

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

**PTE-N Nr. 7**

BMBF geförderte FuE zu  
„Nukleare Sicherheitsforschung“

Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2013

Projektträger Karlsruhe  
Wassertechnologie und Entsorgung  
PTKA-WTE

**Oktober 2013**

## **PTE-Berichte**

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

Die Fortschrittsberichtsreihen behandeln folgende Themenschwerpunkte:

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

Die Fortschrittsberichtsreihen sind online verfügbar:

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

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

## Vorwort

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

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

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

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

Dem Bericht liegt folgendes Gliederungsprinzip zugrunde:

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



## **Inhaltsverzeichnis**












|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen.....</b> | <b>1</b>   |
| 1.1      | <i>Sicherheitsforschung für Kernreaktoren .....</i>                  | <i>1</i>   |
| 1.2      | <i>Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung .....</i>           | <i>5</i>   |
| 1.3      | <i>Strahlenforschung .....</i>                                       | <i>9</i>   |
| <b>2</b> | <b>Formalisierte Zwischenberichte .....</b>                          | <b>15</b>  |
| 2.1      | Sicherheitsforschung für Kernreaktoren .....                         | 15         |
| 2.2      | Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung.....                   | 81         |
| 2.3      | Strahlenforschung.....   | 137        |
| <b>3</b> | <b>Verzeichnis der ausführenden Forschungsstellen.....</b>           | <b>255</b> |











# 1 Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen






## 1.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

|                    |   |  |      |
|--------------------|---|--|------|
| <b>02 NUK 010A</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Entwicklung von CFD-Modellen für Wandsieden und Aufbau eines Bündeltests mit hochauflösender, schneller Röntgentomographie                         | <b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>                                  | 📖 16 |
| <b>02 NUK 010B</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Turbulenz und Blasendynamik  | <b>TU Dresden</b>  | 📖 18 |
| <b>02 NUK 010C</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen mit optischen Verfahren und Parameterbestimmung für CFD-Rechnungen an kleinskaligen Versuchsständen | <b>Hochschule Zittau/Görlitz</b>   | 📖 20 |
| <b>02 NUK 010D</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Übertragung der CFD-Wandsiedemodelle zur Anwendung in Lumped Parameter-Codes zur Beurteilung der RDB-Außenkühlung                                  | <b>Ruhr-Universität Bochum</b>   | 📖 22 |
| <b>02 NUK 010E</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Einfluss von Turbulenz und Sekundärströmungen auf das unterkühlte Strömungssieden in reaktortypischen Konfigurationen                              | <b>TU München</b>  | 📖 24 |
| <b>02 NUK 010F</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Valisierung von Unterkanal- und CFD-Programmen anhand von Brennstab-Bündelversuchen  | <b>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b> | 📖 26 |
| <b>02 NUK 010G</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: CFD-Modellentwicklung und Validierung für die 3-dimensionale Simulation von Siedevorgängen in Brennelementen von DWR                               | <b>ANSYS GmbH Germany</b>  | 📖 28 |
| <b>02 NUK 010H</b> | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge   | <b>TU Dresden</b>  | 📖 30 |

- 02 NUK 010I** Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Darstellung von Siedevorgängen mittels PIV und Optischer-Kohärenz-Tomographie **TU Dresden**  32
- 02 NUK 011A** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A **Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG)**  34
- 02 NUK 011B** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B **TÜV NORD SysTec GmbH & Co KG, Hamburg**  36
- 02 NUK 011C** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C **TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München**  38
- 02 NUK 011D** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D **Technische Universität Hamburg-Harburg**  40
- 02 NUK 011E** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E **TU München**  42
- 02 NUK 018A** Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt A: Einsatz von Soft Computing-Methoden für die Kernzustandsdiagnose **Hochschule Zittau/Görlitz**  44
- 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 **TU Dresden**  46
- 02 NUK 022A** Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**  48
- 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 **Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., München**  50
- 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**  52








- 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**  54
- 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**  56
- 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.**  58
- 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**  60
- 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)**  62
- 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**  64
- 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.**  66
- 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**  68

- 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)**  70
- 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)**  72
- 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)**  74
- 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**  76
- 02 NUK 111F** Kooperationsprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer **Universität der Bundeswehr München, Neubiberg**  78

## 1.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung

- |                    |  |  |       |
|--------------------|--|--|-------|
| <b>02 NUK 012D</b> | Verbundprojekt Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Abtrennung langlebiger Radionuklide (Partitioning); TP: Spektroskopische Untersuchungen zur Stabilität und Koordination von Aktinidkomplexen mit ausgewählten Extraktionsliganden | <b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>                                     | 📖 82  |
| <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>                                      | 📖 84  |
| <b>02 NUK 013B</b> | Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden  | <b>TU Dresden</b>  | 📖 86  |
| <b>02 NUK 013D</b> | Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Gamma-Imaging mit hochsegmentierten Germaniumdetektoren   | <b>Universität zu Köln</b>   | 📖 88  |
| <b>02 NUK 013E</b> | Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Herstellung und Nutzung von Aktinidentargets  | <b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz</b>                                      | 📖 90  |
| <b>02 NUK 014A</b> | Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente   | <b>TU Dresden</b>  | 📖 92  |
| <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>                                      | 📖 94  |
| <b>02 NUK 014C</b> | Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente   | <b>Universität Leipzig</b>   | 📖 96  |
| <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> | 📖 98  |
| <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>                                 | 📖 100 |













|                    |  |  |       |
|--------------------|--|--|-------|
| <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>   | 📖 102 |
| <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>                                      | 📖 104 |
| <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>                      | 📖 106 |
| <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>                            | 📖 108 |
| <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> | 📖 110 |
| <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>                                 | 📖 112 |
| <b>02 NUK 020C</b> | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C   | <b>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</b>                         | 📖 114 |
| <b>02 NUK 020D</b> | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D   | <b>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg</b>                                     | 📖 116 |
| <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>   | 📖 118 |
| <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>   | 📖 120 |
| <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>                                      | 📖 122 |
| <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> | 📖 124 |

- 02 NUK 021D** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**  126
- 02 NUK 021E** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**  128
- 02 NUK 021F** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F **Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main**  130
- 02 NUK 021G** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G **Leibniz Universität Hannover**  132
- 02 NUK 033** TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte **Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig**  134














### 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>  | 📖 138 |
| <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>   | 📖 140 |
| <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>   | 📖 142 |
| <b>02 NUK 002F</b> | Verbundprojekt: Strahlung und Umwelt: Ausbreitungspfade von Radionukliden in Luft, Wasser, Boden; TP: Wechselwirkung von Uran(VI) mit Biofilmen   | <b>TU Dresden</b>   | 📖 144 |
| <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>  | 📖 146 |
| <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>   | 📖 148 |
| <b>02 NUK 003C</b> | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; Teilprojekt: Mitochondriale Schäden  | <b>IUF – Leibniz-Institut für Umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</b> | 📖 150 |
| <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>   | 📖 152 |
| <b>02 NUK 005A</b> | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität  | <b>Forschungszentrum Jülich GmbH</b>  | 📖 154 |



- 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 **Universität Duisburg-Essen, Universitätsklinikum Essen**  156
- 02 NUK 005D** Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz zur Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit **Universität Rostock**  158
- 02 NUK 007E** Verbundprojekt Individuelle Strahlenempfindlichkeit und genomische Instabilität: Einfluss von Rb1 Gen-Variationen auf die Ausbildung akuter Nebenwirkungen und auf das Auftreten bösartiger Strahlenschäden nach den bei einer konventionellen Strahlentherapie angewendeten Gamma-Dosen **TU München**  160
- 02 NUK 015A** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A **Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**  162
- 02 NUK 015B** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B **Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Oberschleißheim**  164
- 02 NUK 015C** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt C **Friedrich-Schiller-Universität Jena**  166
- 02 NUK 015D** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt D **Leibniz Universität Hannover**  168
- 02 NUK 015E** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E **Forschungszentrum Jülich GmbH**  170
- 02 NUK 015F** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt F **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf**  172
- 02 NUK 015G** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G **Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Dresden**  174
- 02 NUK 015H** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H **Universität Bremen**  176
- 02 NUK 016A** Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt A **Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz**  178



- 02 NUK 016B** Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B **Klinikum der Universität München** 180
- 02 NUK 016CX** Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C **BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung GmbH, Bremen** 182
- 02 NUK 016D** Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D **TU Darmstadt** 184
- 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** 186
- 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** 188
- 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** 190
- 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** 192
- 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** 194
- 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** 196
- 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** 198

- 02 NUK 024A** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1 **Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter**  200
- 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**  202
- 02 NUK 024C** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3 **Klinikum der Universität München**  204
- 02 NUK 024D** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4 **Universitätsklinikum Essen**  206
- 02 NUK 024E** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5 **Charité - Universitätsmedizin Berlin**  208
- 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**  210
- 02 NUK 025B** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2 **Universität Konstanz**  212
- 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**  214
- 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**  216
- 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**  218
- 02 NUK 026C** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C **Universität Ulm**  220

|                    |  |   |   |
|--------------------|--|---|---|
| <b>02 NUK 026D</b> | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D | <b>Universitätsmedizin Rostock</b>  |  222   |
| <b>02 NUK 026E</b> | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E | <b>Universität Leipzig</b>  |  224   |
| <b>02 NUK 026F</b> | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F | <b>Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München</b>                                       |  226   |
| <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> |  228   |
| <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>                        |  230   |
| <b>02 NUK 030C</b> | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C   | <b>Friedrich-Schiller-Universität Jena</b>  |  232 |
| <b>02 NUK 030D</b> | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D   | <b>Leibniz Universität Hannover</b>   |  234 |
| <b>02 NUK 030E</b> | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E   | <b>TU München</b>   |  236 |
| <b>02 NUK 030F</b> | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F   | <b>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.</b>   |  238 |
| <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>                                     |  240 |
| <b>02 NUK 030H</b> | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H   | <b>Universität Bremen</b>   |  242 |
| <b>02 NUK 030I</b> | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I   | <b>Hochschule Ravensburg-Weingarten</b>   |  244 |
| <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>   |  246 |
| <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>                                       |  248 |

- 02 NUK 031C** Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt C **Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg**  250
- 02 NUK 031D** Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D **GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt**  252

## **2 Formalisierte Zwischenberichte**

### **2.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren**

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Entwicklung von CFD-Modellen für Wandsieden und Aufbau eines Bündeltests mit hochauflösender, schneller Röntgentomographie |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2009 bis 31.01.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>664.900,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Krepper                  |   |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Ziele betreffen im Einzelnen:

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Unter Ausnutzung der Erfahrungen mit dem in CFX implementierten Siedemodell wurden Rechnungen zur Nachanalyse der HZDR-Experimente durchgeführt. Zur Justierung der Parameter Blasenablösedurchmesser und Siedekeimdichte wurde ein vereinfachter Datensatz erstellt und eine Versuchsreihe gerechnet. Darauf basierend erfolgte die Aufstellung eines Datensatzes für das Bündel. Es wurden Auslegungs- und Vergleichsrechnungen zu den Experi-

menten mit dem gamma-densitometrischen Verfahren sowie mit dem schnellen Röntgentomographischen Verfahren abgeschlossen.

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

Die HZDR-Versuchsanlagen konnten erfolgreich betrieben werden. Am Bündelversuch wurde jeweils eine Testserie unter Anwendung des gamma-densitometrischen Verfahrens sowie eine Mess-Serie unter Einsatz der schnellen Röntgentomographie durchgeführt. Das Potential dieser Messverfahren konnte damit demonstriert werden.

Am Rossendorfer BE-Bündel wurden erste Experimente unter Einsatz des ROFEX-Scanners durchgeführt.

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

Die Arbeiten wurden am 31.01.2013 planmäßig abgeschlossen.

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

Rzehak, R.; Krepper, E. 2013 CFD Modeling of Bubble-induced Turbulence, International Journal of Multiphase Flow 55, 138-155

Krepper, E. 2013. Modelling, simulation and experiments on boiling processes in pressurized water reactors, Kerntechnik 78, 1, 35-37

Krepper, E.; Rzehak, R. 2013. CFD analysis of a void distribution benchmark in a rod bundle, Kerntechnik 78, 1, 38-42

Krepper, E.; Rzehak, R.; Lifante, C.; Frank, T. 2013. CFD-modelling of subcooled boiling. Kerntechnik 78, 1, 43-49

Rzehak, R.; Krepper, E. 2013. CFD for subcooled flow boiling: Parametric Variations, Science and Technology of Nuclear Installations, 687494

Rzehak, R.; Krepper, E. 2013. Bubble-induced Turbulence: Comparison of CFD Models, Nuclear Engineering and Design 253, 57-65

Krepper, E.; Rzehak, R. 2013. CFD analysis of a void distribution benchmark of the NUPEC PSBT tests - model calibration and influence of turbulence modelling, NURETH15, 12.-15.05.2013, Pisa, Italy

Krepper, E.; Rzehak, R.; Hampel, U.; Schneider, C.; Frank, T.; Fröhlich, J.; Hurtado, A.; Koch, E.; Koch, M.; Otic, I.; Sattelmayer, T. 2013. Modelling, simulation and experiments on boiling processes in pressurized water reactors, NURETH15, 12.-15.05.2013, Pisa, Italy

Krepper, E.; Rzehak, R.; Lifante, C.; Frank, T. 2013, CFD model of wall boiling considering the bubble size distribution, NURETH15, 12.-15.05.2013, Pisa, Italy

Krepper, E.; Rzehak, R. 2013, CFD modeling for subcooled flow boiling: Actual state and parametric variations, International Conference on Multiphase Flow 2013, 26.-31.05.2013, Jeju, Südkorea

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Turbulenz und Blasendynamik |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2009 bis 31.01.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>309.368,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Fröhlich           |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### 2.1 Large Eddy Simulation in Rohrbündelgeometrien mit Einbauten

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

### 2.2 Direkte numerische Simulation turbulenter Blasenströmungen:

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



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

In dem Berichtszeitraum wurden die Arbeiten zu den Arbeitstakten DNS3, DNS4, DNS5 und LES3 weitergeführt. Es wurden zusätzlich die Resultate des gesamten Teilprojektes in Form eines Abschlussberichtes verfasst.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine.

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

In dem Berichtszeitraum wurden keine studentische Arbeiten und Veröffentlichungen angefertigt. Die komplette Liste der im Rahmen des Teilprojektes angefertigten Berichte und Veröffentlichungen ist im Abschlussbericht zu finden.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16,<br>02763 Zittau   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen mit optischen Verfahren und Parameterbestimmung für CFD-Rechnungen an kleinskaligen Versuchsständen |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 30.01.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>312.830,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Hampel             |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

AP1.5 Der Abschlussbericht zum Teilprojekt 02NUK010C wurde fertig gestellt und wird demnächst veröffentlicht. Alle Inhalte zu den Arbeitspunkten AP1.1 bis AP1.4 werden darin ausführlich behandelt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Aktuell erfolgt die Beantragung eines Anschlussprojektes zur Untersuchung physikalischer und simulationsrelevanter Größen des Blasen- und Filmsiedens unter Validierung und Anwendung neuer Messverfahren.

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

C. Schneider, L. Kirsten, S. Meissner, A. Hurtado, E. Koch, R. Hampel: „Small scale boiling experiments using two-dimensional imaging with high-speed camera and optical coherence tomography”, *Kerntechnik* 78 (1), 2013

C. Schneider, R. Hampel, L. Kirsten, S. Meißner, A. Hurtado, E. Koch: Kleinskalige Siedeeperimente unter Einsatz zweidimensionaler Bildgebung mit High-Speed Kamera und Optischer Kohärenztomographie; 1. Projektstatusgespräch zur BMBF-geförderten Nuklearen Sicherheitsforschung, 06. – 07.03.2013, KIT, Campus Nord

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010D</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Übertragung der CFD-Wandsiedemodelle zur Anwendung in Lumped Parameter-Codes zur Beurteilung der RDB-Außenkühlung |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2009 bis 31.01.2013   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>194.241,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Koch               |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

Zum Abschluss des Vorhabens wurden die Ergebnisse im Abschlussbericht zusammengefasst.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Keine.

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

Schittek, Ulf; Koch, Marco K.: Simulation of External Reactor Vessel Cooling, Kerntechnik, Bd.78, Issue 1/2013.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010E</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Einfluss von Turbulenz und Sekundärströmungen auf das unterkühlte Strömungssieden in reaktortypischen Konfigurationen |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2009 bis 31.01.2013   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>356.503,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Sattelmayer        |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Auswertung der Messdaten wurde weitergeführt. Hierbei konnten zahlreiche Effekte zum Eintreten der Siedekrise beim Strömungssieden mit und ohne zusätzlichen Turbulenzeinfluss gezeigt werden. Es wurde eine Zusammenfassung der gesamten Messdaten aus der Projektlaufzeit erstellt, um die Daten für weitere Arbeiten gut zugänglich zu machen.

Um die Ergebnisse zu veröffentlichen wurden mehrere Manuskripte erstellt und bei Fachzeitschriften eingereicht. Ein Teil der Ergebnisse wurde bereits in einem Artikel in der Zeitschrift „Kerntechnik“ veröffentlicht (siehe 5.), zusätzlich wurden die folgenden zwei Manuskripte erstellt, die sich aktuell im Reviewprozess befinden:

Bloch, G., Muselmann, W., Saier, M., Sattelmayer, T.: „*A Phenomenological Study on Effects Leading to the Departure From Nucleate Boiling in Subcooled Flow Boiling*“, International Journal of Heat and Mass Transfer

Bloch, G., Kuczaty, J., Sattelmayer, T.: „*Application of High-Speed Digital Holographic Interferometry for the Analysis of Temperature Distributions and Velocity Fields in Subcooled Flow Boiling*“, Experiments in Fluids

Mit diesen Veröffentlichungen sollen die im Projekt ermittelten Ergebnisse zu den Siedevorgängen einer breiteren Öffentlichkeit vorgestellt werden. Eine weitere Veröffentlichung ist im Rahmen der Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“ im September 2013 geplant, mit der die im Rahmen des Projekts entwickelten optischen Sonden vorgestellt werden sollen:

Bloch, G., Elfner, J., Finke, K., Sattelmayer, T.: „*Setup and Fabrication of Cost Effective, Robust Fiber Optical Needle Probes for Application in Multiphase Flows*“, Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik 2013

Zusätzlich zu den genannten Veröffentlichungen wurde mit der Abfassung des Abschlussberichts begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Da mit Abschluss des Berichtszeitraums die Projektlaufzeit endet, sind außer der Erstellung der Abschlussberichte keine weiteren Arbeiten geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Bloch, G.; Sattelmayer, T.: „*Validation of Mechanistic CHF Models Using Optical Measuring Techniques*“, Kerntechnik, Vol. 01, S. 57-59

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Validierung von Unterkanal- und CFD-programmen anhand von Brennstab-Bündelversuchen |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 31.01.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>268.933,84 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Cheng                    |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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



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

Alle Ergebnisse wurden zusammengefasst und der Endbericht wurde erstellt. Ziele des Projekts sind erfolgreich erreicht.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Nach Ablauf des Projektes wird der Endbericht eingereicht.

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

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>ANSYS Germany GmbH, Birkenweg 14a, 64295 Darmstadt  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010G</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: CFD-Modellentwicklung und Validierung für die 3-dimensionale Simulation von Siedevorgängen in Brennelementen von DWR |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 31.01.2013  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>604.214,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>Dr.-Ing. habil. Frank        |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

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

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

AP5:

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

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

Darüber hinaus wurde im Berichtszeitraum an der Archivierung der im Projekt untersuchten Validierungs-Testfälle in der ANSYS-internen Validierungs-Testfall-Datenbasis gearbeitet. Diese Validierungs-Testfälle stehen allen ANSYS-Kunden auf Anforderung hin zur Verfügung und dienen ebenso in der ANSYS-CFD-Solver-Entwicklung der Validierung künftiger Modellerweiterungen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Das Projekt wurde im Januar 2013 erfolgreich abgeschlossen.

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

C. Lifante, Th. Frank and A. Burns: Wall boiling modeling extension towards critical heat flux., ERCOFTAC Technologietag, Süd- und Norddeutschland, Erlangen, 11. Oktober 2013 (akzeptiert).

