\text{kg}$  mit niederen Werten im April und im Dezember. Bei 3 weiteren Messungen gab es größere systematische Unsicherheiten für den  $K_d$ -Wert, da die geringe Masse der Schwebstoffe im getrockneten Filter nur ungenau bestimmt werden konnte. In Zukunft muss auf größeren Wasserdurchsatz im Filter-System geachtet werden. Im Sommer sind auf Grund der großen Konzentration der Schwebstoffe teilweise keine 100 L Durchsatz durch die Filter möglich; im Winter werden hingegen mehrere 100 L benötigt, um die Unsicherheit bei der Bestimmung der Masse in den Filtern gering zu halten.

Es wurden monatliche In-situ-Messungen von Wassertemperatur, pH-Wert und Sauerstoffkonzentration sowie monatliche Labor-Messungen von  $\text{NH}_4^+$  und  $\text{K}^+$  Konzentrationen im Wasser des Vorsees durchgeführt. Das wesentliche Konkurrenzion zum  $^{137}\text{Cs}^+$  ist in den Monaten Mai bis Dezember das  $\text{K}^+$ -Ion mit Konzentrationen von durchschnittlich etwa 1  $\text{mg}/\text{L}$  und etwas geringeren Werten im späten Sommer. Die  $\text{NH}_4^+$  Konzentration steigt zwischen Mai und Dezember um einen Faktor 5 an; ob es im späten Winter die Konzentration vom  $\text{K}^+$  übersteigt, wird sich erst noch herausstellen.

Zurzeit wird geprüft, ob der gesamte Gehalt an organischem Kohlenstoff (TOC) im Wasser mit einem vorhandenen Gerät zusätzlich bestimmt werden kann.

Vom Fischereiverein erhalten wir überwiegend im Herbst Fische bzw. Fischproben, die aus dem Vorsee stammen. Kleine Fische einer Spezies werden zu Sammelpuben kombiniert; bei einer Länge von mehr als 10 cm wird das reine Muskelfleisch gemessen. Bisher wurden 25 Proben von folgenden Fischarten untersucht: Hecht (*Esox lucius*), Wels (*Silurus glanis*), Karpfen (*Cyprinus carpio*), Rotaugen (*Rutilus rutilus*), Rotfeder (*Scardinius erythrophthalmus*), Ukelei (*Alburnus alburnus*), Güster (*Blicca bjoerkna*), Brachse (*Abramis brama*). Die Messwerte der spezifischen  $^{137}\text{Cs}$  Aktivität (bezogen auf das Frischgewicht) von Hechten liegen zwischen 40 und 120  $\text{Bq}/\text{kg}$ , in den kleinen Weißfischen zwischen 20  $\text{Bq}/\text{kg}$  (Rotfeder) und 70  $\text{Bq}/\text{kg}$  (Brachse).

Ein großer Teil der Seefläche des Vorsees ist mit der Makrophyte Tausendblatt (*Myriophyllum spicatum*) bewachsen. Es wurden möglichst vollständige Pflanzen entnommen und in Blätter, Stängel und Wurzeln aufgeteilt. Es wurden  $^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätskonzentrationen (Trockengewicht) von 80  $\text{Bq}/\text{kg}$  in den Blättern, 21  $\text{Bq}/\text{kg}$  in den Stängeln und 73  $\text{Bq}/\text{kg}$  in den Wurzeln gemessen.

Eine Modell-Recherche zu Transport und Verteilung von  $^{137}\text{Cs}$  in aquatischen Ökosystemen ist angelaufen. Insbesondere werden von der IAEO empfohlene Modelle (VAMP, AQUASCOPE, MOIRA, RODOS, BIOMOV) angeschaut hinsichtlich der Anwendbarkeit auf den kleinen eutrophen Vorsee und darauf, ob die entsprechenden empirischen Daten zur Verfügung stehen. Weiterhin wurde damit begonnen, alle verfügbaren  $^{137}\text{Cs}$  Kontaminations-Daten über den Vorsee, die seit 1986 in verschiedenen Arbeiten und Projekten erarbeitet wurden, zusammen zu stellen und deren Qualität zu prüfen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Wie im Projektantrag vorgesehen, soll im kommenden Halbjahr das  $^{137}\text{Cs}$ -Inventar und seine Tiefenverteilung im Boden weiter untersucht werden.