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010H</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2009 bis 31.01.2013  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>468.048,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Hurtado            |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Planung und Konstruktion der Versuchsanlage

AP2: Errichtung und Inbetriebnahme der Versuchsanlage

AP3: Versuche ohne Kühlmittelzusätze

AP4: Versuche mit Kühlmittelzusätzen

AP5: Auswertung der Versuchsdaten

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

Im aktuellen Berichtszeitraum wurden die Auswertung der Experimente und die Interpretation der Ergebnisse abgeschlossen. Die bereits vorliegenden Erkenntnisse wurden bestätigt.

Den Abschluss bildeten die Dokumentation aller Experimente und Spezifika der Versuchsanlage SECA sowie die Erarbeitung des wissenschaftlichen Abschlussberichtes.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das Forschungsvorhaben ist abgeschlossen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

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

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

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

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

R. Nakath; C. Schuster; A. Hurtado: Bubble size distribution in flow boiling of aqueous boric acid under high pressure, Nuclear Engineering and Design (2013) pp. 562-570

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 010I</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Darstellung von Siedevorgängen mittels PIV und Optischer-Kohärenz-Tomographie |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2009 bis 31.01.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>283.252,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Koch               |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Wissenschaftliche und technische Teilziele sind deshalb:

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

In diesem Berichtszeitraum wurde die Segmentierung der Blasengeometrie aus vorhandenen OCT-Schnittbildsequenzen weiterentwickelt. Dazu wurden Datensätze verwendet, welche Blasensieden mit einer Schnittbildrate von 240 Hz zeigen. Um die Geometrie der Dampfblasen zu ermitteln, wurden mit dem Programm ImageJ (NIH, USA) eine automatisierte Segmentierung durchgeführt und in jedem Schnittbild die Konturen der Dampfblasen bestimmt. Wesentliche Schritte im Segmentierungsalgorithmus sind eine räumliche Glättung, eine Kontrastoptimierung, und zur Glättung der Grenzfläche ein iteratives Dilatieren, Erodieren und Mitteln. Ausgehend von diesem vorbereiteten Bild wird schwellwertbasiert ein Binärbild erzeugt und mit der Funktion „Analyze Particles“ in ImageJ die Grenzfläche bestimmt. Charakteristische Parameter, wie die Fläche der Dampfblase im OCT-Schnittbild und die axialen und transversalen Durchmesser können bestimmt werden. Um den zeitlichen Verlauf der Geometrie für einzelne Blasen zu extrahieren, wurde ein Tracking der Blasen implementiert, so dass auch mehrere Blasen in einem Schnittbild erfasst und separiert werden können. Die Segmentierung wurde auf mehrere Datensätze angewendet, welche Blasensieden bei verschiedenen Prozessparametern zeigen. Dabei führen unterschiedliche Volumenströme, Fluidtemperaturen und Wärmestromdichten zu veränderten Blasenfrequenzen, Blasendurchmessern und zu einem unterschiedlichen zeitlichen Wachstumsverhalten. Mit dem OCT-Verfahren und der entwickelten Segmentierungssoftware steht ein alternatives Werkzeug für die zeitlich aufgelöste und räumlich hochaufgelöste Untersuchung des Blasensiedens zur Verfügung.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Über den Projektzeitraum hinaus wird eine Erweiterung des bereits vorhandenen Messverfahrens angestrebt, so dass folgende Ziele formuliert werden:

- Erweiterung und Quantifizierung der Leistungsfähigkeit des Segmentierungsalgorithmus
- Weitere Steigerung der Schnittbildrate durch Vergrößerung der Repetitionsrate des FDML Lasers sowie durch Kombination mit einem effizienterem sinusförmigen Scanmuster
- Korrektur von Bildartefakten, die durch Reflexion und Brechung an Dampf-Fluid Grenzflächen entstehen.
- Validierung der Messmethode sowie der numerischen Postprozessierung an einfachen Strömungs- und Siedemodellen und im Vergleich mit etablierten Bildgebungsverfahren (high-speed Videometrie, PIV).
- Mehrdimensionale Messung der Fluidströmung in der Nähe der Dampfblasen und Untersuchung des Einflusses auf den Siedevorgang.

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

C. Schneider, L. Kirsten, S. Meissner, A. Hurtado, E. Koch, R. Hampel: „Small scale boiling experiments using two-dimensional imaging with high-speed camera and optical coherence tomography“, Kerntechnik 78 (1), 54-56, (2013)

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG), Hansastr. 27c, 80686 München                                |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 011A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2010 bis 31.12.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>484.253,45 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 dem 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). 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**

AP2: Fertigstellung des Versuchsstandes. Fortschreitende Instandsetzung der vorhandenen Anlage, Austausch und Reparatur vorhandener Komponenten und Messtechnik aufgrund auftretender Defekte. Vorversuche (ohne Messdatenerfassung).

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP2: Versuchsdurchführungen zur Validierung der Experimente an der Technischen Universität Hamburg-Harburg und der Universität der Bundeswehr München. Unter Umständen ohne Messtechnik.

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

Teilnahme an der NURETH 2013 in Pisa. Postervortrag.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>TÜV NORD SysTec GmbH & Co KG, Große Bahnstr. 31,<br>22525 Hamburg  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 011B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2010 bis 31.12.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>496.419,92 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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, AP3, AP4, AP5 sowie APS.

AP2: Im Berichtszeitraum wurden die Versuche an den Versuchsanlagen der TUHH und der UniBW fortgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden in mehreren Telefonkonferenzen und beim Projekttreffen an der UniBW in München vorgestellt. Bei diesen Gelegenheiten hat sich der TÜV NORD aktiv an der Interpretation der Ergebnisse und der weiteren Planung der nächsten Versuchsreihen beteiligt.

- AP3: Die Entwicklung des Kondensationsschlagmodells ist abgeschlossen. Das an der TU München entwickelte Modell beschreibt den Wärme- und Stoffaustausch zwischen den Phasen Dampf und Wasser und beruht auf dem weitgehend mechanistischen Oberflächenerneuerungsmodell. Daneben wurde vom TÜV NORD ein 1D-Transportmodell für die Entstehung und den Mitriss von Tropfen an einem Wellenscheitel entwickelt, da in der Realität durch die hohen Relativgeschwindigkeiten im Nachlauf der Welle ein Tropfenfeld entsteht, durch das die Phasengrenzfläche und demzufolge die lokale Kondensationsrate signifikant erhöht werden. Zur Berechnung der richtigen Druckstoß-Höhe ist die Modellbildung des Tropfenfeldes erforderlich.
- AP4: Das zuvor beim TÜV NORD entwickelte Tropfenmodell wurde in DYVRO implementiert. Zudem wurden die nachfolgend beschriebenen Programmierarbeiten an DYVRO durchgeführt. Parameterstudien lassen sich nun automatisieren. Für DYVRO wurde eine neue Randbedingung zur vereinfachten Darstellung der in den Anlagen verbauten Separatoren entwickelt. Ferner wurden das Verzweigungsmodell in DYVRO und die Berechnung von geschichteten Strömungen in vertikalen Rohrabschnitten weiter verbessert. Diese Einzelschritte waren notwendige und nun abgeschlossene Vorarbeiten zur Nachrechnung der CIWA-Experimente. Des Weiteren wurden ein DYVRO-Modell für die Anlage der TUHH erstellt und bereits erste Verifizierungsrechnungen für Einzeleffekte durchgeführt (z. B. wurde das Auffüllen der Teststrecke erfolgreich simuliert).
- AP5: Es fand eine Telefonkonferenz zum Thema Validierung statt, während der ein Konzept für die Validierungsrechnungen entwickelt wurde.
- APS: Bei der NURETH15-Tagung gab es eine technische Sitzung, in der ausschließlich Vertreter des CIWA-Projektes vorgetragen haben. Die Vorträge stießen auf eine durchweg positive Resonanz. Des Weiteren hat die Organisation des 2. Druckstoßseminars begonnen. Das Seminar wird am 13./14. November 2013 in Hamburg beim TÜV NORD stattfinden. Ein vorläufiges Programm wurde zur Abstimmung an die Projektpartner verschickt.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Nachfolgend gehen wir nur auf die AP ein, in denen im folgenden Berichtszeitraum Arbeiten durchgeführt werden sollen. Dies sind die AP2, AP4, AP5, AP6 sowie der APS.

- AP2: Es ist geplant, an ausgewählten Experimenten teilzunehmen und bei der (phänomenologischen) Auswertung der Versuche zu den Kondensationsschlägen mitzuwirken.
- AP4: Die nächsten Schritte sind die Implementierung des an der TUM entwickelten Oberflächenerneuerungsmodells und die Validierungsrechnungen mit Hilfe der Versuchsdaten aus dem CIWA-Projekt. Zurzeit werden die Datensätze für die Versuchsanlagen erstellt. Nach deren Fertigstellung beginnen die Validierungsrechnungen. Die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen von den Projektpartnern eingesetzten Codes werden anschließend im Rahmen eines Methodenvergleiches gegenüber gestellt.
- AP5: Die Software-Qualifizierung liegt weiterhin konzeptionell in der Hand des TÜV SÜD. Es ist geplant, zeitnah einen gemeinsamen Qualifizierungsplan aufzustellen.
- AP6: Die Zuarbeit des TÜV NORD zum Abschlussbericht soll bis Ende Oktober 2013 erfolgen. Der TÜV NORD unterstützt den Projektleiter des AP6 UMSICHT bei der Zusammenstellung des Abschlussberichtes.
- APS: Die Organisation des 2. Druckstoßseminars wird fortgeführt. Als nächstes werden die Einladungen erstellt und verschickt. Mitte/Ende September sollen dann die fertigen Beiträge der Projektpartner vorliegen und die Seminarunterlagen erstellt werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- F. Blömeling, T. Neuhaus, A. Schaffrath, Development and Validation of DYVRO for the Simulation of Condensation Induced Water Hammer: Comparison with a Two-Phase Slug Model and with Experimental Data of the Water Cannon Experiment, NURETH-15, Pisa, Italy, May 12.-17., 2013
- F. Blömeling, T. Neuhaus, A. Schaffrath, 1D Models for Condensation Induced Water Hammer in Pipelines, Kerntechnik, Carl Hanser Verlag 78 (2013) 1, pp. 31-34

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Westendstr. 199,<br>80686 München  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 011C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2010 bis 31.12.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>202.790,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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

- AP5.1: Die Arbeiten zum Validierungskonzept wurden bis auf die Festlegung der Validierungsmatrix abgeschlossen. Der Arbeitsbericht zu AP5.1 „Konzeptionelle Planung der durchzuführenden Parameteruntersuchungen und Validierungs-berechnungen“ wurde weiter bearbeitet.
- AP5.2: Die Arbeiten zur Entwicklung und ersten Erprobung einer C- und FORTRAN-Schnittstelle in paralleler Umgebung unter Linux mit OpenMPI (CPI) zur Kopplung verschiedener Berechnungscodes (z. B. 3D-CFD-Code OpenFOAM mit 1D Druckwellencodes) wurden abgeschlossen. Die Dokumentation dieser Arbeiten in Form des Arbeitsberichtes „Implementation der Schnittstellen für die Kopplung der entwickelten Berechnungsalgorithmen mit bestehenden Programmodulen zur Berechnung fluiddynamischer Transienten“ wurde fortgesetzt.
- Für das 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics NURETH-15, 12 – 15 May, 2013 in Pisa, Italy wurde in Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr München (UniBW) ein Beitrag „Simulation of the condensation induced water hammer (CIWA) - comparison of numerical calculations with experimental investigations at the UniBW“ erarbeitet.
  - Der Fachbeitrag „Condensation induced water hammer (CIWH) – relevance in the nuclear industry and state of science and technology“ wurde zur Veröffentlichung in der Zeitschrift Kerntechnik erstellt.

Im Berichtszeitraum wurde an einer „skype“-Projektkonferenz und an zwei Abstimmungsgesprächen mit den CIWA-Partnern Universität der Bundeswehr München (UniBW) und Technische Universität München (TUM) teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2.4: Teilnahme an Versuchen am Versuchsstand des CIWA-Partners UniBW
- AP5.1: Abstimmung und Festlegung einer Validierungsmatrix  
Fertigstellung des Arbeitsberichts
- AP5.2: Vervollständigung der Dokumentation zur Entwicklung und ersten Erprobung der Programmschnittstelle CPI
- AP5.3: Nachrechnung eines Versuches der UniBW mit dem 3-D Strömungssimulationscode ANSYS-CFX. Analytische Studien von ausgewählten Versuchen der UniBW mit dem 1-D Systemcode RELAP5/Mod3.3  
Beiträge zur Softwarequalifizierung
- AP6.1: Erstellung von Textbeiträgen zum CIWA-Abschlussbericht  
Beitrag auf dem 2. CIWA-Druckstoßseminar am 13.–14.11.2013 in Hamburg

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

H. Swidersky: „Condensation induced water hammer (CIWH) – relevance in the nuclear industry and state of science and technology“; Zeitschrift Kerntechnik 2013, Volume 78/1

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95,<br>21073 Hamburg   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 011D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2010 bis 31.12.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>305.621,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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:

- Durchführung der Versuche der am 15.11.2012 besprochenen Testmatrizen.
- Durchführung zweier Versuchsreihen unterschiedlicher Unterkühlung mit insgesamt 185 Versuchen.
- Statistische Auswertung und Interpretation der durchgeführten Versuche.
- Aufbereitung der Messdaten zur Nachrechnung mit diversen Simulationsprogrammen bei den Verbundpartnern.
- Umbauarbeiten an der Versuchsanlage zum Einbau eines transparenten Rohrabschnitts.
- Vorversuche zur Quantifizierung der Brechungsindexanpassung im transparenten Rohrabschnitt.
- Aufbau und Inbetriebnahme des Versorgungskreislaufes des transparenten Rohrabschnitts.
- Begonnen: Bachelor-Arbeit zur Bearbeitung von Testmatrizen.
- Begonnen: Bachelor-Arbeit zum Aufbau und zur Inbetriebnahme des transparenten Rohrabschnitts.

Simulationsvorhaben:

- OpenFOAM-Simulationen des isothermen Einspeisevorgangs in die Teststrecke der Versuchsanlage an der TU Hamburg-Harburg.
- Begonnen: Master-Arbeit zur Durchführung der Simulation.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Experimentelle Vorhaben:

- Weitere Auswertung der bislang durchgeführten Experimente.
- Fertigstellung der restlichen Teststrecke um den transparenten Rohrabschnitt.
- Optische hochauflösende Auswertung der Strömungsverhältnisse in der Teststrecke.

Simulationsvorhaben:

- Nachrechnung von ausgewählten Experimenten an der Versuchsanlage der TU Hamburg-Harburg mit OpenFOAM.
- Aufbereitung entwickelter Randbedingungen zur Weitergabe an Projektpartner.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

I. Parusel: Experimentell gestützte Modellierungsansätze für Kondensationsschläge, Bachelor-Arbeit, TU Hamburg-Harburg 2013

Vortrag im Rahmen des 1. Projektstatusgesprächs zur BMBF-geförderten Nuklearen Sicherheitsforschung: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen, C. Urban, M. Schlüter, 06.03.2013

Vortrag und Beitrag zur Tagungsmitschrift im Rahmen des 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal - Hydraulics, NURETH-15: Optical Investigations on Key Phenomena of Condensation Induced Water Hammers, C. Urban, M. Schlüter, 16.05.2013

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 011E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2010 bis 31.12.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>216.560,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Macián-Juan        |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP3:

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



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

Zu AP1:

Die erste Fassung des AP1-Abschlussberichts wurde abgeschlossen und an die Partner zur Überprüfung verschickt.

Zu AP3:

Der Validierungsprozess des neuentwickelten Wärmeübergangmodells wurde im Falle von ANSYS CFX plus Hybridoberflächenenerneuerungsmodell und ATHLET plus Hybridoberflächenenerneuerungsmodell, weitergeführt. Dabei wurden gleichermaßen öffentlich zugängliche Messdaten aus der PMK2-Versuchsanlage verwendet als auch detaillierte Messdaten aus den Partnerinstitutionen TUHH und UniBW verwendet. Für die UniBW-Anlage wurde ein ATHLET-Eingabedatensatz erstellt. Für die TUHH wurden CFD-Rechengitter erstellt die unterschiedliche Anlagendomäne wiedergeben. In einem Rechengitter wurde die Domäne um das T-Stück modelliert um das Einspritzverhalten genauer zu untersuchen. Zwei weitere Rechengittern wurden erstellt für die Untersuchung des Gesamtverhaltens in der Testsektion.

Validierungsrechnungen des neuentwickelten OpenFOAM-Solvers wurden begonnen nachdem die Entwicklungsarbeiten abgeschlossen wurden. Das Hauptproblem, der ungebundenen Lösungsgrößen, bedingt durch OpenFOAM's sequentiellen Lösungsalgorithmus der Erhaltungsgleichungen, konnte überwunden werden. Erste Nachrechnungen der PMK2- und TUHH-Anlage sind durchgeführt worden.

AP3 weitgehend abgeschlossen, eventuelle Optimierungen des neuen Modells erfolgen nach der Durchführung des Validierungsplans.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Der Validierungsprozess des in CFX, OpenFOAM und ATHLET implementierten Hybridoberflächenenerneuerungsmodells soll abgeschlossen werden. Dabei sollen hauptsächlich die von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Messdaten verwendet werden aber auch andere öffentlich zugängliche Messdaten. Mit dem Systemcode ATHLET werden die Anlagen aus UMISCHT und UniBW nachgerechnet. Die TUHH-Versuchsanlage wird mit ANSYS CFX und OpenFOAM simuliert. Der Abschlussbericht für AP3 wird erstellt.

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

Ein Vortrag wurde im Rahmen der NURETH15 Konferenz gehalten, ein weiterer Vortrag ist für ICONE21 in Juli/Aug 2013 vorgesehen.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 018A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>649.368,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Kratzsch           |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Die umfangreichen Recherchearbeiten zum Stand von Wissenschaft und Technik zu Kernschmelzunfällen in DWR wurden in einer technischen Dokumentation zusammengefasst. Ausgehend von den Recherchearbeiten wurden drei projektrelevante Kernschmelzszenarien definiert, die sich im Wesentlichen durch unterschiedliche Materialverlagerungen und Füllstandsverläufe des Kühlmittelinventars unterscheiden. Weiterhin erfolgte für die drei Kernschmelzszenarien eine Unterteilung in signifikante Kernzerstörungszustände sowie für diese Zustände eine qualitative Abschätzung der Gammastrahlungsverteilung an der Außenseite der RDB-Wandung.
- AP1.2: Es wurden Recherchen zum Stand von Wissenschaft und Technik zu den Themen „Soft Computing“, „Signalverarbeitung“ und „Strahlungsmesstechnik“ durchgeführt.
- AP1.3: Im Rahmen einer studentischen Arbeit wird momentan eine Machbarkeitsanalyse zur Auslegung des Kleinversuchsstands durchgeführt. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Erstellung und der Bewertung geeigneter Lösungsvarianten für den Versuchsstand.  
Im Simulationssystem „Dynstar“ erfolgte die programmtechnische Umsetzung eines Modells für Strahlungstransportrechnungen und die Simulation von Gammastrahlungsverteilungen. Das Modell dient u. a. zur Unterstützung der Auslegung des Kleinversuchsstandes.
- AP1.4: Ausgehend von den Rechercheergebnissen des AP1.1 wurde ein Ansatz zur Entwicklung von Methoden für die Kernzustandsdiagnose erarbeitet. Der grundlegende Gedanke dieses Ansatzes ist, dass die gemessenen Signale von Gammastrahlungssensoren soweit aufgearbeitet werden, dass daraus Gammastrahlungsverteilungen an der Außenseite der RDB-Wandung berechnet werden können. Mit Hilfe geeigneter Klassifikationsmodelle kann nachfolgend durch die berechneten Gammastrahlungsverteilungen auf den Zustand des RDB-Inventars während eines Kernschmelzunfalls geschlossen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: Die Ergebnisse der Recherchearbeiten zu schweren Störfällen sind in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner durch Simulationsrechnungen zu validieren.
- AP1.2: Weitere 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: Nach Abschluss der Machbarkeitsanalyse zur Auslegung des Kleinversuchsstandes erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner die Auswahl einer geeigneten Versuchsstandvariante für den weiteren Projektverlauf. Im Zusammenhang mit der weiteren Einarbeitung in die Richtlinien des Strahlenschutzes ist die Planung, der Aufbau und die Inbetriebnahme der ausgewählten Versuchsstandvariante Gegenstand nachfolgender Arbeiten.  
Für das umgesetzte Modell im Simulationssystem „Dynstar“ werden im weiteren Verlauf eine Validierung und eine Dokumentation zur Funktionsweise erfolgen. Des Weiteren ist die Integration einer vollständigen Nukliddatenbank in das Modell geplant.
- AP1.4: Im weiteren Verlauf sind verschiedene Klassifikationsalgorithmen (klassische und Soft Computing) für die Entwicklung von Methoden zur Kernzustandsdiagnose auf deren Eignung hin zu analysieren und umzusetzen. Die Grundlage für die Untersuchungen bildet dabei ein idealisierter Kernschmelzunfall (Materialverlagerungen, Gammastrahlungsverteilungen). Die Klassifikationsalgorithmen sind anhand ihrer Fehlerkenngrößen und Robustheit (z. B. Ausfall einzelner Komponenten des Messsystems) zu vergleichen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- Schmidt, S.; Kratzsch, A.; Fiß, D.: Analyse der Vorgänge im Reaktordruckbehälter eines DWR während schwerer Störfälle. NWK 14, Brandenburg an der Havel, 18. April 2013
- Schmidt, S.; Kratzsch, A.; Fiß, D.: Analyse der Kernschmelzzustände für die Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion von Füllstandsänderungen und der Deformation des Kerns in Druckwasserreaktoren. Jahrestagung Kerntechnik, Berlin, 14.-16. Mai 2013

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 018B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>363.588,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Hampel             |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Die Einarbeitung in MCNP ist abgeschlossen. Die Literaturstudie ist ebenfalls in großen Teilen abgeschlossen. Eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik wird erarbeitet. Es wurden einige Artikel zur Füllstandsmessung mittels Gammastrahlendetektion gefunden, die der grundsätzlichen Machbarkeit dieses Projektes nicht widersprechen.
- AP1.2: Es wurden Monte Carlo-Rechenmodelle zur Simulation eines generischen DWR-Kerns sowie zum Strahlungstransport an den Reaktordruckbehälter und bis in den biologischen Schild entwickelt.
- AP1.3: Als Grundlage für die Sensitivitätsanalysen wurde das Neutronenstrahlungsfeld am RDB im laufenden Betrieb berechnet. Das Computerprogramm ORIGEN wurde von der NEA akquiriert, um die Aktivierung des RDB nach mehreren Jahren Laufzeit zu bestimmen. Das Gammastrahlungsfeld außerhalb des RDB wurde für einen Reaktor im Betrieb berechnet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: Suche nach Dokumentation zu bereits vorhandener Instrumentierung an Druckwasserreaktoren.
- AP1.2: Festlegung auf einen Satz von definierten Füllständen, Kernzuständen und einer Zeitskala für einen ausgewählten unterstellten schweren Störfall. Anschließend Modellierung dieser Zustände in MCNP. Dabei muss entsprechend der Zeitskala die Strahlungsquelle für den jeweiligen Zustand bestimmt und modelliert werden.
- AP1.3: Die Aktivierung der Reaktorkomponenten (hauptsächlich RDB) soll für verschiedene Laufzeiten und unterschiedliche Zeiten nach der Reaktorschnellabschaltung berechnet werden. Aus der Aktivierung lässt sich dann der Hintergrund für die Strahlungsmessungen bestimmen. Außerdem soll eine Berechnung der Gamma- und Neutronenstrahlungsverteilung außerhalb des Kerns für alle modellierten Zustände erfolgen. Durch Überlagerung der Verteilungen mit dem Hintergrund erfolgt dann die Sensitivitätsanalyse.
- AP1.4: Aus der Sensitivitätsanalyse (siehe geplante Weiterarbeiten, AP1.3) sollen Informationen zu möglichen Positionen, Anordnungen und Arten von Detektoren gewonnen werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp-<br>lergraben 55, 52062 Aachen   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 022A</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines<br>Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung inno-<br>vativer Extinktionsphotometrie |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 31.12.2015   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>681.684,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>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

## 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1:

Die Erarbeitung der Gesamtkonzeption (TPA-EA 1.1) wurde fristgerecht abgeschlossen. Daher konnten im Berichtszeitraum die Zielspezifikationen (TPA-EA 1.2) erstellt und mit allen Projektpartnern abgestimmt werden.

Zur Koordination (TPA-EA 1.3) des Projektes trafen sich die Projektpartner zu einem zweitägigen Projekttreffen. Hier wurden die bisherigen Fortschritte der einzelnen Projektpartner dargestellt, Absprachen für die Durchführung von Stresstests von Einzelkomponenten (TPA-EA 3.1) getroffen und das weitere Vorgehen für den kommenden Berichtszeitraum abgestimmt. Die Konzentrationsspektren aus vorherigen Versuchen wurden den Projektpartnern zur Überprüfung des erweiterten Auswertalgorithmus zur Verfügung gestellt.

AP2:

Die konventionellen Messgeräte (APS, SMPS) zur Aerosolbestimmung wurden im Berichtszeitraum kalibriert und gewartet, so dass mit Versuchen zur Charakterisierung des Zweikomponenten-Referenzaerosols (TPA-EA 2.1) begonnen werden konnte. Im Rahmen von Vorversuchen wurden die Einzelkomponenten und eine Mischung beider Aerosole unter Umgebungsbedingungen untersucht. Die im Rahmen der Auslegung des Kleinversuchsstand sich ergebene Einspeisegeometrie und die dort herrschenden Strömungsbedingungen müssen noch ausführlicher auf ihre Auswirkungen auf das Referenzaerosol betrachtet werden.

Mit der Einzelaufgabe Bereitstellung eines Autoklaven (TPA-EA 2.2) wurde im Berichtszeitraum begonnen. Hierfür wurden die unterschiedlichen Stresstests für die Komponenten der Messtechnik definiert und Anforderungen an den Autoklaven festgelegt. Der Aufbau des Autoklaven konnte im Berichtszeitraum abgeschlossen werden und steht den Projektpartnern für die anstehenden Stresstests zur Verfügung.

Die Auslegung des Kleinversuchsstand (TPA-EA 2.3) ist abgeschlossen. Angebote für die Errichtung wurden bei verschiedenen Firmen angefragt. Mit der Auslegung der Behälterheizung konnte nach Abschluss der Auslegung begonnen werden. Erste Angebote wurden bereits eingeholt. Die bestellten Komponenten für die Erweiterung des Messdatenerfassungssystems wurden geliefert und werden zurzeit eingebunden. Weitere Vergleichsangebote für die konventionelle Messtechnik (u. a. Temperatur, Druck und Feuchte) wurden eingeholt und die Entsprechenden Bestellungen getätigt. Zur Auslegung des Behältereinlaufs wurden zur Strömungsoptimierung CFD-Rechnungen durchgeführt, damit eine optimale Strömungsführung auch mit dem Aerosol gewährleistet werden kann.

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

Im kommenden Berichtszeitraum liegt der Fokus der Arbeiten auf der Bereitstellung des Kleinversuchsstandes. Neben der Auslieferung des Behälters ist die Errichtung der Infrastruktur für den Behälter ein wichtiger Bestandteil der weiteren Arbeiten. Nach Auslieferung der konventionellen Messtechnik kann die Einbindung ins Messdatenerfassungssystem erfolgen. Der Aufbau der Infrastruktur für den Versuchsstand muss im kommenden Berichtszeitraum abgeschlossen werden. Diese Arbeiten sind notwendig, damit planmäßig ab dem vierten Quartal 2013 mit der Durchführung kleinskaliger Versuche (AP3) begonnen werden kann. Daher werden im kommenden Berichtszeitraum auch die Stresstests der einzelnen optischen Messgeräte im o. g. Autoklaven beginnen.

Ein weiterer wichtiger Arbeitspunkt betrifft die Herstellung des Zweikomponenten-Referenzaerosols aus  $\text{SnO}_2$  und  $\text{CsI}$  unter den spezifizierten Versuchsrandbedingungen im Kleinversuchsstand.

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

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Hansastr. 27c, 80686 München  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 022B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 31.12.2015   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>605.403,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 ersten Halbjahr sollte die Konzeption der Erweiterung des bestehenden Spektrometers abgeschlossen und anschließend die eigentliche Erweiterung im IPM begonnen werden. Dazu gehören die Bestellung von Bauteilen und Schlüsselkomponenten, Konstruktion und Fertigung mechanischer und elektronischer Komponenten sowie deren Inbetriebnahme. Im ursprünglichen Projektzeitplan war eine Fertigstellung des Gerätes für Oktober 2013 vorgesehen. Beim Projekttreffen im März 2013 wurde jedoch vereinbart, dass das Gerät nach Möglichkeit im Juni 2013 für erste Messungen zur Verfügung stehen soll. Es wurde angestrebt auch schon eine erste Variante der Auswertesoftware vom CCES bereitgestellt zu bekommen.

*Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:*

Parallel zur Weiterentwicklung des bestehenden Streulichtphotometers sollte das Konzept für das Messgerät zur Bestimmung der relativen Feuchte weiterentwickelt und verfeinert werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

*Projekttreffen in Darmstadt:*

Im März 2013 gab es ein Projekttreffen in Darmstadt. Ziel war es, die bisherigen Ergebnisse der Projektpartner zu präsentieren und weiterführende Arbeiten zu koordinieren. Wichtig war auch die Festlegung der Zielspezifikationen, die an anderer Stelle weiter ausgeführt sind. Nähere Angaben sind dem Besprechungsprotokoll zu entnehmen.



*Weiterentwicklung des bestehenden Streulichtphotometers:*

Für den kurzwelligen Spektralbereich ist ein zweiter (Silizium-) Detektor notwendig. Zunächst sollte eine kommerziell erhältliche Detektoreinheit Verwendung finden. Beispielsweise wäre der Detektor C10439-01 von Hamamatsu für den Wellenlängenbereich nicht aber für die nötige Grenzfrequenz geeignet gewesen. Da die Detektoreinheit in einem komplett geschlossenen Gehäuse eingebaut werden sollte und auch das Gehäuse des Gerätes bereits feststand, gab es Einschränkungen bezüglich der möglichen Bauform. Deshalb wurde entschieden, eine eigene Detektoreinheit zu bauen. Diese wurde erfolgreich in Betrieb genommen.

Die Hauptplatine des Gerätes wurde auf die zweite Detektoreinheit erweitert, gefertigt und bestückt. Eine erste Inbetriebnahme wurde erfolgreich durchgeführt.

Für den neuen Spektralbereich ist ein Austausch der vorhandenen Goldspiegel gegen Silberspiegel notwendig. Hier gab es Schwierigkeiten bei der Lieferung, denn einige Spiegel wurden falsch beschichtet, einer wiederum überstand den Beschichtungsprozess nicht. Ersatzweise wurde deswegen an einer Position ein Aluminiumspiegel eingesetzt, welcher allerdings eine geringere Reflektivität aufweist.

Zur Trennung der zwei Spektralbereiche für die Detektoren ist ein entsprechendes Langpassfilter notwendig. Bei der ersten Inbetriebnahme stellte sich heraus, dass das Filter nicht das gewünschte Durchlassverhalten nach Datenblatt zeigte. Vermutlich wurde die Filterschicht auf einem ungeeignetem Substrat aufgebracht. Es wurde mit der Firma Kontakt aufgenommen um das Problem zu lösen.

Bei den ersten Rauschmessungen mit dem „alten“ Streulichtphotometer wurde festgestellt, dass aufgrund des halboffenen Aufbaus Umwelteinflüsse (Wasserdampf) eine Auswirkung auf die Messung haben können und eine lange Aufwärmzeit des Gerätes erforderlich macht. Daher wurde eine hermetisch dichte Umhausung der Detektoren und der Lichtquelle konstruiert.

Zur Erhöhung der Betriebssicherheit wurde die Durchführung ins Containment ebenfalls umkonstruiert und mit einem Drucksensor ausgestattet. Dadurch wird es möglich, eventuelle Lecks des Messkopfes im Inneren des Containments zu erkennen und entsprechend darauf zu reagieren. Die für die Ummantelung der Faser notwendigen Wellschläuche aus Edelstahl wurden eigens für diesen Zweck vom Hersteller mit 20 bar vorgereckt. Für den Hersteller war das eine Neuerung und so kam es auch hier zu terminlichen Verschiebungen der Lieferung.

Die breitbandige Faser wurde bestellt und ist geliefert worden.

Aufgrund von Lieferschwierigkeiten von Schlüsselkomponenten war eine Auslieferung des Gerätes im Juni 2013 unmöglich.

*Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:*

In der Konzeptionsphase des SteamFASP stellte sich heraus, dass kommerziell verfügbare Spektrometer nicht notwendigerweise schlechtere Spezifikationen als eine IPM-Konstruktion haben würden. Deswegen wurde beschlossen, ein kommerzielles Gerät zu verwenden und die freigewordenen Kapazitäten in die Auswertung der Messergebnisse zu stecken. Es wurde ein entsprechendes Spektrometer von OceanOptics gekauft. Damit wird es möglich, früher als geplant, reale Messungen durchzuführen. Für einen ersten Aufbau sollen die passenden Fasern bestellt und eine entsprechende Lichtquelle analog dem Aerosolphotometer aufgebaut werden. Gemessen wird in einer kleinen Testzelle, welche von außen beheizbar ist und definierte Menge Wasser für eine definierte Luftfeuchtigkeit aufnehmen kann.

Für den Anschluss mehrerer Messstrecken (optional) am Spektrometer wurde ein optischer Multiplexer beschafft.

**4. Geplante Weiterarbeiten***Weiterentwicklung des bestehenden Streulichtphotometers:*

Nach der Komplettmontage des Gerätes wird es zunächst kalibriert. Dazu wird ein vorhandenes Spektrometer (IPM) verwendet. Anschließend werden erste Messungen mit einem Aerosolgenerator mit bekannter Partikelgrößenverteilung durchgeführt. Das ermöglicht auch erste Tests des Auswertalgorithmus vom CCES. Danach steht das erweiterte FASP für weitere Messungen zur Verfügung (z. B. Autoklave von Becker Technologies).

*Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:*

Im nächsten Halbjahr wird eine Testzelle konstruiert und gefertigt und in einem ersten Aufbau werden erste Erfahrungen mit der Messung der relativen Feuchte gemacht. Die Messungen sollen hinsichtlich möglicher Genauigkeit und Messbereich untersucht werden.

Im September wird es ein weiteres Projekttreffen in Eschborn geben.

**5. Berichte, Veröffentlichungen**

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp-<br>lergraben 55, 52062 Aachen  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 022C</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines<br>Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt C: Entwicklung eines ef-<br>fizienten Auswertalgorithmus zur Mie-Inversion |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 31.12.2015  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>280.116,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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 Bestandsaufnahme (AP1.2) zur bestehenden Software und über in der Literatur bekannte Inversionsverfahren wurde abgeschlossen. Ebenso wurde gemeinsam mit den Partnern das Gesamtkonzept (AP1.1) in Zielspezifikationen festgelegt.

Die theoretischen Untersuchungen zum Auswertalgorithmus (AP2.1) wurden auf Basis der Tychonov-Theorie begonnen, und es wurden erste Experimente in der Software durchgeführt. Die Implementierung der Mie-Theorie konnte mit Hilfe unabhängiger anderer Softwarepakete validiert werden. Zusätzlich zu den vorgesehenen Arbeitspaketen, und durch zusätzlichen Personaleinsatz, wurde eine Frequenzerweiterung der Mie-Theorie in der vorhandenen IPM-Software implementiert. Das AP2.3 wurde im Anschluss durch eine Literaturrecherche im Hinblick auf eine Erweiterung der Mie-Theorie auf nicht-sphärische Partikel begonnen. Zur Parametrisierung der Störspektren (AP3.1) wurden von den Kooperationspartnern Messungen und Fehlerschranken zur Verfügung gestellt, die in die Inversionsalgorithmen einfließen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die theoretischen Untersuchungen zum Auswertalgorithmus sollen abgeschlossen werden, und die Ergebnisse in eine neue Software-Implementierung einfließen. Insbesondere sollen die Informationen über Störspektren durch das Diskrepanzprinzip zur automatischen Wahl von Regularisierungsparametern führen. Anhand verschiedener Beispieldatensätze und erster Messdaten des erweiterten FASP-Geräts sollen erste Rechnungen durchgeführt werden. Dabei soll insbesondere die Software-Schnittstelle zum Messgerät fertiggestellt werden.

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

Ein Bericht zur Bestandsaufnahme zu den Inversionsalgorithmen befindet sich in der Fertigstellung.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 022D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 31.12.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>427.668,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Nach Ausarbeitung der Zielvereinbarung und Definition der detaillierten Zielvorgaben wurde mit einer verfeinerten Selektion geeigneter Absorptionslinien begonnen. Anhand der Vorgaben zu Druck-, Temperatur- und Konzentrationsbereichen während einer Störfallsimulation wurden Spektren mittels Parametervariation für verschiedenen Szenarien berechnet. Im Anschluss an die Selektion geeigneter Absorptionslinien wurde mit dem Aufbau des Absorptionsspektrometers begonnen. Dazu wurden die beschafften Geräte angepasst, charakterisiert und in ersten Laboraufbauten hinsichtlich der Zielkenngrößen untersucht. Des Weiteren wurden erste Messungen (FTIR) der spektroskopischen Liniendaten zur Unterstützung der Linienselektion durchgeführt um im nächsten Berichtszeitraum in die Laserbeschaffung zu gehen. In generischen Laboraufbauten wurden verschiedene Sensorkopf-Konzepte insbesondere hinsichtlich der Fasereinkopplung bzw. -auskopplung untersucht. Auf dieser Basis wurde ein Design selektiert und der Detaillierungsgrad der Konstruktion erhöht.

Es ist geplant in den nächsten Wochen einen auf der Linienselektion basierenden Laser zu beschaffen. Die Konstruktion eines Sensorkopf-Prototyps wird weitergeführt um nach Fertigung der optimierten Komponenten weitere Laborversuche zur Optikintegration und Kopplung durchzuführen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im nächsten Schritt werden die für die Messung notwendigen Laser beschafft. Entgegen der Planung wurde dies erst jetzt begonnen, da neu zur Verfügung stehende spektroskopische Liniendaten (HITRAN2012) erst durch eigene Messung überprüft werden mussten. Dies soll sicherstellen, dass die Beschaffung der Laser für den korrekten spektralen Zielbereich erfolgen kann. Hierdurch verschiebt sich in Tabelle 1 der Punkt (1.4) um ca. 4 bis 5 Monate. Dies hat jedoch zunächst keinen Einfluss auf die anderen Punkte der Arbeitspakete 1 bis 3.