In der ganzen Projektlaufzeit wird monatlich das  $^{137}\text{Cs}$  in Wasser und Schwebstoffen mit Hilfe des „Large Volume Water Sampler“ bestimmt werden.

Dabei werden auch monatliche Messungen die Konzentration der Cs-Konkurrenzionen  $\text{K}^+$  und  $\text{NH}_4^+$  sowie  $\text{O}_2$ -Konzentration, pH-Wert und Temperatur des Wassers durchgeführt werden.

Die Analyse von mathematischen  $^{137}\text{Cs}$  Verteilungs- und Transportmodellen hinsichtlich einer einfachen Anwendung auf den Vorsee und hinsichtlich der Verfügbarkeit der benötigten Parameter soll fortgesetzt werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 031A</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 851.064,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr. Dollinger	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Projekts ist ein verbessertes grundlegendes Verständnis der erhöhten biologischen Wirksamkeit (RBW) von dicht-ionisierender Strahlung durch strahlenbiologische Experimente mit räumlich fokussierter Dosisapplikation von Niedrig-LET-Strahlung, wodurch Eigenschaften der räumlichen Dosisverteilung von Schwerionenbestrahlung simuliert werden. Im vorliegenden Teilprojekt sollen die Möglichkeiten für strahlenbiologische Experimente mit fokussierter Ionenapplikation am Rasterionenmikroskop SNAKE erweitert werden, um zum einen weitere strahlenbiologische Endpunkte, z. B. Test der Koloniebildungsfähigkeit, zugänglich zu machen und zum anderen die applizierte räumliche Dosisverteilung gezielt variieren zu können. In enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt B soll diese Bestrahlungsmethodik genutzt werden um strahlenbiologisch relevante Daten zu gewinnen, welche die Validierung und Weiterentwicklung von Computermodellen zur Berechnung von RBW in Abhängigkeit des LET und der Ionengeschwindigkeit ermöglichen (Teilprojekt C und D).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Entwicklung von Zellüberlebensexperimenten mit fokussierten Ionenstrahlen.  
- Erhöhung der Bestrahlungsraten und damit der Bestrahlungsflächen.  
- Entwicklung von speziellen Zellwachstumsbehältern, welche die mechanische Beschränkung der Zellwachstumsfläche erlaubt.
- AP2: Verkleinerung des Strahldurchmessers und gezielte Variation des Strahldurchmessers.  
- Charakterisierung von fluoreszierenden Kernspurdetektoren zur Vermessung des Strahlprofils.  
- Vermessung des Strahlprofils in Abhängigkeit der Bestrahlungsparameter zur Identifikation limitierender Faktoren.
- AP3: Variation der Energie und Ionensorte (Deuteronen, alpha-Teilchen, Li) der fokussierten Ionenstrahlen zur Erweiterung der Modifikationsmöglichkeiten der Dosisverteilung.
- AP4: Durchführung von strahlenbiologischen Experimenten mit fokussierten Ionenstrahlen am Rasterionenmikroskop SNAKE.
- AP5: Bewertung der experimentellen Ergebnisse und der Berechnungen in Zusammenarbeit mit allen beteiligten Arbeitsgruppen.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zur Etablierung von Zellüberlebensexperimenten an SNAKE (AP1) wurden in Zusammenarbeit mit Teilprojekt B spezielle Zellansä- und -kultivierungsvorrichtungen entwickelt, gefertigt und getestet um das Zellwachstum räumlich auf der Zellträgerfolie zu begrenzen. Hiermit können auf einer Fläche von etwa 20 mm<sup>2</sup> etwa 10.000 Zellen kultiviert werden, wobei sichergestellt ist, dass außerhalb dieser Fläche keine Zellen wachsen. Des Weiteren wurde zum einen die Strahlpräparation mit der Multicusp-Quelle optimiert und so eine Teilchenrate von  $3\text{-}5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$  im Mikrostrahl erreicht. Zum anderen können diese Teilchenraten nach Optimierung der Zähl- und Steuerelektronik zuverlässig verarbeitet werden. Insgesamt können so nun Bestrahlungen einer 20 mm<sup>2</sup> großen Fläche mit einer Matrix (5,4 x 5,4 μm<sup>2</sup> oder größer) bei einer Dosis von 1,7 Gy in einer Zeit von 20 Minuten durchgeführt werden, welche für Zellüberlebensexperimente ausreichend ist.