Parallel hierzu wird der Prototyp erweitert und optimiert um eine funktionsfähiges Muster für erste Autoklaven-Benchmarks bei Becher Technologies zur Verfügung zu stellen. Hierbei stehen vor allem das Design und die Konstruktion einer Druck- und Temperaturbeständigen Faserdurchführung über die Behälterflansche im Vordergrund.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95,<br>21073 Hamburg  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 023A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen;<br>Teilprojekt A: Untersuchung der Wirbelbildung in Pumpenzulaufbecken und der Auswirkung von Gasmitriss auf nachfolgende Anlagenkomponenten |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.12.2012 bis 31.05.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>781.530,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

- Projektwebseite mit anmeldepflichtigen Bereich erstellt:  
<http://www.tuhh.de/save/willkommen.html>
- Literaturrecherche zu Versuchs- und Modelldaten durchgeführt
- Abschlussbericht AP1-Literaturrecherche erstellt
- Für die gemeinsame Nutzung einer Modelldatenbank ist ein passwortgeschützter sftp-server eingerichtet
- Parameterbereiche (Strömungsgeschwindigkeiten) der Testmatrizen abgestimmt, die für die Auslegung der Versuchsanlagen benötigt wurden
- Teilweiser Aufbau der Versuchsanlage
  - Absaugbecken im Technikum der TUHH installiert
  - Diverse Investitionsgegenstände (Rohrleitungen, Messtechnik etc.) bestellt und in Empfang genommen
  - In Zusammenarbeit mit der KSB Aktiengesellschaft (Vertriebsabteilung) ist die Auswahl einer Pumpe für den Versuchsaufbau an der TUHH geändert worden. Ein Angebot über eine Normpumpe mit kürzerer Lieferzeit liegt vor. Für die Bestellung müssen Personalmittel umgewidmet werden
- Für die Entwicklung der Versuchsträger (Ventile) sind die zur Verfügung stehenden Einbauräume abgestimmt
- Laseroptisches Messsystem ausgelegt und bestellt

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

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

- Installation der Pumpe und Rohrleitungen
- Aufbau und Einrichtung der Messtechnik
- Detaillierung der Testmatrizen
- Modellbildung anhand von Literaturdaten

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

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

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 023B</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen;<br>Teilprojekt B: Untersuchung von Zweiphasenströmungen in einer Kreiselpumpe und in Armaturen mittels tomographischer Bildgebungsverfahren |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.12.2012 bis 31.05.2016   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>513.320,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Hampel             |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Literaturrecherche zu Vergleichsdaten und Modellen wurde im Berichtszeitraum weitergeführt und weitestgehend abgeschlossen. Es wurde eine Zusammenfassung erstellt und dem Projektträger vorgelegt.
- AP2: Es erfolgte die hydraulische und konstruktive Auslegung der modularen Laborversuchanlage welche für die experimentellen Versuche im HZDR-Labor eingesetzt werden wird. Die Konstruktionszeichnungen wurden erstellt und die Fertigung der Anlage wurde begonnen. Die Komponenten wurden in Auftrag gegeben. Die notwendige Sensorik für die Instrumentierung der Anlage wurde ausgewählt und bestellt. Mit der Erarbeitung und Erstellung von Testmatrizen für die Durchführung der einzelnen Versuche wurde begonnen.
- AP4: Die Entwicklung von speziellen Algorithmen zur Auswertung der tomographischen Untersuchungen wurde begonnen.
- AP6: Zur Vorbereitung der Modellbildung anhand von Literaturdaten, wurde mit einer entsprechenden Aufbereitung der recherchierten Literaturdaten begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Literaturrecherche wird begleitend zur Modellbildung fortgesetzt.
- AP2: Fertigung der modularen Laborversuchanlage wird abgeschlossen und es erfolgt der Aufbau, die Instrumentierung und Inbetriebnahme der Versuchsanlage.
- AP4: Fortsetzung der Algorithmenentwicklung.
- AP6: Modellbildung Anhand von Literaturdaten.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Große Bahnstr. 31,<br>22525 Hamburg   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 023C</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen;<br>Teilprojekt C: Analytische Untersuchungen der Wirbelbildung in Pumpeneinläufen |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.12.2012 bis 31.05.2016   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>443.808,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>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 AP1 und AP2 bearbeitet.

- AP1: Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es wurden mehr als 60 Literaturstellen von der TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG zum Thema „Luftmitriss im Ansaugbehälter, Regelwerk und Normen“ ausgewertet. Dabei wurden detaillierte Auslegungsempfehlungen für Pumpenansaugstutzen sowie die Beschreibungen und die Ergebnisse von Experimenten zur Untersuchung von Oberflächenwirbeln zusammengestellt. Des Weiteren wurden vier analytische Wirbelmodelle und mehrere numerische Modellierungsansätze recherchiert. Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und in einem Textbeitrag für den technischen Bericht zum AP1 zusammengefasst.
- AP2: Bei der Planung und dem Aufbau der Versuchsanlagen beteiligen wir uns an der Erarbeitung von Testmatrizen. Ein erster Grundstein hierfür wurde beim Kickoff-Meeting im Januar gelegt. Als weitere Planungshilfe für die Versuchsanlagen wurden die während der Literaturrecherche gesammelten Erkenntnisse über Skalierungskonzepte zu Modellversuchen vom TÜV NORD zusammengestellt und den Projektpartnern übermittelt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP2: Die Erarbeitung von Testmatrizen wird weiterhin vom TÜV NORD unterstützt. Unter anderem wird zu diesem Thema am 17.09. ein zweites Projekttreffen stattfinden.
- AP7: Im kommenden Halbjahr ist die Entwicklung und Implementierung von numerischen Berechnungsmodellen für Oberflächenwirbel geplant. Hierfür ist die Weiterentwicklung der während unserer Vorarbeiten (im Rahmen des Forschungsprojekts GUMP) entwickelten kombinierten Methode vorgesehen, die CFD-Analysen mit analytischen Wirbelmodellen verknüpft. In diesem Zusammenhang ist auch die Implementierung komplexerer, analytischer Wirbelmodelle geplant. Bisher fußt die Methode auf dem vergleichsweise einfachen Modell von Burgers & Rott. Ferner wird zurzeit zu Zwecken der Code-Verifizierung beim TÜV NORD ein numerisches Werkzeug zur Berechnung von rotationssymmetrischen Potenzialströmungen entwickelt, das sich auch im Zusammenhang mit den analytischen Wirbelmodellen bereits als nützlich erwiesen hat.

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

Technischer Bericht: AP1-02NUK023C: Literaturrecherche der TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>KSB Aktiengesellschaft, Johann-Klein-Str. 9, 67227 Frankenthal (Pfalz)   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 023D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.12.2012 bis 31.05.2016   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>2.751.350,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 Industriearmaturen 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
- Rohrbruchttest
- Thermoschockverhalten
- Schmutzpartikeltest
- Seismische Belastung (statisch auf einem Rütteltest)

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

#### *Arbeitspaket 5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen*

Die Erstellung der Dokumente für die einzelnen Prototypen wie Berechnung, Stückliste, Fertigungszeichnung, Prüfplan, Schweißplan und Arbeitsplan ist weiter fortgeschritten.

Den geringsten Fortschritt weist das Ventil DN 200 auf. Hierfür wurden bisher Berechnungen und Prüfpläne erstellt, die Konstruktionsunterlagen sind derzeit in Bearbeitung

Der Absperrschieber DN 150 ist bereits in Produktion gegangen.

Die Schweißversuche für die Führungsleisten des Schiebers DN 350 wurden durchgeführt und waren erfolgreich. Es wurde bestätigt, dass die erforderliche Toleranz mit dem Schweißprozess erreicht werden kann und eine zerspanende Nacharbeit nicht erforderlich ist.

Die Ergebnisse der Panzerungsversuche stehen noch aus.

Ein Entwurf der Testspezifikation zur Beschreibung des Versuchsablaufs liegt vor.

Das für den Berichtszeitraum bestellte Material zur Prototypenfertigung wurde bisher termingerecht geliefert. Die noch anstehenden Liefertermine werden streng verfolgt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Nachstehend sind die nächsten Schritte zusammengefasst:

- Fertigstellung aller Unterlagen zur endgültigen Freigabe
- Fertigungsbeginn aller Prototypen
- Erstellung der Endfassung der Testspezifikation

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

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp-<br>lergraben 55, 52062 Aachen  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028A</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident<br>Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt A: Analyse von<br>Containment-Phänomenen zur Optimierung von Störfallmaßnahmen |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.034.532,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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 Quelltermberechnungen 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**

Die bisher durchgeführten Arbeiten in diesem Berichtszeitraum gehören zu den Arbeitspaketen AP1, AP3 und AP4.

Ein Kooperationsvertrag zwischen den Projektpartnern wurde ausgearbeitet, abgestimmt und von allen Projektpartnern unterschrieben.

Des Weiteren hat das Kick-off-Meeting an der RWTH Aachen stattgefunden, bei dem alle Partner vertreten waren.

Außerdem wurde das Einführungsseminar für Doktoranden und das Codeseminar vorbereitet. Die geplanten Themen des Einführungsseminars beinhalten die technischen und physikalischen Aspekte des Reaktorkühlkreislaufes, die Reaktorsicherheit und die Anlagentechnik SWR/DWR Generation II und Generation III. Im Codeseminar werden die in diesem Projekt benutzten GRS Codes ATHLET-CD und COCOSYS vermittelt.

Arbeiten zu AP3 wurden begonnen. Im Vordergrund steht derzeit noch die Einarbeitung in das bereits existierende COMO-Modul.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im nächsten Berichtszeitraum sollen die geplanten Arbeiten im AP2 beginnen und mit der Entwicklung eines SWR Modells für das untere Plenum begonnen werden, sobald der Unterauftrag an die GRS vergeben worden ist. Auch im AP3 soll mit dem AP3.1 angefangen und erste Rechnungen mit dem bereits bestehenden COMO-Modul durchgeführt werden. Der AP4 wird von der GRS zum einen durch die Datenbereitstellung und zum anderen durch die Programmunterstützung über die gesamte Projektlaufzeit bearbeitet.

Des Weiteren soll eine Auswahl von Störfallszenarien mit den beteiligten Projektpartnern festgelegt werden und der weiteren Bearbeitung zu Grunde gelegt werden. Anschließend sollen erste Arbeiten im AP5 stattfinden und in COCOSYS wichtige Module für das Spaltprodukt- und Aktivierungsproduktverhalten überprüft werden (AP5.1). Sobald die entsprechenden DWR-Datensätze für COCOSYS zur Verfügung stehen, kann auch mit den Arbeiten zur Anpassung und Optimierung der Datensätze begonnen werden (AP5.2).

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

Keine.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028B</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>203.674,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>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-ISR), 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**

Entsprechend der auf dem Kick-Off-Meeting am 22.03.2013 getroffenen Festlegungen werden die Störfallanalysen mit einem von der GRS bereitzustellenden generischen ATHLET-CD Modell durchgeführt. Dadurch ändert sich das Arbeitsprogramm des HZDR wie folgt:

- es erfolgt keine eigene Datensatz Erstellung
- zusätzlich beteiligt sich HZDR am AP4.1 zur Auswahl geeigneter Störfallszenarien und Notfallmaßnahmen.

In diesem Zusammenhang wurde im Vorfeld auf Basis der zurzeit verfügbaren ATHLET-CD Version 2.2A eine Literaturrecherche mit Schwerpunkt Kernzerstörungsphase zur Erfassung des Validierungsstands anhand experimenteller Daten und realer Unfallszenarien begonnen. Anhand der verfügbaren Unterlagen zum Programm ATHLET-CD wurde unter Nutzung eines im HZDR entwickelten ATHLET Modells für eine generische Druckwasserreaktor-Anlage mit Voruntersuchungen zur Einbindung eines Kernzerstörungsmoduls (ECORE) begonnen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

In den nächsten 6 Monaten sind folgende Arbeiten geplant:

- es erfolgt eine Zusammenstellung von allen für die Störfallanalysen benötigten Daten sowie der zu berücksichtigenden Notfallmaßnahmen
- nach Übernahme des GRS-Datensatzes erfolgen in Abstimmung mit den Projektpartnern Simulationsrechnungen für ausgewählte postulierte Störfallszenarien
- in Abstimmung mit den Projektpartnern soll ein Benchmark zur Qualifizierung des ATHLET-CD Modells realisiert werden (ein konkretes Störfallszenarium)
- das ATHLET-CD Modell wird für die durchzuführenden Störfallanalysen in den Rand- und Anfangsbedingungen angepasst und bei Bedarf weiterentwickelt
- anhand der Simulationsergebnisse wird das Anlagenverhalten im Detail analysiert.

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

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>300.276,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 Siedewasserreaktorkomponenten sowie der Gebäudekühlung weitergehend zu ertüchtigen, um somit die Leistungsfähigkeit von Schwerstörfallcodes 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 Rechenmodellen 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: Abbildung/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 Störfallanalysen (5.1), Bewertung der Maßnahmen (5.2), Ausarbeitung von Empfehlungen (5.3).
- AP6: Dokumentation und Berichte

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

- AP1.1: Auf dem Kickoff Meeting am 22.03.2013 wurde von den Projektpartner vereinbart, dass für die Rechnungen mit ATHLET-CD ein identischer Eingabedatensatz als Basis verwendet werden soll, den die GRS bereitstellen wird. Dieser wird z. Zt. von GRS vorbereitet. Zur Einarbeitung und Vorbereitung der Störfallrechnungen mit ATHLET-CD wurde deshalb ein am IKE vorhandener Eingabedatensatz verwendet. Mit diesem wurden erste Störfallrechnungen durchgeführt worden, die mit korrespondierenden ASTEC-Rechnungen verglichen wurden.
- AP2.1: Auf der Grundlage öffentlich zugänglicher Dokumente (deutscher und EU-Stresstest, Risikostudien der GRS, PSA2-Analysen, etc.) wurden Recherchen zu relevanten Störfallpfaden und mitigativen Notfallmaßnahmen durchgeführt. Mit der Zusammenstellung eines Katalogs der potentiellen Maßnahmen wurde begonnen, wobei hier neben bereits implementierten auch die in den nationalen und europäischen Aktionsplänen zur Nachrüstung empfohlenen Maßnahmen berücksichtigt werden sollen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- AP1.2: Erstellung eines grundlegenden ATHLET-CD-Eingabedatensatzes für SWR; hier ist die Erweiterung eines bei der GRS vorliegenden Datensatzes für ATHLET um den ATHLET-CD-Teil vorgesehen. Die Weitergabe des Datensatzes ans IKE wurde bei der GRS beantragt.
- AP1.3: Festlegung der zu untersuchenden Störfallsequenzen; hierzu wird ein Treffen mit den Partnern im Verbundprojekt organisiert (voraussichtlich am 11.09.2013).
- AP2.1: Abschluss der Recherche zu mitigativen Notfallmaßnahmen.
- AP2.2: Festlegung der im Vorhaben genauer zu untersuchenden mitigativen Notfallmaßnahmen in Abstimmung mit den Partner im Verbundprojekt (Treffen am 11.09.2013, s. o.).
- AP2.1: Modellierung der zu untersuchenden Störfallsequenzen und mitigativen Notfallmaßnahmen in den ATHLET-CD-Eingabedatensätzen für DWR und SWR.
- AP6.1: Erstellung eines Berichts zu Meilenstein M41 (Katalog möglicher Störfallmaßnahmen).

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12,<br>76131 Karlsruhe  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>236.964,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Wasserfilmsberücksichtigt.
- 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 Behaviour 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:

- Die Literaturrecherche und erste Analyse des Wasserfilmverhaltens unter Berücksichtigung der Wärmezu- fuhr, Luftströmung und geometrische Orientierung sind durchgeführt mithilfe des COCOSYS -Programms.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die geplanten Arbeiten in den nächsten sechs Monaten (September 2013 bis Februar 2014) sind:

- Systematische Analyse der in COCSYS implementierten Modelle und Verfahren
- Entwicklung und Verifizierung eines neuen Modells zur Simulation des Wasserfilmverhaltens.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>368.530,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Störfall-szenarien 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 AP1 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 AP2 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: Der Doktorand hat planmäßig am 1.4.2013 seine Arbeit begonnen. Er hat sich in MELCOR eingearbeitet und das erworbene Wissen an Beispiel-Aufgabenstellungen, die von SANDIA für diesen Zweck entwickelt wurden, getestet. Er hat sich weiterhin eine Übersicht über die wichtigsten experimentellen Anlagen, in denen das Verhalten einer Schmelze im unteren Plenum untersucht wird, verschafft. Weiterhin wurde im Rahmen dieses Vorhabens eine Software geschrieben, die es in Zukunft ermöglicht, dass Modell-Entwickler ohne detaillierte Kenntnis der MELCOR-Schnittstelle leichter eigene Modelle über MELCOR-Control-Functions an MELCOR koppeln können. Die korrekte Arbeitsweise dieser Software wurde an einem einfachen Beispiel (Kopplung eines Larsen-Miller- Versagensmodells für die untere Kerntrageplatte) demonstriert. Der Doktorand hat hier eine eigene Idee umgesetzt, die bislang nicht geplant war. Da hier eine erhebliche Zeiteinsparung bei den zukünftigen Arbeiten zu erwarten ist, wird die Tatsache, dass erst im Juni mit der Erstellung des MELCOR-Inputs für die IVE-Anlage begonnen wurde, als nicht kritisch angesehen.

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

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Geplant ist, die oben beschriebene, neu entwickelte Software weiter zu ertüchtigen, um synchrone Kopplungsmethoden umsetzen zu können. Durch synchrone Kopplungsmethoden wird die numerische Stabilität erhöht. Weiterhin werden entsprechend der Planung die LIVE-Experimente mit den bestehenden MELCOR-Modellen nachgerechnet.

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

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>395.320,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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

Das Teilprojekt F umfasst folgende Beiträge zu drei Arbeitsschwerpunkten (APs):

- AP1: Quantifizierung von ATHLET-CD für SWR
  - AP1.1: Datenbasis für CORA-SWR-Versuche (T6)
  - AP1.2: Optimiertes Anlagenmodell für ATHLET-CD einschließlich Visualisierung (T12)
  - AP1.3: Definition der notwendigen Modellverbesserungen für ATHLET-CD und Validierungsreport (T18)
- AP2: Möglichkeiten der Kühlung eines geschädigten Kerns durch Einspeisung in den RDB
  - AP2.1: Optimierte Datenbasis für ausgewählte Szenarien von Siedewasserreaktoren (T24)
  - AP2.2: Vorschläge für optimale Strategien zur RDB-Kühlung eines Teilzerstörten Kerns auf der Basis von Simulationen (T24)
- AP3: Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen für Notfallmaßnahmen
  - INR Beiträge zur Ausarbeitung optimaler Empfehlungen für Notfallmaßnahmen (T36)

Im AP1 werden experimentelle Daten von CORA-Versuche für SWR Geometrie hinsichtlich Ihrer Eignung als Validierungsbasis für ATHLET-CD untersucht und die dazugehörigen Daten gesammelt und aufbereitet. Danach wird ein ATHLET-CD Modell für die ausgewählte CORA-Experimente entwickelt, um die Flutmodelle von ATHLET-CD anhand der Messdaten zu validie-



ren. Dabei sind Modelldefizite des eingesetzten Codes zu identifizieren und gegeben falls Modellverbesserungen zu unterbreiten.

Im AP2 wird ausgehend von einer existierenden Modell eines SWR-72 Reaktors für ATHLET die notwendigen Modelleerweiterung für ATHLET-CD vorgenommen, so dass die ATHLET-Komponenten durch ATHLET-CD-Komponenten ersetzt werden, um schwere Störfallsequenzen simulieren zu können. Mit dem entwickelten SWR-72-Anlagenmodell für ATHLET-CD werden Simulationen ausgewählten Störfallszenarien untersucht, wobei der SWR-Teilzerstörten Kern durch die Einspeisung der Notkühlsystemen oder in Rahmen von Störfallmanagement-Maßnahmen geflutet wird, um den weiteren schweren Störfallablauf zu beenden und die Folgen zu minimieren.

Letztendlich werden im AP3 optimierte Störfallmanagementmaßnahmen aufgrund des vertieften Verständnis des Anlagenverhaltens bei Kernunfallszenarien, was im AP2 ausführlich untersucht wird, zusammen mit den anderen Partner ausgearbeitet und formuliert. Diese Maßnahmen sind sehr wichtige Entscheidungshilfen für das Notfallteam um im konkreten Fall reagieren zu können.