Zur Bestimmung der Strahlfleckgröße (AP2) als essentielle Eingangsgröße für Simulation und Modellierung wurde die Vermessung des Strahls mittels fluoreszierenden Kernspurdetektoren (FNTD: fluorescent nuclear track detector) entwickelt. Nach Bestrahlung der FNTD an SNAKE wird die induzierte Fluoreszenzverteilung mit einem konfokalen Mikroskop vermessen. In der speziell entwickelten Analysesoftware wird die Größe der Fluoreszenzspots durch Fit mit einer zweidimensionalen Gauß-Verteilung bestimmt. Durch quadratische Subtraktion der Antwortfunktion des Systems, bestehend aus Detektor und Mikroskop, welche aus dem Fluoreszenzsignal einzelner Protonen bestimmt wurde, wird die Strahlfleckgröße bestimmt. Hiermit konnte in der Strahlzeit vom August 2013 die Strahlfleckgröße zu 0.42 μm volle Halbwertsbreite in X-Richtung und 0.82 μm in Y-Richtung bestimmt werden. Die Unsicherheiten von etwa 10 % sind durch mögliche Nichtlinearitäten des Detektionssystem bedingt, welche in Zukunft zu vermessen sind.

In zwei Strahlzeiten (19. – 28. August und 2. – 9. Dezember) wurden Bestrahlungen für strahlenbiologische Experimente durchgeführt (AP4).

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Zur genaueren Abschätzung von systematischen Fehlern bei der Vermessung der Strahlfleckgröße mittels FNTD soll deren Ansprechverhalten bei verschiedenen Protonenfluenzen vermessen und die Auswirkung eventueller Nichtlinearitäten auf die Messung mittels geeigneter Modellierung des Prozesses abgeschätzt und wenn möglich korrigiert werden (AP2).

Zur Erweiterung der Modifikationsmöglichkeiten der Dosisapplikation (AP3) soll die definierte Verbreiterung des Strahlflacks durch Aufstreuung in einer dünnen Folie etabliert werden. Die Verbreiterung ist mit FNTD zu verifizieren.

In Zusammenarbeit mit Teilprojekt B sollen die Zellkerngrößen der verwendeten Zelllinien vermessen und deren Verteilung als Eingangsgröße für die Modellierung mit dem Local Effect Model charakterisiert werden.

In zwei Strahlzeiten (31. Januar – 6. Februar und 29. April – 4. Mai) sollen strahlenbiologische Experimente mit dem fokussierten Protonenstrahl durchgeführt (AP4) und Daten für die Charakterisierung der Kernspurdetektoren gewonnen werden (AP2).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Ismaninger Str. 22, 81675 München		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 031B</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 333.636,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> PD Dr. Schmid	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Unser Arbeitsziel dient der Gewinnung neuer strahlenbiologischer Erkenntnisse zu den Effekten hoch-fokussierter Teilchenmikrostrahlungen im Vergleich zur konventionellen homogenen Bestrahlung. Damit wird die Weiterentwicklung und Validierung von Computermodellen zur Berechnung von RBW in Abhängigkeit des LET und der Ionen-Geschwindigkeit ermöglicht. Als Read-out werden sowohl zytotoxische als auch genotoxische Effekte der unterschiedlichen Bestrahlungsarten in einzelnen Tumorzellen qualitativ und quantitativ bestimmt. Neben Protonen werden auch Experimente mit Deuteronen, Li-, B-, C- und O-Ionen durchgeführt, um die unterschiedliche relative biologische Wirksamkeit (RBW) als Folge von Fokussierung und LET zu charakterisieren. In enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt A soll diese Bestrahlungsmethodik optimiert werden um weitere strahlenbiologisch relevante Daten zu gewinnen, welche die Validierung und Weiterentwicklung von Computermodellen zur Berechnung von RBW in Abhängigkeit des LET und der Ionengeschwindigkeit ermöglichen (Teilprojekt C und D).