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

Zu AP1: Der Doktorand hat am 1. Mai 2013 und der wissenschaftlicher Mitarbeiter am 1.7.2013 am INR begonnen. Unter diesen Randbedingungen wurden folgenden Arbeiten hierzu vorgenommen:

- Intensive Beschäftigung mit den CORA-Experimenten (Literatur, Messergebnisse, Kontakt mit der zuständigen Fachgruppe im KIT).
- Einarbeitung in die Phänomenologie schwerer Störfälle sowie Aufbau und Wirkungsweise von Siedewasserreaktoren.
- Der Doktorand und der Mitarbeiter des Projektes haben an einem Einführungskurs der GRS für schwere Störfälle in LWR und deren numerischen Simulation mit ATHLET-CD teilgenommen.
- ATHLET-CD wurde auf den Arbeitsplatzrechnern installiert und mit den beiliegenden Beispielen getestet.
- Eine Einarbeitung in die Syntax für die Erstellung der Programm-Eingabe hat stattgefunden.
- Erste Ergebnisse für die Simulation des Experiments CORA 17 liegen vor. Bis zum Fluten gibt es eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Intensive Einarbeitung in die physikalischen Modelle, die bezogen auf die CORA Experimente für die Kernzerstörung eine wichtige Rolle spielen.
- Weitere Simulationen für QUENCH 17 um zu verstehen, welche Parameter für das Ergebnis, besonders für den Flutvorgang, wichtig sind.
- Untersuchung der Modelle auf Schwachstellen bezüglich der Simulation von CORA 17
- Erste Überlegungen zur Simulation eines Siedewasserreaktors als Gesamtanlage mit ATHLET-CD

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

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 028G</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.03.2013 bis 29.02.2016  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.03.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>321.384,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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: Daten aus Veröffentlichungen und verfügbaren Unfallanalysen von unterschiedlichen Organisationen, im Wesentlichen des Anlagenbetreibers TEPCO sowie der amerikanischen Forschungseinrichtung INPO und der GRS, wurden zur Beschreibung des chronologischen Ereignisablaufs zusammengetragen. Anlagendaten zu dem Reaktortyp GE BWR3 bzw. BWR4 mit Mark-I Containment wurden aus der Literatur recherchiert. Weiterhin wurden Anlagensimulationen mit den Codes MELCOR von Sandia National Laboratories (SNL) sowie von der japanischen Aufsichtsbehörde JNES und MA-AP-Simulationen von TEPCO und EPRI vergleichend gegenübergestellt. Ein erstes Treffen mit dem VGB zur Weitergabe von dem VGB zugänglichen Daten an RUB hat stattgefunden.
- AP4: Die aktuelle Modellbasis des Systemcodes ATHLET-CD wurde hinsichtlich der Schmelzeverlagerung analysiert. Aktuell wird die Verlagerung über das Candling-Modell simuliert, bei dem eine wesentliche Annahme eine konstante und vom Anwender zu definierende Verlagerungsgeschwindigkeit des Schmelzefilms ist. Die Variation dieses Modellparameters hat dabei teilweise großen Einfluss auf den simulierten Ablauf der Kernzerstörung, und stellt damit den sog. User-Einfluss dar. Ein Ansatz, das physikalische Verhalten während der Schmelzeverlagerung möglichst korrekt wiederzugeben und gleichzeitig den User-Einfluss zu minimieren, besteht in der Erweiterung des Candling-Modells zur Bestimmung der Verlagerungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Viskosität.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Erweiterung des Umfangs der Datenzusammenstellung auf möglichst alle derzeit verfügbaren, veröffentlichten Berichte und Dokumente verschiedenster nationaler und internationaler Organisationen, Forschungseinrichtungen sowie TSOs, um eine möglichst vollständige Übersicht der derzeitigen Datenlage bereitzustellen.  
Weitergehende Literaturrecherche zu detaillierteren Anlagendaten.  
Gegenüberstellung und Bewertung der zusammengestellten Daten und Informationen hinsichtlich des Unfallablaufs.
- AP2: Die Erstellung eines ATHLET-CD Datensatzes zur Simulation eines Blocks im KKW Fukushima-Daiichi wird auf Basis der in TPG-AP1 ermittelten Daten begonnen.  
Als eine Grundlage zur Datensatzerstellung wird ein von der GRS bereitgestellter ATHLET-CD-Datensatz eines Siedewasserreaktors vom Typ SWR-69 verwendet. Die Bereitstellung dieses Datensatzes wurde bereits mit der GRS vereinbart.
- AP4: Eine Strategie zur Modellerweiterung hinsichtlich der Schmelzeverlagerung über das in ATHLET-CD implementierte Candling-Modell zur Berücksichtigung des Einflusses der Viskosität auf die Verlagerungsgeschwindigkeit wird erarbeitet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg<br>39, 85579 Neubiberg   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 111F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Kooperationsprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen – Condensation Induced Water Hammer |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2010 bis 31.12.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>234.175,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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: Letzte Zuarbeiten an den Koordinator AP1, Erstellung von Textbeiträgen

AP2: Technische Wartungsarbeiten an der UniBw Versuchsanlage, Durchführung von Experimenten nach einer im Treffen vom 15.11.2012 in Hamburg abgesprochenen Versuchsmatrix, Vorstellung der Ergebnisse bei den Projekttreffen; Einreichen eines Konferenzpapers für die Nureth-15 in Pisa; Beginn der Auswertung erfolgter Versuche in Kooperation mit TÜV SÜD

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP1: Literaturrecherche ist offiziell abgeschlossen; ein gemeinsamer Abschlussbericht zum AP1 liegt vor

AP2: Die Versuchsmatrix ist abgearbeitet. Einzelne Versuche können noch erfolgen. Es ist geplant, TÜV SÜD zu Experimenten einzuladen. Die Auswertung und Aufbereitung der erfolgten Versuche wird fortgeführt

AP6: Erstellung von Textbeiträgen für den Abschlussbericht

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

Keine.



## **2.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung**

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1,<br>69117 Heidelberg   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 012D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Abtrennung langlebiger Radionuklide (Partitioning); TP: Spektroskopische Untersuchungen zur Stabilität und Koordination von Actinidkomplexen mit ausgewählten Extraktionsliganden |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2009 bis 31.03.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.03.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>233.046,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Panak              |   |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

Die in diesem Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten der Universität Heidelberg erfolgten in direkter Kooperation mit dem KIT-INE und dem Forschungszentrum Jülich; siehe die entsprechenden Halbjahresberichte.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

Die Untersuchung zur Komplexierung von Cm(III) mit dem im Arbeitskreis von Prof. Dr. P. Roesky (KIT-AC) entwickelten tridentaten N-Donor Ligand 6-(1H-tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridin (HN<sub>4</sub>bipy) weitergeführt und zum Abschluss gebracht. Eine Publikation der Ergebnisse in Kooperation mit KIT-AC ist in Vorbereitung.

Als strukturelle Ergänzung zu dem HN<sub>4</sub>bipy Liganden wurde im Arbeitskreis von Prof. Dr. P. Roesky mit (6-(3-methyl-1H-1,2,4-triazol-5-yl)-2,2'-bipyridin, MeN<sub>3</sub>bipy) ein weiterer Ligand mit Bipyridin-Grundgerüst entwickelt. Im Vergleich zu HN<sub>4</sub>bipy sind vor allem der Einfluss der zusätzlichen Methylgruppe in dem Substituenten auf die Löslichkeit in unpolaren Lösungsmitteln und die Komplexierungseigenschaften des Liganden von Interesse.

In ersten Experimenten wurde mittels TRLFS die Komplexierung von Cm(III) mit MeN<sub>3</sub>bipy in Ethanol (1.5 vol % H<sub>2</sub>O) untersucht. Hierbei wurden die Solvensspezies ( $\lambda_{\max} = 601.0$ ) sowie ab einer Ligandenkonzentration von 3.9  $\mu\text{mol L}^{-1}$  eine Komplexspezies mit einem Emissionsmaximum bei  $\lambda_{\max} = 607.5$  nm nachgewiesen. Durch Steigungsanalyse konnte die Emissionsbande einem Cm-Ligand 1:3 Komplex zuge-



ordnet werden. Der FI Faktor des  $\text{Cm}(\text{MeN}_3\text{bipy})_3$  Komplexes beträgt 1.2 und ist demnach kleiner als der FI Faktor des  $\text{Cm}(\text{HN}_4\text{bipy})_3$  Komplexes ( $\text{FI} = 3.2$ ). Aus der Speziesverteilung konnte unter Einbeziehung dieses FI-Faktors folgende konditionelle Gleichgewichtskonstante bestimmt werden:  $\log \beta_3(\text{Cm}(\text{MeN}_3\text{bipy})_3) = 15.0 \pm 0.3$ . Demnach ist die Gleichgewichtskonstante für die Bildung des  $[\text{Cm}(\text{MeN}_3\text{bipy})_3]$  Komplexes um eine Größenordnung höher als die Gleichgewichtskonstante für die Bildung des  $[\text{Cm}(\text{HN}_4\text{bipy})_3]$  Komplexes. Da nur wenige N-Donor Liganden des BTP-Typs derart gute Komplexierungseigenschaften aufweisen, sind weitere Komplexierungsexperimente mit Eu(III) sowie Flüssig-flüssig Extraktionstests geplant (siehe 4. Geplante Weiterarbeiten).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die TRLFS-Studien zu Komplexierungseigenschaften des  $\text{MeN}_3\text{bipy}$  Liganden sollen im Rahmen des BMBF-Projekts „Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen (f-Kom)“ fortgesetzt werden (02NUK020D).

Hierbei sollen in Ergänzung zur Untersuchung der Komplexierungseigenschaften für Cm(III) die Komplexierung mit Eu(III) untersucht werden. Die Bestimmung der Stabilitätskonstante des Eu(III)- $\text{MeN}_3\text{bipy}$  1:3 Komplexes soll zeigen, ob dieser Ligand eine vergleichbar hohe Selektivität aufweist wie der  $\text{HN}_4\text{bipy}$  Ligand.

Des Weiteren sollen der Einfluss einer lipophilen Anionenquelle auf die Komplexierung von Cm(III)- und Eu(III) mit  $\text{MeN}_3\text{bipy}$  untersucht und die Extraktionseigenschaften in Flüssig-flüssig Extraktionsexperimenten bestimmt werden.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

##### *Publikationen:*

B. B. Beele, E. Rüdiger, F. Schwörer, U. Müllich, A. Geist, P. J. Panak, TRLFS Study on the Complexation of novel BTP Type Ligands with Cm(III), Dalton Trans. 2013, DOI: 10.1039/C3DT50536G.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) with 2,6-bis(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)pyridine and 2-bromohexanoic acid studied by Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy, Radiochim. Acta 2013, 101, 285–291.

C. Adam, P. Kaden, B. B. Beele, U. Müllich, S. Trumm, A. Geist, P. J. Panak, M. A. Denecke, Evidence of covalence in N-donor complex of Americium(III), Dalton Trans. 2013, DOI: 10.1039/C3DT50953B.

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., accepted.

##### *Vorträge:*

B. B. Beele, Complexation and Separation Performance of N- and O-donor ligands used in Actinide Separation, Seminarvortrag Tschechische Technische Universität, 10.05.2013, Prag, Tschechische Republik.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Selective complexation of f-elements – Partitioning & Transmutation, 1. Projektstatusgespräch zur BMBF-geförderten Nuklearen Sicherheitsforschung, 06.-07.03. 2013, Karlsruhe. Eingeladener Vortrag

A. Bremer, D. Whittaker, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) and Eu(III) with CyMe4-BTBP and CyMe4-BTPhen studied by time resolved laser fluorescence spectroscopy, EUFEN 2 (European F-Element Network), 15.-18.04.2013, Dublin, Irland.

P. J. Panak, Time-resolved Laser Fluorescence Spectroscopy – A Valuable Tool for Actinide Speciation, Seminarvortrag Tschechische Technische Universität, 10.05.2013, Prag, Tschechische Republik. Eingeladener Vortrag

P. J. Panak, Spectroscopic characterization of actinides, 2013 Summer School on Actinide Science & Applications, 17.07.2013, Karlsruhe. Eingeladener Vortrag

##### *Poster:*

B. B. Beele, A. Wilden, A. Skerencak-Frech, S. Lange, F. Sadowski, G. Modolo, A. Geist, P. J. Panak, TRLFS Study on the Complexation of Cm(III) and Eu(III) with methyl-substituted Diglycolamides, Actinides 2013, 21.-26.07.2013, Karlsruhe.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Influence of the solvent on the complexation of Cm(III) with nPr-BTP studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy, Actinides 2013, 21.-26.07.2013, Karlsruhe.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 013A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 28.02.2014   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>736.590,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 Flüssigmetallkreislauf der Photoneutronenquelle vollendet und die Neutronenflugzeitanlage in Betrieb genommen. In einer ersten Testmessung wurde das Neutronenstrahlprofil untersucht. In der neuen Flugzeithalle sind Experimentaufbauten für die inelastische Streuung (mit LaBr<sub>3</sub> Szintillatoren) für totale Neutronenwirkungsquerschnitte und für die neutroneninduzierte Spaltung aufgebaut. Die am Institut für Referenzmaterialien und Messungen, Geel im Oktober und November 2012 gemessenen korrelierten Flugzeit- und Gammaspectren aus dem Neutroneneinfang im Bereich von keV-Neutronen an <sup>77</sup>Se wurden ausgewertet. Trotz begrenzter Statistik können stärkere Neutronenresonanzen im Hinblick auf die Photonenstärke untersucht werden. Durch einen Druckstoss in der Zählgasversorgung wurde die Referenzspaltkammer H19 der PTB beschädigt, so dass damit keine Messungen im Berichtszeitraum möglich waren. Die Reparatur und Testmessungen sind in Vorbereitung.

Das abschliessende TRAKULA Graduiertenseminar wurde als 525. WE Heraeus Seminar „Nuclear Physics Data for the Transmutation of Nuclear Waste“ in Bad Honnef vom 24.02. – 27.02.2013 veranstaltet. Insgesamt haben über 50 Wissenschaftler teilgenommen. Die wichtigsten TRAKULA Ergebnisse wurden von Nachwuchswissenschaftlern in Poster-Sessions vorgestellt und mit den internationalen Experten auf dem Gebiet diskutiert.

Die Konstruktion der Spaltkammern und der Zählgasversorgung ist abgeschlossen, die benötigten Bauteile sind in Fertigung bzw. bestellt. <sup>235</sup>U Schichten wurden beim Projektpartner in Mainz hergestellt.

Eine Veröffentlichung über totale Neutronenwirkungsquerschnitte von Au und Ta wurde bei European Physical Journal A eingereicht.

Das TRAKULA Projekt wurde in einem Gruppenbericht von Roland Hannaske auf der DPG Frühjahrstagung in Dresden im März vorgestellt. Die Photoneutronenquelle nELBE wurde auf der International Conference on Nuclear Data for Science and Technology in New York 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.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Electromagnetic dipole strength up to the neutron separation energy from <sup>196</sup>Pt( $\gamma, \gamma'$ ) and <sup>195</sup>Pt(n,  $\gamma$ ) reactions, R. Massarczyk, G. Schramm, A. R. Junghans, R. Schwengner, M. Anders, T. Belgya, R. Beyer, E. Birgersson, A. Ferrari, E. Grosse, R. Hannaske, Z. Kis, T. Kögler, K. Kosev, M. Marta, L. Szentmiklósi, A. Wagner, J. L. Weil: Phys. Rev. C 87, 044306 (2013)  
 Characterization of the neutron beam at nELBE, R. Beyer, E. Birgersson, Z. Elekes, A. Ferrari, E. Grosse, R. Hannaske, A.R. Junghans, T. Kögler, R. Massarczyk, A. Matić, R. Nolte, R. Schwengner, A. Wagner, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 723 (2013) 151–162

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 013B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 30.06.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>216.315,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Zuber              |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

Die Gitterionisationskammer wurde unter diversen bürokratischen Schwierigkeiten erfolgreich vom HZDR an die TUD umgezogen und wieder in Betrieb genommen. Die bisherigen Resultate ließen sich reproduzieren. Um Temperatur und Druck während einer Messung zu überwachen, wurde eine neue Monitorierungssoftware geschrieben. Diese greift auf die den Sensoren möglichen Schnittstellen zu. Beim Versuch die Kammer permanent mit Gas zu spülen, gab es Probleme mit der Stabilität der Kalibrierung.

Die Analysesoftware wurde auf die Korrektur des Gitterdurchgriffsfaktors hin weiter angepasst.

Aufgrund mangelnder Personen ruhen momentan die Aktivitäten der Betaspektroskopie.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Das Problem mit der Gasspülung muss weiter untersucht werden, da für die Messung am Neodym eine Langzeitstabilität notwendig ist. Die Kalibrierung mit den Sm-Targets aus der Radiochemie in Mainz steht noch aus. Die Nd-Targets sind noch nicht eingetroffen. Ab. 1. August werden sich zwei neue Leute in die Alpha- und Betaspektroskopie einarbeiten.

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

Poster: "Setup of Frisch grid ionisation chamber for low background alpha spectroscopy", Felix Krüger, K. Zuber beim 525. WE-Heraeus-Seminar „Nuclear Physics Data for the Transmutation of Nuclear Waste“, Physikzentrum Bad Honnef, 25.-27.2.2013

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität zu Köln, Albertus-Magnus-Platz, 50931 Köln  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 013D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Gamma-Imaging mit hochsegmentierten Germaniumdetektoren |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 31.03.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.03.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>383.063,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Reiter             |   |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die Design und Konstruktionsphase des Detektoraufbaus zur Compton-Kamera.

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Comptonkamera wurde erfolgreich für die Bildgebung und damit für die Lokalisierung von radioaktiven Quellen eingesetzt. Nach der Durchführung der aufwendigen Messungen wurden erhebliche Anstrengungen auf die Entwicklung von Software für die Auswertung der Daten aufgewendet. Als wichtiges Hauptergebnis konnte die Datenanalyse soweit verbessert werden, dass die Ortsauflösung so gut ist um den Emissionsorte von Gammaquellen eindeutig zu identifizieren.

Die im letzten Bericht beschriebene Optimierung der Pulse-Shape-Analyse-Algorithmen wurde mit einer Erweiterung der PSA-Software abgeschlossen.

Zurzeit werden systematische Messungen mit der Compton-Kamera in ihrer endgültigen Konfiguration durchgeführt

In Zukunft wird der Vergleich der gemessenen Pulse mit der berechneten Data-Library die sogenannte Pulse-Shape-Analysis durchgeführt, um eine hochauflösende Ortsbestimmung im HPGe-Detektorvolumen zu erzielen.

Die Koinzidenzmessungen und die Vorarbeiten zur Ortsbestimmung mit der Compton-Kamera wurden im Rahmen der Kölner Bachelorarbeit von Rouven Hirsch durchgeführt.

#### *Erste Ergebnisse zur Bildgebung von $\gamma$ -Quellen mit der Compton-Kamera*

In einer ersten vorläufigen Version der Analyse der Messdaten wurde zunächst ohne PSA und Imaging mit einem C-Programm, welches auf das ROOT-framework aufbaute und an der TU München entwickelt wurde, gearbeitet. Die aktuelle Analyse und somit alle folgenden Analyseschritte basieren auf der ebenfalls an der TU München entwickelten Java Software. Der zweite Schritt der Datenanalyse besteht aus der Ortsbestimmung für die Wechselwirkungen im HPGe-Detektor mittels Impulsformanalyse. Im dritten Schritt der Analyse geschieht die eigentliche Bilderzeugung (*Imaging*) durch Bestimmung der Schnittpunkte, der für alle Events berechneten Kegelmäntel, auf einer zum DSSD parallelen Bildebene.

Es stellt sich heraus, dass mit zusätzlichen Korrekturen der relativen Positionen von DSSD und HPGe-Detektor die *ARM* optimiert werden können. In einer umfangreichen, mehrwöchigen Messreihe wurde eine sehr große Datenmenge mit der Comptonkamera am IKP, Köln aufgenommen. Wichtige Größen, die bei den unterschiedlichen Messungen variiert wurden, waren die Abstände der Detektoren und der  $\gamma$ -Quellen. Zusätzlich wurde eine Reihe von Messungen mit zwei  $\gamma$ -Quellen durchgeführt, die am besten die Funktionsweise und die ersten Auflösungswerte verdeutlichen. Bei der Datenanalyse stellte sich eine sorgfältige Optimierung aller Abstände und Positionen des Aufbaus als besonders relevant für die bestmögliche Winkelauflösung heraus. Die erfolgreiche Inbetriebnahme der Comptonkamera wird durch die dreidimensionale Lokalisierung von  $\gamma$ -Quellen demonstriert.

Das vorläufige Ergebnis ist somit bereits nach kurzer Bearbeitungszeit nahe an der theoretischen Grenze.

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

Als nächster Schritt wird die Analyse des Datensatzes im Rahmen der Masterarbeiten von Tim Steinbach und Rouven Hirsch fortgesetzt. Das Potential der Comptonkamera soll mit den theoretischen Limitierungen verglichen werden und möglichst in Übereinstimmung sein. Einen weiteren Schritt wird die Analyse der High-Efficiency Daten ermöglichen. Dabei wird nur die Bestimmung der Wechselwirkungsorte mit PSA-Software im HPGe-Detektor verwendet und somit die Lokalisierung von  $\gamma$ -Quellen ausschließlich mit Hilfe des ortsempfindlichen HPGe-Detektors durchgeführt.