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Etablierung eines modifizierten Zellüberlebenstest für geringe Zellzahlen
- AP2: Messung dizentrischer Chromosomenaberrationen nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu homogener Bestrahlung
- AP3: Zellüberlebensexperimente nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu homogener Bestrahlung
- AP4: Untersuchung der DNS Reparaturkinetik nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu homogener Bestrahlung
- AP5: Untersuchung von Genexpressionsveränderungen mit Hilfe der Real-Time-PCR nach verschiedener Fokussierung
- AP6: Vergleichende Experimente mit Protonen, Deuteronen, Lithium-, Kohlenstoff und Sauerstoffionen, um die unterschiedliche relative biologische Wirksamkeit (RBW) als Folge von Fokussierung und LET zu charakterisieren

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

Im Berichtszeitraum wurden der Zellüberlebensstest für die spezifischen Bedingungen am Mikro-Strahlplatz SNAKE in Zusammenarbeit mit Teilprojekt A etabliert (AP1). Dazu wurden neue Aussaattechniken von CHO Zellen (Chinese Hamster Ovary Cells) getestet um das Zellwachstum räumlich auf der Zellträgerfolie zu begrenzen. Mit diesem modifizierten Testformat war es möglich bei geringen Zellzahlen von unter 10.000 Zellen eine hohe statistische Signifikanz zu erreichen. In zwei durchgeführten Strahlzeiten (19. – 28. August 2013 und 2. – 9. Dezember 2013) wurden Mikrobestrahlungen mit 20 MeV Protonen am Strahlplatz SNAKE durchgeführt. Zur Bestimmung der RBW wurden in einem ersten Schritt Chromosomenaberrationen (AP2) und das Zellüberleben (AP3) untersucht. In dieser experimentellen Arbeit konnten wir zeigen, dass die RBW für die Induktion von Chromosomenaberrationen durch fokussierte Protonen in Matrixbestrahlung signifikant erhöht und zudem korreliert ist von der Anzahl der fokussierter Teilchen pro Punkt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

In zwei bereits geplanten Strahlzeiten am MLL-Beschleuniger in Garching (31. Januar – 6. Februar und 29. April – 4. Mai 2014) sollen weitere strahlenbiologische Experimente mit dem fokussierten Protonenstrahl durchgeführt werden. Hier werden in Zusammenarbeit mit Teilprojekt A auch Experimente mit einer definierten Verbreiterung des Strahlflecks durch Aufstreuung in einer dünnen Folie verwendet. Dazu werden weitere Zellüberlebensexperimente (AP3) durchgeführt und die Anzahl der Chromosomenaberrationen (AP2) quantitativ bestimmt. Zusätzlich werden Untersuchungen der DNS Reparaturkinetik nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu homogener Bestrahlung durchgeführt (AP4), um den Einfluss der hoch-fokussierten Teilchen auf die beiden Hauptreparaturwege von DNS Doppelstrangbrüchen zu analysieren.

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

Ein erstes Manuskript mit den Ergebnissen des Teilprojektes wird derzeit erstellt.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 031C</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt C		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017		<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 238.179,00 EUR		<b>Projektleiter:</b> Dr. Friedland

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Projekts ist ein verbessertes grundlegendes Verständnis der erhöhten biologischen Wirksamkeit von dicht-ionisierender Strahlung mit Hilfe von neuartigen experimentellen Ansätzen und weiterentwickelten theoretischen Modellen. Im vorliegenden Teilprojekt sollen das biophysikalische Simulationsprogrammpaket PARTRAC weiterentwickelt und die darin verwendeten Modelle und Ansätze validiert werden, um die Abschätzung von Strahlenrisiken nach Bestrahlung mit Ionen zu verbessern und um Ergebnisse der spurstrukturbasierten Modellrechnungen im Rahmen der therapeutischen Anwendung ionisierender Strahlen für deren Optimierung einsetzbar zu machen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Erweiterung von PARTRAC hinsichtlich der Modellierung von Bestrahlungen in Form einer Matrix einzelner Ionen und fokussierter Ionenbündel.
- AP2: Modellierung initialer DNA-Schäden und dizentrischer Chromosomenaberrationen nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu Literaturdaten.
- AP3: Konzeption, Entwicklung und Test eines Modells der Zellinaktivierung auf der Basis des DNA-Reparaturmodells in PARTRAC und Parameteroptimierung anhand von Literaturdaten.
- AP4: Vergleich von im Rahmen des Projekts neu gewonnenen experimentellen Daten für Ionenmatrixbestrahlungen mit Modellrechnungen für die betrachteten Endpunkte.
- AP5: Modellrechnungen zur Zellinaktivierung unter exemplarischen Bedingungen bei einer Ionen-Strahlentherapie.
- AP6: Vergleichende Modellrechnungen mit PARTRAC und LEM zu Dosisverteilungen, initialen DNA-Schäden und deren Auswirkungen unter verschiedenen Bestrahlungsbedingungen.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zunächst wurde die Bestrahlungsgeometrie im biophysikalischen Simulationsprogrammpaket PARTRAC dem experimentellen Setup entsprechend angepasst, wie es den Messungen an der Ionenmikrostrahlanlage SNAKE am Münchener Tandembeschleuniger (speziell der Untersuchung in Schmid et al. 2012 Phys. Med. Biol. 57, 5889-5907) zu Grunde lag.