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

Compton-Kamera basierend auf einem hochsegmentierten HPGe-Detektor und einem DSSSD Rouven Hirsch<sup>1</sup>, Lars Lewandowski<sup>1</sup>, Tim Steinbach<sup>1</sup>, Benedikt Birkenbach<sup>1</sup>, Jürgen Eberth<sup>1</sup>, Roman Gernhäuser<sup>2</sup>, Walter Henning<sup>2</sup>, Herbert Hess<sup>1</sup>, Ludwig Maier<sup>2</sup>, Peter Reiter<sup>1</sup>, Michael Schlarb<sup>2</sup> und Max Winkel<sup>2</sup>, <sup>1</sup>IKP, Universität zu Köln, Köln, Deutschland, <sup>2</sup>Physik-Department E12, Technische Universität München, Garching Deutschland, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, ISSN 0420-0195

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

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 013E</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Herstellung und Nutzung von Aktinidentargets |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 28.02.2013   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 28.02.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>141.419,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Eberhardt                |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden insgesamt acht großformatige  $^{235}\text{U}$ -Präparate hergestellt, jeweils mit einer aktiven Fläche von ca.  $43\text{ cm}^2$  (74 cm Durchmesser) - entsprechend der Standardgeometrie der Messkammern bei den Projektpartnern PTB und HZDR. Die Ausbeuten lagen auch im Falle des  $^{235}\text{U}$  bei  $> 98\%$  bei einer Massenbelegung von  $400\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . Die Ausbeute wurde indirekt durch gammaspektroskopische Messung des Überstandes bestimmt. Zudem wurden die fertigen Targets ebenfalls gammaspektroskopisch untersucht und untereinander verglichen. Die so erhaltenen Ergebnisse bestätigen die o. a. indirekten Messungen des Überstandes nach erfolgter Abscheidung. Die Homogenität der Schicht wurde mittels Autoradiographie überprüft.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Bei Projektende stand die Herstellung der die  $^{242}\text{Pu}$ -Präparate noch aus. Herr Vascon ist seit dem 01.03.2013 beim HZDR beschäftigt und soll die Herstellung der Pu-Präparate am Institut für Kernchemie der JGU durchführen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

The performance of thin layers produced by molecular plating as  $\alpha$ -particle sources, A. Vascon, N. Wiehl, T. Reich, J. Drebert, K. Eberhardt, Ch. E. Düllmann, Nucl. Instrum. Meth. A 721 (2013) 35-44

Smooth crack-free targets for nuclear applications produced by molecular plating, A. Vascon, S. Santi, A.A. Isse, A. Kühnle, T. Reich, J. Drebert, K. Eberhardt, Ch.E. Düllmann Nucl. Instrum. Meth. A 714 (2013) 163-175

Fundamental aspects of molecular plating and production of smooth crack-free Nd targets, A. Vascon, S. Santi, A.A. Isse, T. Reich, J. Drebert, H. Christ, K. Eberhardt, Ch.E. Düllmann J. Radioanal. Nucl. Chem., in press

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br>02 NUK 014A |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente |   |  |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2010 bis 30.09.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>305.378,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 multifunktionellen N, O, S-Donorliganden, die Charakterisierung des Transportverhaltens sowie die Strukturklärung relevanter Komplexe.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die konzipierten Studien im Rahmen des Teilprojektes I des Verbundvorhabens beziehen sich auf die Synthese und Charakterisierung von neuen multifunktionellen 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 neue Erkenntnisse zu ihren Komplexbildungseigenschaften in Lösung sowie zu charakteristischen Strukturmotiven der gebildeten Komplexe im Festkörper gewonnen werden. Im Einzelnen erfolgten folgende spezielle Untersuchungen:

- Multinukleare NMR-Studien ( $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ) zur Komplexbildung von Zn(II), Eu(III) und Am(III) mit 2-Picolylmethantricarboxamid in Lösung

- Untersuchung der Einflussparameter (Metallkation, Anion, Lösungsmittel, Konzentrationsverhältnis Metallsalz:Ligand) auf die Bildung supramolekularer Metallogele aus 4f-Metallsalzen und Carboxamiden
- Laserfluoreszenzspektroskopische Untersuchungen zu den Wechselwirkungen von Cm(III) mit ausgewählten Ligandtypen
- Detaillierte Flüssig-Flüssig-Extraktionsexperimente zur Extraktion von La(III), Gd(III), Tb(III), Er(III) und Am(III) mit ausgewählten Liganden in Abhängigkeit von pH-Wert, Ligandkonzentration sowie Zusatz an n-Caprylsäure
- Röntgenkristallstrukturuntersuchungen an vier Diiminliganden, drei Cu(II)-Komplexen mit Diiminliganden und einem Tb(III)/Zn(II)-Komplex mit einem Diaminliganden

Aus den erfolgten NMR-Studien kann geschlussfolgert werden, dass die Bindungsmotive der f-Elemente mit Methantricarboxamiden durch Wechselwirkungen mit den Carbonylfunktionen der Amidgruppe bestimmt werden. Die durchgeführten Extraktionsstudien zeigen, dass Hydrazon- und Pyrazolonliganden zu den höchsten Extraktionsausbeuten führen. Eine Steigerung der Extraktion bei Zusatz von n-Caprylsäure ist offensichtlich mit einer Ladungskompensation durch das hydrophobe Caprylanion in der organischen Phase verbunden. In Kristallisationsexperimenten konnte ein neuer heterobinuklearer Komplex der Zusammensetzung  $[\text{Zn}(\text{L})(\mu\text{-CH}_3\text{COO})\text{Tb}(\text{NO}_3)_2]$  für das Metallpaar Tb(III)/Zn(II) mit einem 2-hydroxy-3-methoxy-substituierten Diamin erhalten und strukturell charakterisiert werden.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Durchführung von Einzel- und Mehrionenexperimenten zur Extraktion von f-Elementen mit ausgewählten Ligandsystemen
- Ableitung von Struktur-Wirkungsbeziehungen für die Extraktion von ausgewählten f-Elementen mit den betrachteten Ligandtypen
- Laserfluoreszenzspektroskopische Untersuchungen zu den Wechselwirkungen von Eu(III) und Am(III) mit ausgewählten Ligandtypen
- Flüssig-Flüssig-Extraktionsuntersuchungen zur Coextraktion von Zn(II) und Cu(II) mit Yb(III) bzw. Eu(III) in Extraktionssystemen mit 2-hydroxy-3-methoxyphenyl- bzw. 2-hydroxy-3-ethoxyphenylsubstituierten Diaminen
- Versuche zur Einkristallzüchtung heterobinuklearer Metallkomplexe von Ln(III) und Zn(II) mit Diimin- und Diaminliganden
- Magnetische Messungen an heterobinuklearen Metallkomplexen mit ausgewählten Liganden

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

K. Gloe, M. Wenzel, L. F. Lindoy, F. Li, „Supramolecular chemistry in solvent extraction: towards highly selective extractants and a better understanding of phase transfer phenomena”, in Solvent Extraction and Ion Exchange: A Series of Advances, Vol. 21, B. A. Moyer, Ed., CRC Press, Boca Raton, 2013, in press;  
 K. Schnaars, Multifunktionelle N,O-Donorliganden für d- und f-Elemente: Komplexbildung, Struktur und Flüssig-Flüssig-Extraktion”, Masterarbeit, TU Dresden, 2013;  
 M. Nettling, „Diiminospirocyclohexane: Synthese, Struktur und Komplexbildung“, Bachelorarbeit, TU Dresden, 2013;  
 J. Schulz, „Übergangsmetallkomplexe ausgewählter Amid- und Iminliganden: Synthese und Struktur, Bachelorarbeit, TU Dresden, 2013;  
 K. Gloe, „Coordination Chemistry of Lanthanoides(III) and Uranium(VI) with Multifunctional N,O-Donor Ligands: Structural Diversity and Extraction Behaviour”, Kolloquium, ANSTO, Sydney, 05.02.2013.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden                                 |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 014B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2010 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>467.663,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Komplexierungsverhalten von radiotoxischen, kurzlebigen Radionukliden (z. B.  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ) unter naturnahen Bedingungen in potentiellen Wirts- oder Deckgesteinsformationen untersucht und beschrieben werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Teilprojekt I:

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

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

Teilprojekt II:

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

- Herstellung der Radionuklide im Kernreaktor oder am Zyklotron
- Quantifizierung des spezifischen Komplexierungsvermögens 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:

Es wurden Strukturuntersuchungen der sich bildenden U(VI)-Schiffschen Basen bzw. -1,3  $\beta$  Diketone Komplexe in methanolischer Lösung mittels EXAFS-Messungen durchgeführt und ausgewertet. Hier zeigte sich, dass beim Wechsel des Lösungsmittels von Wasser zu Methanol in der äquatorialen Ebene des freien Uranylions ein vollständiger Austausch der Wassermoleküle durch Methanolmoleküle erfolgt. Der U-O<sub>eq</sub> Abstand beträgt 2.460 Å. Auf Grund der gewinkelten Anordnung des Methanolmoleküls konnte zusätzlich ein U-C Koordination detektiert und ein Abstand der beiden Atome von 3.495 Å erhalten werden. Die sich im basischen Bereich (0 mV) bildenden 1:2 U(VI)- $\beta$  Diketon-Komplexe binden das U(VI) bidentat über die beiden Sauerstoffatome des Diketons mit einem U-O<sub>eq</sub> Abstand im Bereich von 2.34 - 2.38 Å in Abhängigkeit von der Struktur des Diketons. In den 1:2 U(VI)-Schiffsche Base Komplexen (240 mV) interagiert das Uran mit dem Stickstoffatom im Abstand von 2.51 - 2.57 Å. Befinden sich OH Gruppen in ortho Stellung des aromatischen Restes des Liganden zur Imingruppe scheint eine bidentate Anbindung des Urans über das Stickstoff- und Sauerstoffatom sehr wahrscheinlich zu sein. In der Struktur der U-Komplexe beider untersuchten Ligandengruppen sind noch Methanolmoleküle enthalten. Untersuchungen entsprechender fester U-Komplexe der ausgewählten Schiffschen Basen und 1,3  $\beta$  Diketone wurden Strukturdaten erhalten, die mit denen der entsprechenden Komplexe in Lösung vergleichbar sind. Desweiterem wurden Modellkomplexierungen von 1,3  $\beta$  Diketonen mit Lanthaniden (Nd, Sm, Gd und Yb) mit Hilfe der UV-Vis Spektroskopie durchgeführt und die entsprechenden Komplexbildungskonstanten bestimmt.

Teilprojekt II:

Zwei festphasenfixierte Calixarene (Calix[4]aren und 25,27-Dicarboxymethoxy-calix[4]aren) wurden hinsichtlich ihres Extraktionsvermögens von <sup>85</sup>Sr untersucht. Als Festphasen wurden zwei Silicagele unterschiedlicher Oberfläche (100 und 500 m<sup>2</sup>/g für CPG bzw. Merck) eingesetzt. Die Substanzmenge betrug 0,32 - 0,40 mmol Calixaren pro Gramm Silicagel. Für das difunktionalisierte Calixaren steigt die Extraktion bei pH 3 von 50 % auf 95 % bei pH 8. Das Merck-Silicagel sorbiert bereits ohne Calixaren-Funktionalisierung 90 % <sup>85</sup>Sr bei pH 8, wobei eine Calixaren-Funktionalisierung zu einer Extraktion von 95 % führt. Das CPG-Silicagel extrahiert 35 % (ohne Calixaren) und 95 % <sup>85</sup>Sr (mit difunktionalisiertem Calixaren). Das CPG-Silicagel-Calixaren bildet mit <sup>85</sup>Sr Kolloide, die über Stunden stabil in Lösung bleiben. Eine Rückextraktion (Desorption) des <sup>85</sup>Sr vom difunktionalisiertem Calixaren-CPG mit 10 %-iger Essigsäure führt nur zu einer Desorptionsausbeute von 10 %.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Teilprojekt I:

Abschluss der experimentellen Arbeiten und Auswertung, insbesondere Durchführung von noch ausgewählten Cm- Komplexierungen, NMR-Messungen von U(VI) und Eu(III) mit Schiffschen Basen bzw. 1,3  $\beta$  Diketonen in methanolischer Lösung sowie DFT Kalkulationen.

Teilprojekt II:

Abschluss der Auswertung experimenteller Ergebnisse.

Es wird die Zusammenstellung der Ergebnisse beider Teilprojekte erfolgen und mit dem Abschlussbericht soll begonnen werden. Publikationen (2- Teilprojekt I, 1-Teilprojekt II) sind in Bearbeitung. Ziel ist es, die Manuskripte bis Ende des Jahres fertig zu stellen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Mansel, S. Gruhne, K. Franke, S. Fischer: Production of <sup>85</sup>Sr at a 18 MeV-cyclotron and purification for geochemical investigations. Submitted to Applied Radiation and Isotopes (2013).

S. Haupt, R. Schnorr, M. Poetsch, A. Mansel, M. Handke, B. Kersting: Synthesis and characterization of 25,27-bis(carbonylmethoxy)calix[4]arenes. Extraction properties towards <sup>85</sup>Sr in a synthetic groundwater. Submitted to Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry.

M. Poetsch und A. Mansel, jeweils Poster zur ANAKON 2013, 04.-07.03.2013, Essen

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br>02 NUK 014C |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente |   |  |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2010 bis 30.09.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>260.548,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Bindungsselektivität und das Extraktionsverhalten eingestellt werden.

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Darstellung und Charakterisierung der Chelatliganden
- Komplexierungsvermögen der Chelatliganden gegenüber Radionukliden
- Adsorptionsverhalten der Chelatligandkomplexe mit Radionukliden
- Festphasenfixierung von Chelatliganden

- Bestimmung von Komplexbildungskonstanten der Radionuklid-/Aktinid-Komplexe
- Bestimmung des Extraktionsverhaltens der Radionuklid-/Aktinid-Komplexe; Flüssig-Flüssigphasen-Experimente
- Dokumentation

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Synthese und strukturelle Charakterisierung einer Vielzahl neuer multifunktionaler Calix[4]aren-Derivate
- Untersuchung der Komplexierung und Bestimmung von Komplexbildungskonstanten mit ausgewählten *f*-Elementen (Y(III), La(III), Eu(III), Tb(III), Dy(III), Gd(III))
- Weiterentwicklung der Fest-Flüssig-Extraktionen (Batch-Experimente); Verwendung von controlled pore-glass Festphasen (CPG), die mit verschiedenen mono-, di-, tri- and tetrasubstituierten Calix[4]aren-Derivaten funktionalisiert wurden
- Synthesen, strukturelle Charakterisierungen und Komplexierungsverhalten von Phenol- und Thiophenol-verbrückten Doppelcalix[4]arenen
- Verwendung von Phenol-verbrückten Doppelcalix[4]arenen zur Detektion toxischer Schwermetalle (Cd(II)); Detektion von Zn(II) und Cd(II) im nanomolaren Konzentrationsbereich (CHEF-Effekt)
- Wasserlösliche multifunktionelle Calix[4]aren-Derivate ließen sich nicht darstellen

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Extraktionsuntersuchungen (mit HZDR Forschungsstelle Leipzig)
- umfangreiche strukturanalytische Untersuchungen der Liganden und Metallkomplexe
- Bestimmung von Komplexbildungskonstanten
- Umfangreiche Dokumentation

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Ausgewählte Ergebnisse wurden im Rahmen des Projekttreffens am 30. April 2013 an der UL vorgestellt

Vortrag, Koordinationschemie-Treffen 2013: S. Haupt, R. Schnorr, S. Ullmann, B. Kersting: Novel Calix[4]arene-based Ligands: Complexation, Extraction and Functional Materials

Posterpräsentation, International Symposium on Macrocyclic and Supramolecular Chemistry 2013 (8-ISMSC): S. Ullmann, R. Schnorr, S. Haupt, B. Kersting: Tail-to-Tail Bridged Calix[4]arenes as Complexation Agents for *d*- and *f*-Elements

Posterpräsentation, International Symposium on Macrocyclic and Supramolecular Chemistry 2013 (8-ISMSC): R. Schnorr, S. Haupt, S. Ullman, F. Glasneck, B. Kersting: Calix[4]arenes as Scaffolds for Salicylidene and Robson-type ligands

Posterpräsentation, 12<sup>th</sup> International Conference on Calixarenes (Calix 2013), S. Haupt, R. Schnorr, M. Poetsch, and B. Kersting: Liquid-Liquid and Solid-Liquid Extraction of Sr<sup>2+</sup> with Calix[4]arene-based Ligands

Posterpräsentation, 12<sup>th</sup> International Conference on Calixarenes (Calix 2013), R. Schnorr, S. Haupt, S. Ullmann, B. Kersting: On the Road to Novel Amphiphilic Calix[4]arene Ligands

Vortrag (Posters/Short Presentation), 12th International Conference on Calixarenes (Calix 2013), S. Ullmann, R. Schnorr, S. Haupt, B. Kersting: Tail-to-tail Bridged Biscalix[4]arene Based Luminescence Sensors

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen                                      |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 019A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.01.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>572.947,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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:

- Dreiwertige Actinide Pu, Am, Cm (Phosphate, Carbonate, Eisen(hydr)oxide)
- Vierwertige Actiniden Th, U, Np, Pu (Silicate, Sulfate, Carbonate, Phosphate, Sulfide, Eisen(hydr)oxide, LDH-Phasen)
- 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 1. Juni 2012 am KIT-INE angefangen.
- Frau Rodríguez Galán hat ihre Doktorandenstelle am 15. Juli angetreten und wurde an die Universität Oviedo, Spanien delegiert.
- Frau Dr. Rojo Sanz hat ihre Postdoktorandenstelle am 1. August angetreten und wurde ans PSI, Schweiz delegiert.

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

Zu 1)

- Hochauflösende AFM Messungen an Calcit-Einkristallen in Gegenwart von Natriumnitrat und Kaliumnitrat (oberflächenverändernde Effekte jedoch nur mit  $\text{NaNO}_3$ ; in Zusammenarbeit mit der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).
- Cm(III) TRLFS Messungen mit  $\text{NaNO}_3$  an Calcitpulver. Ergebnisse aus vorherigen Eu(III) Messungen konnten nachvollzogen werden. Eu(III) Synthesen und Messungen an Calcit mit NaF, NaCl und NaBr als Hintergrundelektrolyten mit vergleichbaren Ergebnissen (Einbau) wie für  $\text{NaClO}_4$ .
- Dichte-Funktional-Theorie-Berechnungen zu Nitratin/Calcit-Strukturen mit Bulk-Wasser-Einfluss (in Zusammenarbeit mit Dr. Robert Polly, INE).



Zu 2)

- Kristallisation und vollständige Charakterisierung von Blei dotierten (Sr,Ba)SO<sub>4</sub> solid-solutions. Aus diesen und den zum „Reinsystem“ erarbeiteten Daten wurde das thermodynamische Modell zur Vorhersage der Gleichgewichtsendglieder einer solid-solution weiterentwickelt.
- Synthese und Charakterisierung von Se(VI) dotierten Schwertmannit und Jarosit.
- Entwicklung eines Verfahrens zum Einbau von Se(VI) in Calcit durch den Einsatz von Silicagel.