Für diese Bestrahlungsbedingungen wurden umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt und das derzeit in PARTRAC zur Verfügung stehende Spektrum an biologischen Endpunkten analysiert, insbesondere DSB, DNA Fragmente in verschiedenen Längenbereichen, DNA Reparaturkinetiken sowie Ausbeuten von Chromosomenaberrationen unterschiedlichen Typs. Der Vergleich zwischen modellierter und gemessener Ausbeute dizentrischer Chromosomenaberrationen zeigte für einzelne Kohlenstoffionen und für homogene Protonenbestrahlung eine Überschätzung der Absolutwerte um den Faktor 5, wohingegen die für Kohlenstoff fünfmal höhere relative Ausbeute gut reproduziert wurde. Hingegen lieferten die fokussierten Protonen in den Modellrechnungen deutlich höhere relative Ausbeuten als in den Experimenten. Es sind Überlegungen begonnen worden, welche Modellanpassungen geeignet sind, diese Diskrepanzen zu den Experimenten aufzulösen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Unterschiede zwischen Experiment und Modellrechnungen sollen näher analysiert werden. Dies umfasst zum einen Unterschiede der chromosomalen Organisation der Zellen im Modell (menschliche Fibroblasten) und im Experiment (AL Hybrid-Zellen), zum anderen die beiden Einflussfaktoren räumliche Verteilung der initialen DNA-Schäden sowie Komplexität dieser Schäden.

Es ist ferner geplant, Modellrechnungen zu den seit der Publikation Schmid et al. 2012 erfolgten Messungen mit unterschiedlichen Rasterweiten und Protonenzahlen je Bündel sowie für Lithiumionenbündel durchzuführen. Dabei sollen auch neue Daten hinsichtlich der Spotgröße berücksichtigt werden.

Schließlich soll ein Konzept für eine spurstrukturbasierte Modellierung der Zellinaktivierung erstellt werden, das als Grundlage für die nachfolgende Programmentwicklung und -testung dient.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Präsentation erster Ergebnisse im Rahmen von Vorträgen beim Microbeam Workshop, 3.-4. Oktober 2013, Bordeaux, und beim MICROS2013 Symposium, 20.-25. Oktober 2013, Verona.

Manuskript ‚Modelling proton bunches focused to submicrometer scales: Low-LET radiation damage in high-LET-like spatial structure‘ am 29.11.2013 eingereicht bei Radiation Protection Dosimetry für den Tagungsband zum MICROS2013 Symposium.

<b>Zuwendungsempfänger:</b> GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		<b>Förderkennzeichen:</b> <b>02 NUK 031D</b>
<b>Vorhabensbezeichnung:</b> Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D		
<b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b> Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2013 bis 31.05.2017	<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2013 bis 31.12.2013	
<b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b> 264.450,00 EUR	<b>Projektleiter:</b> Dr. Friedrich	

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Microbeams erlauben die gezielte Untersuchung der Interaktion von DNA Schäden verschiedener Teilchenspuren. Die wichtige Rolle geclusterter Schäden für den biologischen Effekt ist hinreichend belegt, die mikroskopische Beschreibung jedoch unklar. Das Local-Effect-Model (LEM) beinhaltet eine mechanistische Beschreibung der Schadensinteraktion und ihren Einfluss auf Zell- bzw. Gewebeschädigung. Ein Vergleich der Vorhersagen mit Zellüberlebensmessungen verspricht daher, Modellvorstellungen konkret prüfen zu können. Im Projekt sollen Modellvorstellungen präzisiert werden, die eine zuverlässige Beschreibung der RBW erlauben. Auch wird die Erweiterung auf andere biologische Endpunkte angestrebt.

Die durchzuführenden Arbeiten umfassen Erweiterungen des LEM im Hinblick auf die experimentellen Vorhaben an SNAKE. Darauf aufbauend sollen Simulationsrechnungen durchgeführt werden, um experimentelle Bedingungen auszuwählen, die besonders sensitiv auf die jeweiligen spezifischen Modellannahmen sind. Im Rahmen des Vergleichs mit dem PARTRAC-Modell sollen auch Sensitivitätsanalysen für eine Fehlerabschätzung durchgeführt werden. Die 2. Projekthälfte wird zur Modellentwicklung auf Grund gewonnener Daten verwendet.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Entwicklung von Zellüberlebensexperimenten mit fokussierten Ionenstrahlen (UniBwM / TUM)
- AP2: Verkleinerung des Strahldurchmessers und gezielte Variation des Strahldurchmessers (UniBwM)
- AP3: Fokussierte Protonen unterschiedlicher Energie, Deuteronen, Li- Ionen (UniBwM / TUM)
- AP4: Entwicklung von Assays zur Untersuchung anderer Endpunkte (TUM)
- AP5: Durchführung von strahlenbiologischen Experimenten mit fokussierten Ionenstrahlen am Rasterionenmikroskop SNAKE (UniBwM / TUM)
- AP6: Modellentwicklung und Validierung HMGU (HMGU)
- AP7: Modellentwicklung und Validierung GSI Darmstadt (GSI, Teilprojekt D)
- AP8: Auswertung und Bewertung der experimentellen und theoretischen Ergebnisse (alle beteiligten Gruppen)

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

Nachdem in einem ersten Projektmeeting bereits verbindliche Absprachen bezüglich der im Projekt verwendeten Materialien und Methoden (d. h. Zellsorten, Endpunkte, Geometrieparameter etc.) getroffen worden waren, konnten direkt konkrete Modellrechnungen zur Schadensinduktion von DNA mit dem Local Effect Model (LEM) durchgeführt werden. Dies wurde erreicht, indem räumliche Doppelstrangbruch- (DSB-) Verteilungen im Zellkern von 117 zufällig und um ein Zentrum gaußverteilten Protonen mit geeigneten Mitteln visualisiert und mit der entsprechenden DSB Verteilung eines Kohlenstoffions verglichen wurden. Dieses Vorgehen ist eine konsequente Abbildung der experimentellen Randbedingungen des SNAKE Microbeam, unter denen die dem Projekt zu Grunde liegenden Experimente durchgeführt wurden.

Ausgehend von den Simulationsrechnungen ergeben sich erste Schlussfolgerungen bezüglich der Relevanz der Interaktion mehrerer Protonen hinsichtlich des erreichten radiobiologischen Effekts und der Relevanz der Nähe von induzierten Schäden, die man nun systematischer untersuchen möchte. Weiterhin wurden die Modellrechnungen analog auch von den Kollegen am HMGU mit dem PARTRAC Code durchgeführt, was erste Modellvergleiche erlaubte. Es zeigte sich dabei, dass in PARTRAC vor allem die Nanometer-Skala eine wichtige Rolle für die Clusterung von induzierten Schäden spielt, während im LEM sowohl Nano- als auch die Mikrometerskala von Relevanz sind.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Während die bisher durchgeführten Modellrechnungen eher exemplarischen Charakter haben, ist im nächsten Schritt eine sorgfältige Implementierung der notwendigen Algorithmen in den bestehenden LEM Code angestrebt, so dass dann die Simulation beliebiger Spurverteilungen in Zellkernen einfach durchgeführt werden kann. Es wird eine variable Strahlfleckgröße sowie eine variable Teilchenzahl in jedem Strahlfleck wählbar sein. Beide Größen können mittlerweile von den experimentellen Kollegen präzise gemessen und eingestellt werden, sodass dann zielgerichtete Experimente und Modellrechnungen möglich sein werden.