Zu 3)

- Synthese der Zementphasen: AFm-CO<sub>3</sub>, AFm-OH-CO<sub>3</sub>, Abschluss der Charakterisierung von C-S-H, Tobermorit, AFt, AFm-Cl<sub>2</sub>, AFm-SO<sub>4</sub>, AFm-CO<sub>3</sub> und AFm-OH-CO<sub>3</sub>.
- Sorptionsversuche von Se(IV) an den Zementphasen AFm-CO<sub>3</sub> und AFm-OH-CO<sub>3</sub> unter hochalkalischen Bedingungen. Vergleich der Sorptionskinetik mit Ergebnissen an TiO<sub>2</sub>.
- Reduktion von Se(IV) unter hochalkalischen Bedingungen (elektrochemisch und mit Hilfe von Hydrazin). Charakterisierung der reduzierten Spezies in Lösung mittels UV-Vis.
- Start der Langzeit-Sorptionsversuche mit Se(IV) und Se(-II) unter reduzierenden Bedingungen.
- Herstellung von C-S-H und AFm-Cl<sub>2</sub> Proben beladen mit Se(IV) für in situ ATR FT-IR Analyse am HZDR.
- Erste EXAFS Untersuchungen von Se(IV) und Se(-II) sorbiert an C-S-H Phasen und AFm-Cl<sub>2</sub>. Analyse der EXAFS Daten.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Zu 1)

- Oberflächensensitive Röntgenbeugungsmessungen an Calciteinkristallen in Gegenwart von Natriumnitrat und Y/Am(III) (in Zusammenarbeit mit der Advanced Photon Source des Argonne Nat. Lab., USA)
- Fortführung der Cm(III) Messungen an Calcit mit TRLFS, Mitfällungs-/Rekristallisationsexperimente mit Halogenidionen als Hintergrundelektrolyten.

Zu 2)

- Kristallisation und Charakterisierung von Se(VI) dotierten (Sr,Ba)SO<sub>4</sub> solid-solutions.
- Moleküldynamische Berechnung zum Einbau von SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup> Ionen in CaCO<sub>3</sub>.

Zu 3)

- Screening Sorptionsversuche von Se(-II) an C-S-H Phasen, AFm-Cl<sub>2</sub>, AFm-CO<sub>3</sub> und TiO<sub>2</sub> unter reduzierenden Bedingungen mit besonderem Augenmerk auf die Sorptionskinetik.
- Beginn der Untersuchungen des Einflusses wechselnder Redoxbedingungen auf das Sorptionsverhalten von Se(IV) an C-S-H Phasen und AFm-Phasen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Poster: S. Hofmann, T. Stumpf: "The influence of ClO<sub>4</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on the Eu<sup>3+</sup> uptake by calcite". Joint INE-ITU Research Fellows Day, 2012, FTU, Karlsruhe/D

H. Rojo, X. Gaona, Th. Rabung, M. Garcia, T. Missana, M. Altmaier: "Complexation of Nd(III)/Cm(III) with gluconate in dilute NaCl and CaCl<sub>2</sub> alkaline solutions: solubility and TRLFS studies". 3<sup>rd</sup> International Workshop: Mechanisms and modelling of waste/cement interactions, 2013, Het Pand, Ghent/Belgium.

Vorträge: S. Hofmann, T. Stumpf: "Influence of nitrate on the Eu(III) uptake by calcite: A TRLFS study" Goldschmidt Conference, 2012, Montreal/CAN

S. Hofmann, M. Schmidt, T. Stumpf: "Surface interaction studies of Ln(III)/ An(III) with site-selective time resolved laser fluorescence spectroscopy", Internationaler Workshop Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy, 2012, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf/D

S. Hofmann, T. Stumpf: "Anionic influence on Ln(III)/An(III) uptake by calcite", BMBF-Projektmeeting und Workshop "From atomistic calculations to thermodynamic modelling", Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurt/D

H. Rojo, J. Tits: "The retention of Se under reducing conditions in the cementitious near-field of a repository for radioactive waste", BMBF-Projektmeeting und Workshop "From atomistic calculations to thermodynamic modelling", Goethe-Universität Frankfurt, Frankfurt/D

Publikationen: M. Prieto, J.M. Astilleros & L. Fernández-Díaz (2013): Environmental remediation by crystallization of solid solutions. *ELEMENTS* 9, 195-201

A. Fernández-González, J. Carneiro, D. Katsikopoulos & M. Prieto (2013): Thermodynamic properties of the (Ba,Pb)SO<sub>4</sub> solid solution under ambient conditions: implications for the behavior of Pb and Ra in the environment. *GEOCHIMICA ET COSMOCHIMICA ACTA* 105, 31-43.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12,<br>76131 Karlsruhe  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 019B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.01.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>263.424,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 ersten Halbjahr 2013 wurden die hergestellten Eisensulfide und Eisenoxide sowie deren Residuallösungen mit verschiedenen Analysemethoden untersucht und charakterisiert. Die Ergebnisse der Sorption von Selen durch Interaktion mit Eisensulfiden bzw. Eisenoxiden waren überaus zufriedenstellend. Mittels ICP-MS-Analytik konnte in den Residuallösungen eine Abnahme von mehr als 99 % der anfänglichen Selenkonzentration festgestellt werden, was ein großes Retentionspotential der untersuchten Mineralphasen widerspiegelt.

Die röntgenkristallographische Charakterisierung der Präzipitate zeigte allerdings noch nicht die gewünschte Reinheit. Im Fall der Untersuchungen von Selen dotierten Pyriten wurden in den Syntheseprodukten neben Pyrit auch Mackinawit oder Markasit gefunden, welche für fortführende Stabilitätsexperimente von Pyrit erschwerend wirken. Neue und bestehende Syntheseverfahren wurden daraufhin zur Herstellung der Präzipitate entwickelt und weiter optimiert, um die gewünschte Reinheit von Pyrit für weitere Untersuchungen zu erhalten.

Vergleichbare Schwierigkeiten ergaben sich anfänglich bei der Synthese von Eisenoxiden, deren Reinheit häufig durch Beimengungen anderer Eisenoxidminerale gestört wurde. Durch eine Anpassung der jeweiligen Synthesebedingungen konnte das Auftreten von unerwünschten Nebenprodukten bei den Mineralphasen Hämatit und Magnetit vermieden werden, wodurch die Qualität der ersten Ergebnisse zum Retentionspotential von Selen deutlich verbessert werden konnte.

Der aktuelle Stand der Arbeiten wurde den Projektpartnern während der ImmoRad-Tagung in Frankfurt im Februar 2013 vorgestellt und weiteres Vorgehen diskutiert. Im September 2013 werden auf der Tagung (KIT-KIST), die im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Karlsruher Institut für Technologie und dem Korean Institute of Science and Technology stattfindet, das Forschungsprojekt präsentiert. Ebenso werden auf dem „Joint Annual Meeting“ der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft (DMG) die Arbeiten in einem Posterbeitrag vorgestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Weitere geplante Arbeiten im zweiten Halbjahr 2013 sind morphologische Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie und erste detaillierte Strukturuntersuchungen an der Synchrotronquelle ANKA des KIT. Die eigentlichen Stabilitätsexperimente der Präzipitate werden gegen Mitte des Halbjahres durchgeführt und mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie an Instituten von ImmoRad-Projektpartnern untersucht.

### 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><br>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße,<br>52428 Jülich   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 019C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.01.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>243.568,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Bosbach                |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Folgende Teilziele wurden definiert:

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: 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.
- AP6: Reguläre Mischungparameter 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: Für die Th/U Silikat-Mischkristalle werden weiter kalorimetrische Messungen (Tieftemperatur) 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 behaviour 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><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 019D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.01.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>400.943,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Scheinost                |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bearbeitung des Programmpaketes A-1 (Kopräzipitation) und A-2 (Pu-Sorption):

Ergebnisse wurden auf zwei Konferenzen vorgestellt (eingeladener Vortrag bei Actinides-Konferenz, 21.-26.07.2013, Karlsruhe; Vortrag bei Goldschmidt-Konferenz, 25.-30.08.2013, Florenz.

Bearbeitung des Programmpaketes B-3 (Np-Siderit-System):

Erfolgreiche Synthese anhand Jönsson et al. (2008). Für Stabilisierung der Sideritphase war von entscheidender Bedeutung, dass die Salzkonzentration in der Waschlösung eine Konzentration von 0,1 mol/L NaCl nicht unterschreitet. Das auf diesem Weg gewonnen Produkt wurde mittels XRD, Raman-Spektroskopie und Zetapotenzialmessung charakterisiert.

Bei den ersten EXAFS Untersuchungen im Np(V)-Siderite-System wurden der Einfluss der Sorptionsdauer und der Ionenstärke auf die Wechselwirkung betrachtet. Unabhängig von beiden Parametern wurde immer eine vollständige Sorption des Np am Siderit festgestellt. Die XANES-Spektren zeigen eine Reduktion von Np(V) zu Np(IV). Die EXAFS Spektrum, die derzeit ausgewertet werden, weisen auf eine präzipitierte Np(IV)-Hydroxo Spezies hin. In wie weit auch oberflächengebundenes Np(V) anwesend ist muss die weitere Auswertung zeigen. Indizien dafür gibt es in den nasschemischen Aufarbeitungen der pH-Wertabhängigen Sorptionsproben. Dafür wurde das oberflächengebundene Np mit Hilfe von 1 M HCl vom Feststoff gelöst, dieser Überstand vom Siderite abgetrennt und danach mit TTA extrahiert. Die Verteilung des Np zwischen der wässrigen und organischen Phase gibt dann Aufschluss über die Verteilung zwischen Np(IV) und Np(V). Das Verhältnis zwischen Np(V) und Np(IV) ist unabhängig vom pH-Wert in allen Proben 2:1.

Jönsson J. & Sherman D.M., Sorption of As(III) and As(V) to siderite, green rust (fougerite) and magnetite: Implications for arsenic release in anoxic groundwaters, *Chemical Geology* 255 (2008) 173–181.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Programmpaket A:

- Erarbeitung einer Publikation der Pu-Kopräzipitationsdaten
- Erarbeitung einer Publikation der Pu-Sorptionsdaten

Programmpaket B:

- Auswertung der Np-Siderit-EXAFS-Daten
- Bearbeitung des Np-Magnetit-Systems (Sorption und Kopräzipitation) mit ersten EXAFS-Messungen (9.-11.12.2013)

Programmpaket C:

- Die ersten Se-LDH-XAS-Messungen für PSI-LES werden am 2.-5.10.2013 durchgeführt

### 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

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 019E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.01.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>243.372,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Winkler            |   |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Themenbereichs A (Dreiwertige Actinide) sind bezüglich der Erreichung des Meilensteins „Einreichung einer Publikation Cm-Einbau in Calcit“ unvorhergesehene Schwierigkeiten aufgetreten. Zur Vorhersage von Gleichgewichtskonzentrationen des Einbaus von dreiwertigen Lanthaniden und Actiniden in Calcit ist es notwendig die freien Energien von Verbindungen  $(Eu/Cm)Na(CO_3)_2$  zu berechnen. Es war geplant diese Energien aus den Reaktionen  $EuNa(CO_3)_2 + Na_2CO_3 \rightarrow EuNa_3(CO_3)_3$  und  $EuNa(CO_3)_2 + CmCl_3 \rightarrow CmNa(CO_3)_2 + EuCl_3$  zu berechnen. Es zeigte sich, dass die Genauigkeit von konventionellen spinpolarisierten DFT Rechnungen nicht ausreicht, um die Enthalpien von Austauschreaktionen mit Ln/An(III) quantitativ vorherzusagen. Zurzeit untersuchen wir, ob DFT+U Rechnungen eine Möglichkeit bieten, genauere Energien vorherzusagen. Diese Rechnungen sind extrem rechenzeitaufwendig. Es gab jedoch einen signifikanten Durchbruch: ein neuer Ansatz basierend auf paarweisen Na + Ln/An(III) Defekten in Superzellen



erlaubt es uns jetzt quantitative Aussagen zum Effekt von Na + Ln/An(III) Paaren auf die thermodynamische Stabilität der relevanten Mischphasen. Zum Themenbereich B (Vierwertige Actinide) wurden die Untersuchungen an den im FZJ-IEK6 synthetisierten Phasen Coffinite ( $\text{USiO}_4$ ), Thorit ( $\text{ThSiO}_4$ ) sowie Mischkristalle dieser beiden Phasen und Studtite ( $\text{UO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) sowie Metastudtite ( $\text{UO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) fortgeführt. Die Proben wurden mit Ramanspektroskopie bei hohen Drücken sowie durch Pulverdiffraktion bei hohen Drücken mit Synchrotronstrahlung untersucht. Diese Experimente wurden an der Extreme Conditions Beamline@PETRA III des DESY, Hamburg durchgeführt. Die Druckbedingungen einer bereits in der Literatur beschriebenen druckinduzierten strukturellen Phasentransformation von Coffinite konnten genauer bestimmt werden. Es konnte zudem gezeigt werden, dass diese Phasentransformation teilweise reversibel abläuft. Der Meilenstein zu diesem Themenbereich (Publikation DFT Rechnungen an uranhaltigen Phasen) wird im nächsten Berichtszeitraum erreicht. Eine Publikation der Ergebnisse der DFT Rechnungen in Verbindung mit den Hochdruckuntersuchungen an Coffinite ist in Vorbereitung und wird im zweiten Halbjahr eingereicht werden. Die Untersuchungen an Studtite und Metastudtite bei hohen Drücken wurden im Rahmen des EMR-S Spring Meeting in Form eines Posterbeitrages vorgestellt. Zum Themenbereich C (Radium und Spaltprodukte) wurde eine Publikation eingereicht und zur Veröffentlichung angenommen. Eine weitere Publikation zur quantitativen Beschreibung des strukturellen Einbaus von Selen in Calcit befindet sich in Vorbereitung und wird im nächsten Berichtszeitraum eingereicht werden (siehe Pkt. 5).

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten werden wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Im Juli werden am Synchrotron (Extreme Conditions Beamline an der PETRA III Synchrotronstrahlungsquelle des DESY, Hamburg) weitere Experimente mit dem im FZJ-IEK6 synthetisierten Uran- und Thorium-haltigen Verbindungen (siehe Pkt. 3) durchgeführt. Es wurde weitere Strahlzeit am Synchrotron beantragt, um die lokale Struktur der schweren Metallatome der Mischphasen des Systems Coffinite – Thorite ( $\text{U}_x\text{Th}_{1-x}\text{SiO}_4$ ) bei Raumbedingungen zu untersuchen. Die vorgesehenen mikrokalorimetrischen Untersuchungen werden ab Juli des Jahres fortgesetzt. Durch einen technischen Defekt des PPMS-Geräts und einen dadurch bedingten ca. fünf Monate andauernden Ausfall kam es hier zu einer Verzögerung bei den Experimenten.

Für diese Untersuchungen stehen folgende Proben bereits zu Verfügung:

- Uran- bzw. Thorium-haltigen Phasen aus der Kooperation mit dem FZJ-IEK6
- LDH Phasen aus der Kooperation mit dem FZJ-IEK6
- Eine Se-dotierte Eisenoxid Phase aus der Kooperation mit dem KIT-IMG

Im zweiten Halbjahr werden weitere 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, als Vortrag bei der Goldschmidt Konferenz 2013 eingeladen

K. Rozov, V.L. Vinograd, D.A. Kulik, F. Brandt, B. Winkler, D. Bosbach: Effects of lead and strontium on radium uptake by barite: Atomistic simulations and thermodynamic assessment, Vortrag bei der Goldschmidt Konferenz 2013

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

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, Artikel zur Veröffentlichung akzeptiert

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

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Regina-Pacis-Weg 3, 53113 Bonn  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 019F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.04.2013 bis 31.03.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.04.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>284.148,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 wieweit 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 Borosilikatgläser.
- (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

Herr Christoph Lenting hat am 1. April 2013 seine Doktorandenstelle am Steinmann-Institut angetreten und mit den nötigen Arbeiten begonnen. Eine frühere Einstellung war wegen der noch nicht erfolgten endgültigen Bewilligung dieses nachträglichen Teilprojekts nicht möglich, weshalb sich die Arbeiten um ca. 3 Monate verzögern.

- (A): Vorläufige Testsynthese von kleinen Probenmengen (10 g) erfolgreich.
- (B-E): Erste Experimente an den U-führenden Gläsern wurden im Rahmen einer Diplomarbeit von Lars Dohmen in Bonn durchgeführt. Befund: Laminare und komplexe Musterbildung in den Korrosionssäumen, Uran wird teilweise im Korrosionssaum zurückgehalten.
- (F): Verschiedene Proben von Bordinstrumenten wurden mittels Elektronenstrahlmikrosonde auf Korrosionserscheinungen untersucht. Befund: Korrosionssäume sind hauptsächlich in Rissen im Glas zu finden.
- (G): Noch ausstehend.

Anstelle der ursprünglich geplanten Teilnahme an der Goldschmidt-Konferenz 2013 in Florenz, Italien, wurde an einem Workshop zur Glaskorrosion (Workshop on Long Term Glass Performance) in Avignon, Frankreich teilgenommen. Da dieses nachträglichen Teilprojekts erst am 1. April 2013 begonnen hat, wäre die Goldschmidt-Konferenzteilnahme zu kurzfristig gewesen. Der Workshop bot jedoch die Möglichkeit mit Wissenschaftlern aus dem Ausland über etablierte Modelle zur Glaskorrosion und neue Erkenntnisse zu diskutieren sowie zukünftige internationale Kollaborationen zu initiieren bzw. weiterhin aufrecht zu erhalten (siehe Gin S, Abdelouas, A., Criscenti, L., Ebert W., Ferrand F., Geisler T., Harrison M., Inagaki Y. et al. (2013): An international initiative on long-term behavior of high-level nuclear waste glass. *Materials Today*, in press).

Ferner, wurde ein Manuskript zur experimentellen Musterbildung in Korrosionssäumen eingereicht (Diplomarbeit von Lars Dohmen, Masterarbeit von Rene Denkler). Die Veröffentlichung soll in einer Sonderausgabe des *International Journal of Applied Glass Science* mit dem Titel *Glass Corrosion: Understanding Long Term Mechanisms* stattfinden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- (A): Glassynthese von größeren Mengen (je ca. 250 g) ist in Arbeit.
- (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) und Durchflusseexperimenten (E).
- (F): Es sollen nun Versuche im Labor mit Gläsern aus der Ju88 durchgeführt, um das Phänomen der Korrosionssaumbildung in Rissen im Labor zu verifizieren.
- (G): Wird nach Beendigung von (B-E) durchgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Manuskript: Dohmen L., Lenting C., Fonseca R., Nagel T., Heuser A., and Geisler T. (2013): Pattern Formation in Silicate Glass Corrosion Zones. Eingereicht zur Veröffentlichung im *International Journal of Applied Glass Science*.

|   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br>02 NUK 020A |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A            |   |  |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung   |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>550.191,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Denecke                  |  |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *Arbeitspaket A:*

Im Berichtszeitraum stand die Vernetzung mit dem BMBF geförderten Projekt 02NUK014A: Partitioning II Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente (durchgeführt vom Arbeitskreis von Prof. Gloe) im Vordergrund. Voruntersuchungen an dem vorgesehenen tripodalen Ligandensystem zeigten eine ungewöhnliche Fluoreszenz des La(III)-Komplexes. Nach Anwendung von Mikrowellen konnten Veränderungen im Komplex gezeigt werden, deren Ausmaße abhängig vom verwendeten Lösungsmittelsystem waren. Nach Zusatz von etwas D<sub>2</sub>O zu dem verwendeten deuterierten Acetonitril entsteht eine weitere Spezies, die als Konformation identifiziert wurde. Die beobachtete Fluoreszenz kann nur durch ein ungewöhnlich starkes Ligandenfeld (rote Emmission) gepaart mit einem Charge-Transfer-Prozess erfolgen, da das Grundsystem La(III) geschlossenschalig ist.

Die Koordination des Liganden soll über Stickstoffdonoren erfolgen, wodurch Untersuchungen an vergleichbaren Am-Komplexen analog zu den beschriebenen Am-Verschiebungen an BTP erfolgen sollten.

Der Am-243-Komplex wurde analog dem Ln(III)-Komplex am INE synthetisiert. Die NMR-spektroskopische Untersuchung des entstandenen Komplexes ergab eine einzige Verbindung in nur einer Konformation. Als Ersatz für die Mikrowellenbehandlung wurde Wärmebehandlung im NMR-Spektrometer bei 345 K gewählt. Nach kurzer Zeit bereits bilden sich neue Signalgruppen, die sich über Stunden hinweg zu den Hauptsignalen entwickeln. Mehrdimensionale Spektren legen nahe, dass die Aromaten dabei intakt bleiben, was für weitere Konformationen spricht. Untersuchung des Produktgemisches mit Diffusions-geordneter Spektroskopie legt jedoch eine Degradierung des Komplexes nahe. Die Untersuchung mittels  $^{15}\text{N}$ -NMR-Spektroskopie analog der BTP-Komplex-Untersuchung ergab keinen messbaren Kovalenzeffekt.