Die folgenden systematischen Untersuchungen hinsichtlich der biologischen Wirksamkeit sollen mit beiden Modellen im Vergleich zum Experiment durchgeführt werden, und zwar mit PARTRAC was Chromosomenaberrationen und mit LEM was den proliferativen Zelltod betrifft.

Aus den oben angesprochenen festgestellten konzeptuellen Unterschieden zwischen LEM und PARTRAC ergibt sich außerdem die Möglichkeit, mit Analysen zum DNA-Rejoining als drittem Endpunkt etwas über die relevanten Größenskalen der DNA-Schädigung zu lernen. Hierzu sind konkrete Unterschiede in den Modellrechnungen erkennbar (teilweise liegen diese schon vor), die daher direkt im Experiment überprüfbar sind.


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

Es wurde ein Manuskript zur konzeptionellen Umsetzung von Clusterung im Local Effect Modell als Konferenzbeitrag des MICROS2013 Symposiums zur Mikrodosimetrie in Treviso im vergangenen Oktober beim Journal „Radiation Protection Dosimetry“ eingereicht. Das Manuskript reflektiert unter Anderem erste Ergebnisse dieses Teilprojekts.





### 3 Verzeichnis der ausführenden Forschungsstellen

- |              |  |     |
|--------------|--|-----|
|              | <b>BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung GmbH, Achterstr. 30, 28359 Bremen</b>  |     |
| 02 NUK 016CX | Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C   | 158 |
|              | <b>Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter</b>   |     |
| 02 NUK 024A  | Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1           | 176 |
|              | <b>Charité - Universitätsmedizin Berlin, Hindenburgdamm 30, 14195 Berlin</b>   |     |
| 02 NUK 024E  | Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5           | 184 |
|              | <b>Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg</b>  |     |
| 02 NUK 003A  | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese    | 126 |
|              | <b>Elbe Kliniken Stade-Buxtehude gGmbH, Bremervörder Str. 111, 21682 Stade</b>   |     |
| 02 NUK 003D  | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Epigenetische Veränderungen, Schadensinduktion, Prozessierung und Reparatur           | 130 |
|              | <b>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich</b>  |     |
| 02 NUK 005A  | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität                               | 132 |
| 02 NUK 015E  | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E   | 146 |
| 02 NUK 019C  | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C | 84  |
| 02 NUK 020E  | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E   | 100 |
| 02 NUK 021A  | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A             | 102 |
|              | <b>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27 c, 80686 München</b>  |     |
| 02 NUK 011A  | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A  | 14  |


- 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  30

**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  174


- 02 NUK 020C** Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexbildung von f-Elementen; Teilprojekt C  96


**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  142


- 02 NUK 030C** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C  208

**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  120


- 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  162


- 02 NUK 025A** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1  186







- 02 NUK 031D** Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D  228

**Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden**






- 02 NUK 013A** Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse  72

- 02 NUK 014B** Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente  76


- 02 NUK 015F** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt F  148

- 02 NUK 019D** Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D  86
- 02 NUK 021B** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B  104
- 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  38
- 02 NUK 028B** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt B: Druckwasserreaktor-Störfallanalysen unter Verwendung des Severe-Accident-Code ATHLET-CD  56
- 02 NUK 030F** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F  214
- 02 NUK 027C** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Codes; Teilprojekt C: Analyse und CFD-Modellentwicklung der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen  48


**Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg**

- 02 NUK 015B** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B  140
- 02 NUK 024B** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2  178
- 02 NUK 026A** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A  192
- 02 NUK 030A** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C  204
- 02 NUK 031C** Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A  226

**Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Anton-Günther-Str. 51, 72488 Sigmaringen**

- 02 NUK 025BX** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2  188













**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  190


Entwicklung; Teilprojekt 3

- |             |  |
|-------------|--|
| 02 NUK 030I | <b>Hochschule Ravensburg-Weingarten, Doggenriedstr., 88250 Weingarten</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I <span style="float: right;">📖 220</span>   |
| 02 NUK 018A | <b>Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau</b><br>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 <span style="float: right;">📖 24</span>  |
| 02 NUK 027D | <b>IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf</b><br>Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegeliebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten <span style="float: right;">📖 50</span> |
| 02 NUK 017F | <b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main</b><br>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 <span style="float: right;">📖 172</span>  |
| 02 NUK 019E | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E <span style="float: right;">📖 88</span>   |
| 02 NUK 021F | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F <span style="float: right;">📖 112</span>  |
| 02 NUK 019B | <b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B <span style="float: right;">📖 82</span>   |
| 02 NUK 020B | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B <span style="float: right;">📖 94</span>   |
| 02 NUK 028D | Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt D: Erweiterung und Validierung des COCOSYS Codes für die Analyse des passiven Containment-Kühlsystems <span style="float: right;">📖 60</span>   |




- |  |  |
|--|--|
| <b>Klinikum der Universität München, Lindwurmstr. 2a, 80333 München</b>                                |  |
| 02 NUK 016B  | Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B  156   |
| 02 NUK 024C  | Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3  180   |
| <b>Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Ismaninger Str. 22, 81675 München</b> |  |
| 02 NUK 026F  | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F  202   |
| 02 NUK 031B  | Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B  224   |
| <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  42 |
| <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  144   |
| 02 NUK 021G  | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G  114   |
| 02 NUK 030D  | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D  210   |
| <b>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig</b>                |  |
| 02 NUK 033   | TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte  116  |
| <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  108   |
| 02 NUK 021E  | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E  110   |
| 02 NUK 022A  | Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie  28   |


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  32

02 NUK 028A Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt A: Analyse von Containment-Phänomenen zur Optimierung von Störfallmaßnahmen  54


**Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Regina-Pacis-Weg 3, 53113 Bonn**

02 NUK 019F Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F  90


**Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum**


02 NUK 028G Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt G: Simulation des Unfalls in Fukushima-Daiichi zur Bewertung von ATHLET-CD (SUBA)  66


**Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg**


02 NUK 020D Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D  98


**Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen**


02 NUK 015A Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A  138

02 NUK 019A Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A  80

02 NUK 020A Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A  92








02 NUK 021C Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C  106

02 NUK 028E Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt E: Verbesserung des Lower Head-Modelles für Melcor und Melcor-Rechnungen zu Fukushima  62





02 NUK 028F Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt F: Beiträge zur Codevalidierung anhand von SWR-Daten und zur Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen  64


- 02 NUK 030B Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B  206

<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  124
- 02 NUK 016D Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D  160
- 02 NUK 017B 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  164
- 02 NUK 017C 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  166
- 02 NUK 017D 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  168
- 02 NUK 017E 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  170
- 02 NUK 022D Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer  34


<b>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden</b>
--

- 02 NUK 014A Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente  74
- 02 NUK 018B 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  26
- 02 NUK 027A Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt A: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Nachwärmeabfuhr von Brennelementen in ausdampfenden Nasslagern  44
- 02 NUK 027B Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt B: Simulation von Strömung und Wärmetransport unter den Bedingungen eines Lagerbeckens  46


- 02 NUK 027E Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt E: Ortsaufgelöste Temperatur- und Gasphasengeschwindigkeitsmessung zur Analyse der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen  52

**Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg**

- 02 NUK 011D Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D  20


- 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  36


**Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München**

- 02 NUK 011E Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E  22


- 02 NUK 030E Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E  212

**TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg**


- 02 NUK 011B Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B  16

- 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  40

**TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Westendstr. 199, 80686 München**



- 02 NUK 011C Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C  18

**Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen**



- 02 NUK 015H Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H  152

- 02 NUK 030H Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H  218



<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  68
- 02 NUK 031A Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A  222


<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  122
- 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  134


<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  78
- 02 NUK 026E Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E  200


<b>Universität Rostock, Ulmenstr. 69, 18057 Rostock</b>
---

- 02 NUK 005D Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit  136


<b>Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart</b>
---







- 02 NUK 028C Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt C: Analyse schwerer Störfälle in LWR zur Evaluierung und Optimierung von Severe-Accident-Maßnahmen  58

<b>Universität Ulm, Helmholtzstr. 16, 89081 Ulm</b>
---

- 02 NUK 026C Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C  196

<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  182

- |   |  |
|---|--|
| <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  128           |
| <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  154   |
| 02 NUK 026B   | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B  194 |
| <b>Universitätsmedizin Rostock, Schillingallee 35, 18057 Rostock</b>  |  |
| 02 NUK 026D   | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D  198 |
| <b>Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 128, 01328 Dresden</b> |  |
| 02 NUK 015G   | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G  150                                 |
| 02 NUK 030G   | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G  216   |