Es wurden weitere Untersuchungen an geeigneten Lanthaniden-Systemen vorgeschlagen, unter anderem Emissions- und TRLFS-Spektroskopie zur Aufklärung der Speziation mit dem verwendeten Ligandensystem sowie eine spektroskopische Beschreibung des ungewöhnlichen Fluoreszenzbefundes, um Verunreinigungen des verwendeten La(III)-Salzes mit Spuren von Eu(III) auszuschließen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen im Rahmen des Partnerprojektes berichtet werden.

Im vergangenen Berichtszeitraum wurden Fortschritte bei der Synthese des vollständig  $^{15}\text{N}$ -markierten *n*-Pr-BTP erzielt. Die Optimierung von Schlüsselschritten wird im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt. Besonders die Markierung des Pyridinstickstoffs ist dabei eine besondere Herausforderung. Die Synthesearbeiten sind Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam) und werden auch im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt.

*Arbeitspaket B:*

Die Untersuchungen zur Vervollständigung der Datenbasis der *n*-Pr-BTP-Komplexe in Actiniden und Lanthaniden wurden im vergangenen Berichtszeitraum fortgeführt. Die Messungen der Lanthanidenreihe wurde vervollständigt, die Interpretation der Daten sowie die Evaluation einer möglichen Übertragbarkeit der für Lanthaniden beschriebenen Methoden zur Quantifizierung von paramagnetischen Einflüssen werden auch im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt. Publikation der Ergebnisse der Lanthanidenreihe wird vorbereitet. Diese Arbeiten sind Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam).

*Arbeitspaket C: –*

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

*Arbeitspaket A:*

Die Arbeiten zur Etablierung einer Syntheseroute zur Darstellung vollständig  $^{15}\text{N}$ -isotopenmarkierter BTP-Liganden wird fortgesetzt.

*Arbeitspaket B:*

Die Vorbereitungen der angestrebten Zusammenarbeit mit Uni Strasbourg / F (Isabelle Billard) sind weit fortgeschritten. Erste Messungen sollten in der 2. Jahreshälfte stattfinden. Es wurden bereits Modellsysteme synthetisiert, die als Datenbasis für den bisher nur selten untersuchten  $^{99}\text{Tc}$ -Kern als NMR-Sonde dienen sollen.

*Arbeitspaket C: –*

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

M.W. Löble, P. Oña-Burgos, I. Fernández, C. Apostolidis, A. Morgenstern, O. Walter, F. Bruchertseifer, P. Kaden, T. Vitova, J. Rothe, K. Dardenne, N.L. Banik, A. Geist, M.A. Denecke, F. Breher, Exploring the solution behavior of f-element coordination compounds: a case study on some trivalent rare earth and plutonium complexes, *Chem. Sci.*, **2013**, in press, DOI: 10.1039/C3SC50708D

C. Adam, P. Kaden, B.B. Beele, U. Müllich, S. Trumm, A. Geist, P.J. Panak and M.A. Denecke, Evidence for covalence in a N-donor complex of americium(III), *Dalton Trans.*, **2013**, in press, DOI: 10.1039/C3DT50953B

P. Kaden, Studies on An-organic interactions at INE using NMR, CEA Saclay, DPC-INE Exchange meeting, 13.-14.06.2013, Saclay, France

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12,<br>76131 Karlsruhe  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 020B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>838.422,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Roesky             |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Um zu einem grundlegenden Verständnis des Abtrennprozesses für Actiniden durch Flüssig-Flüssig-Extraktion auf molekularer Basis zu gelangen, werden systematische synthetische Ansätze verfolgt und innovative spektroskopische und röntgenographische Techniken eingesetzt, die die Charakterisierung der elektronischen und molekularen Strukturen der extrahierten Komplexe ermöglichen und damit Information über die Metall-Ligand-Bindungsverhältnisse liefern. Zusätzlich werden thermodynamische und kinetische Daten bestimmt. Vergleichende Studien der Actiniden- und Lanthaniden-Komplexe ermöglichen es, die Triebkräfte der Selektivität effizienter komplexbildender Liganden zu verstehen. Diese Information kann gezielt angewendet werden, um verbesserte Extraktionsmittel zu entwickeln. Die im Berichtszeitraum erzielten Ergebnisse wurden in direkter Kooperation mit der Uni HD (P. Panak) und dem KIT-INE (H. Geckeis, M. Denecke, A. Geist) erhalten; siehe die entsprechenden Halbjahresberichte.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

- Synthese von f-Elementen mit den N-Donor-Liganden
- Charakterisierung der Komplexe, insbesondere per Einkristallröntgenstrukturanalyse
- Synthese von O- bzw. S-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

Im Berichtszeitraum wurden Stickstoffliganden der Pyridinklasse dargestellt und charakterisiert. Mit diesen Liganden wurden die entsprechenden Samariumkomplexe dargestellt und mittels spektroskopischer Methoden charakterisiert (XRD, IR, NMR, EXAFS).

Weiterhin wurde mit der Synthese von Organodithiophosphinsäuren begonnen. Das Ligandensystem [SP{N(CH<sub>3</sub>)NC(H)py}<sub>3</sub>] aus dem Vorgängerprojekt wurde weiter variiert, und erste Untersuchungen zum Koordinationsverhalten der Derivate wurden durchgeführt.

Zur Untersuchung von Extraktionsliganden die neben den N-Donor- auch S-Donorstellen aufweisen, wird in diesem Projekt eine Kombination aus einem bereits bekannten N-Donorliganden und einer Thio-, bzw. Dithiophosphinsäure angestrebt. Hierzu wurde der Hybridligand Tpm<sup>(Pi-Pr2)</sup> erfolgreich mit Schwefel zu Tpm<sup>(P(S)i-Pr2)</sup> umgesetzt und vollständig charakterisiert. Die Festkörperstrukturen von Tpm<sup>(PBu2)</sup> und Tpm<sup>(P(S)i-Pr2)</sup> wurden mittels Einkristallröntgenstrukturanalyse bestimmt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Aufgrund der Löslichkeitsprobleme des bereits dargestellten 6-Tetrazol-5-yl-2,2'-bipyridins (HN4bipy) und des 6-(3-Methyl-1,2,4-triazol-5-yl)-2,2'-bipyridin (Hmtzbp) sollen *tert*-Butylsubstituenten in 4-Position des 2,2'-Bipyridinrückgrat eingeführt werden. Die Synthesen gehen von 4,4'-Di-*tert*-butyl-2,2'-bipyridin aus und erfolgen über insgesamt drei Stufen. Des Weiteren sollen 2,6-Bis(1,2,3-Triazol-5-yl)pyridine dargestellt und als Liganden für die Lanthanoide eingesetzt werden.

Da die Darstellung 2,2'-bipyrid-6-yl-funktionalisierten Organodithiophosphinsäuren nicht erfolgreich war, sollen nun alternativ 2-picolyl-funktionalisierten Organodithiophosphinsäuren synthetisiert werden.

Die Derivatisierung des Stammsystems **3** mit weiteren stickstoffreichen Aldehyden soll fortgeführt werden, um anschließend die Komplexbildungseigenschaften der verschiedenen Liganden in Bezug auf Lanthanoidtriflate zu untersuchen. Darüber hinaus soll die Synthese der Verbindungen des Typs Tpm<sup>(P(S)R2)</sup> optimiert werden (bisher nur 50 % Umsatz) und anschließend die Koordinationseigenschaften der Verbindungen bezüglich dreiwertiger Lanthanoidsalze untersucht werden. Die Synthese der Dithiophosphinsäurederivate Tpm<sup>(P(S)(SH)R)</sup> soll fortgeführt und erste *f*-Element-Komplexen dieser Liganden dargestellt werden. Weiterhin ist die Synthese von weitere *O*- bzw. *S*-Donor-Liganden in Planung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

M. W. Löble, P. Oña-Burgos, I. Fernández, C. Apostolidis, A. Morgenstern, O. Walter, F. Bruchertseifer, P. Kaden, T. Vitova, J. Rothe, K. Dardenne, N. L. Banik, A. Geist, M. A. De-necké and F. Breher: *Exploring the Solution Behavior of f-Element Coordination Compounds: A Case Study on some Trivalent Rare Earth and Plutonium Complexes*, *Chem. Sci.* **2013**, Advance Article (DOI: 10.1039/C3SC50708D, Edge Article)

P. W. Roesky: *Lanthanide borohydrides and related compounds: Polymerization catalysis and small molecule activation*. *Abstract of Papers*, 245<sup>th</sup> National Meeting of the American Chemical Society, New Orleans, LA, **2013**, CATL 100.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz<br>4, 91054 Erlangen  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 020C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>442.080,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Meyer              |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des BMBF-Projektes wurden bisher in der AG Meyer alkyl-substituierte N,O-Liganden mit verschiedenen Ankersystemen und daraus hervorgegangene Urankomplexe synthetisiert, deren sterische Abschirmung, elektronische Struktur und Löslichkeitsverhalten durch unterschiedliche *ortho*- und *para*-Substituenten determiniert wurden. Ein Teil dieser Arbeiten konnte in diesem Berichtszeitraum publiziert werden (*Eur. J. Inorg. Chem.* **2013**, 2538–2548).

In einem Übersichtsartikel (*Inorg. Chem.* **2013**, 52, 529–539) wurden neueste theoretische, experimentelle und synthetische Ergebnisse in der Actinoidchemie zu dem *Inverse Trans Influence* (ITI) vorgestellt. Im Gegensatz zu dem *trans*-Effekt bei Übergangsmetallkomplexen wird die M–X<sub>trans</sub>-Bindung in Urankomplexen im Vergleich zu der M–X<sub>cis</sub>-Bindung gestärkt und somit verkürzt. Die in dem Review zusammengefasste Literatur, zusammen mit unseren Arbeiten über Uran(V/VI)-Oxo und Imidokomplexe zu diesem Thema, ermöglichen eine aktuelle Übersicht zu dem ITI und liefern darüber hinaus Designparameter für die Synthese und Charakterisierung hochvalenter Uran–Ligand-Mehrfachbindungen.

Ausgehend von dem N-geankerten N,O-Ligandensystem sind chalcogenidverbrückte Komplexe [ $\{((\text{Ad}, \text{MeArO})_3\text{N})\text{U}\}_2(\mu\text{-E})$ ] (E = S, Se) zugänglich. Diese konnten nun mit elementarem Schwefel und Selen weiter umgesetzt werden. Die dabei enthaltenen Chalcogenidcluster-verbundenen Urankomplexe konnten zweifelsfrei mittels verschiedener spektroskopischer Methoden charakterisiert werden. Des Weiteren konnte eine Serie unterschiedlicher, pyridin-substituierter N,N-Liganden vervollständigt und diese zu Komplexierungsstudien niederwertiger Uranspezies herangezogen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

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

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Der Vortrag mit dem Titel *From Nuclear Fuels to CO<sub>2</sub> Activation at Uranium Complexes – Chemistry Between Phobia & Enthusiasm* wurde von Prof. Karsten Meyer zu GDCh- und Plenarvorträgen sowie in Anorganisch-Chemischen-Kolloquien gegeben:

- GdCh-Vortrag, TU Dortmund, Dortmund, DE, Januar 2013
- Inorganic Seminars, UC Irvine, UC Los Angeles, Caltech, USA, Februar 2013
- Anorganisches Seminar, Universität Zürich, Zürich, CH, Mai 2013
- GdCh-Vortrag, FU Berlin, Berlin, DE, Juni 2013
- Plenarvortrag, Heidelberger Forum Molecular Catalysis, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Heidelberg, DE, Juni 2013

Der Vortrag mit dem Titel *Activation of CO<sub>2</sub> with a molecularly engineered ligand system at Uranium* wurde von Dipl.-Chem. Anna-Corina Schmidt gegeben:

- EUFEN 2, Bewleys Airport Hotel Dublin, Dublin, IE, 22.04.–25.04.2013
- Forschungsaufenthalt bei Prof. Geoff Cloke, University of Sussex, Chichester, GB, 21.04.2013 – 18.05.2013

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2,<br>69117 Heidelberg   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 020D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>353.376,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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:

Die Bestimmung der Komplexierungseigenschaften von N-Donor Liganden an trivalente Actinide und Lanthanide kann auf Grund von unterschiedlichen Löslichkeitseigenschaften nicht für alle Systeme in demselben Lösungsmittelgemisch stattfinden. In Vorversuchen hat sich jedoch gezeigt, dass das Lösungsmittel und der Wassergehalt eines Lösungsmittelgemisches einen sehr starken Einfluss auf die Stabilitätskonstanten der gebildeten Komplexe haben. Um das Komplexierungsverhalten unterschiedlicher Liganden miteinander vergleichen zu können, ist es von besonderem Interesse, den Einfluss des Lösungsmittels genau zu kennen. In ersten Experimenten in Methanol-Wasser-Gemischen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen wurde der Einfluss des Wassergehalts auf die Komplexierung von Cm(III) mit <sup>99</sup>Pr-BTP bestimmt. <sup>99</sup>Pr-BTP wurde als Ligand gewählt, da er auch bei hohem Wasseranteil eine gute Löslichkeit zeigt, eine schnelle Komplexierungskinetik aufweist und die für den entstehende 1:3-Komplex in MeOH:H<sub>2</sub>O 1:1 literaturbekannte Stabilitätskonstante sehr hoch ist ( $\log \beta_3 = 14.4$ ; S. Trumm et al., *Eur. J. Inorg. Chem.*

2010). Die Bestimmung der Stabilitätskonstanten des Cm(III)-<sup>n</sup>Pr-BTP 1:3 Komplexes wurde mittels zeit-aufgelöster Laserfluoreszenzspektroskopie (TRLFS) vorgenommen.

In einem ersten Titrationsexperiment konnte die in der Literatur angegebene konditionelle Stabilitätskonstante reproduziert werden. In TRLFS-Experimenten mit variierendem Wassergehalt im Lösungsmittelgemisch MeOH:H<sub>2</sub>O wurde mit abnehmendem Wasseranteil eine steigende Stabilitätskonstante des 1:3-Komplexes ermittelt. Bereits bei einer Reduktion des Wasseranteils von 50 Vol. % auf 20 Vol. % erhöht sich die Stabilitätskonstante um fast eine Größenordnung (von  $\log \beta_3 = 14.4$  auf  $\log \beta_3 = 15.2$ ). Wird der Wasseranteil weiter reduziert, steigt dieser Wert um weitere Größenordnungen an. Der Einfluss des Lösungsmittels auf die Stabilitätskonstanten insbesondere bei Lösungsmittelgemischen mit niedrigem Wassergehalt ist zurzeit in Untersuchung. Diese Studien sollen im Weiteren fortgeführt und vertieft werden.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Untersuchung der Lösungsmittelabhängigkeit der konditionellen Stabilitätskonstante von Cm(<sup>n</sup>Pr-BTP)<sub>3</sub> soll auf Lösungsmittelgemische mit sehr geringem Wasseranteil ( $\leq 5$  Vol. %) ausgedehnt werden. Des Weiteren ist geplant eine vergleichbare Experimentserie mit anderen Alkoholen (Ethanol, Isopropanol) durchzuführen.

Anhand der Komplexierung von Eu(III) mit <sup>n</sup>Pr-BTP soll überprüft werden, ob die Komplexierung von Lanthaniden in ähnlichem Maße von der Zusammensetzung des Lösungsmittels beeinflusst wird.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

##### *Publikationen:*

B. B. Beele, E. Rüdiger, F. Schwörer, U. Müllich, A. Geist, P. J. Panak, TRLFS Study on the Complexation of novel BTP Type Ligands with Cm(III), Dalton Trans. 2013, DOI: 10.1039/C3DT50536G.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) with 2,6-bis(5-(2,2-dimethylpropyl)-1H-pyrazol-3-yl)pyridine and 2-bromohexanoic acid studied by Time-Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy, Radiochim. Acta 2013, 101, 285–291.

C. Adam, P. Kaden, B. B. Beele, U. Müllich, S. Trumm, A. Geist, P. J. Panak, M. A. Denecke, Evidence of covalence in N-donor complex of Americium(III), Dalton Trans. 2013, DOI: 10.1039/C3DT50953B.

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., accepted.

##### *Vorträge:*

B. B. Beele, Complexation and Separation Performance of N- and O-donor ligands used in Actinide Separation, Seminarvortrag Tschechische Technische Universität, 10.05.2013, Prag, Tschechische Republik.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Selective complexation of f-elements – Partitioning & Transmutation, 1. Projektstatusgespräch zur BMBF-geförderten Nuklearen Sicherheitsforschung, 06.-07.03. 2013, Karlsruhe. Eingeladener Vortrag

A. Bremer, D. Whittaker, A. Geist, P. J. Panak, Complexation of Cm(III) and Eu(III) with CyMe4-BTBP and CyMe4-BTPPhen studied by time resolved laser fluorescence spectroscopy, EUFEN 2 (European F-Element Network), 15.-18.04.2013, Dublin, Irland.

P. J. Panak, Time-resolved Laser Fluorescence Spectroscopy – A Valuable Tool for Actinide Speciation, Seminarvortrag Tschechische Technische Universität, 10.05.2013, Prag, Tschechische Republik. Eingeladener Vortrag

P. J. Panak, Spectroscopic characterization of actinides, 2013 Summer School on Actinide Science & Applications, 17.07.2013, Karlsruhe. Eingeladener Vortrag

##### *Poster:*

B. B. Beele, A. Wilden, A. Skerencak-Frech, S. Lange, F. Sadowski, G. Modolo, A. Geist, P. J. Panak, TRLFS Study on the Complexation of Cm(III) and Eu(III) with methyl-substituted Diglycolamides, Actinides 2013, 21.-26.07.2013, Karlsruhe.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, Influence of the solvent on the complexation of Cm(III) with nPr-BTP studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy, Actinides 2013, 21.-26.07.2013, Karlsruhe.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str.,<br>52428 Jülich   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 020E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.07.2012 bis 30.06.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>529.746,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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

In der in Jülich installierten 16-stufigen Zentrifugalkontaktoranlage wurde erfolgreich ein „innovative-SANEX“ Prozess im Labormaßstab demonstriert. Dabei konnten erfolgreich Am(III) und Cm(III) mit hoher Reinheit und Wiederfindungsrate (>99,8 %) aus einer simulierten Spaltproduktlösung abgetrennt werden. Ein maßgeblicher Schritt in diesem Prozess war die selektive Rückextraktion der dreiwertigen Actinide mit Hilfe des hochselektiven Komplexbildners SO<sub>3</sub>-Ph-BTP, der im Rahmen dieses Projekts am KIT-INE untersucht wurde. Die Ergebnisse des Tests deckten sich hervorragend mit zuvor aus Einzelversuchen berechneten Daten.

Bei den in Zusammenarbeit mit Isabelle Billard am CNRS Straßburg fortgeführten Untersuchungen zur Extraktion von Am(III) und Eu(III) in ionischer Flüssigkeit wurden Einkristalle des Extraktionsmittels CyMe<sub>4</sub>BTPPhen mit der ionischen Flüssigkeit erhalten, die einkristalldiffraktometrisch untersucht wurden. In den Kristallen arrangiert sich das Kation der ionischen Flüssigkeit in die für die Komplexierung der Metallkationen vorgesehene Tasche des Liganden CyMe<sub>4</sub>BTPPhen. Eine solche Kristallisation konnte nach dem Kontakt mit wässrigen Lösungen nicht beobachtet werden. Die Arbeiten zur Aufklärung des Extraktionsmechanismus in ionischen Flüssigkeiten wurden fortgesetzt. Zur abschließenden Klärung sind allerdings noch weitere Untersuchungen notwendig.

Zur tiefergehenden Aufklärung des Extraktionsmechanismus mit Dithiophosphinsäuren in FS-13 wurde ein weiterer Forschungsaufenthalt in Karlsruhe realisiert, bei dem die Ligandenkonzentration und der pH-Wert variiert wurden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Eine weitere Prozessdemonstration mit dem Extraktionsmittel C5-BPP soll die Eignung dieses Liganden zur Trennung der dreiwertigen Actinide von den Lanthaniden unter Beweis stellen. Dazu werden kinetische Untersuchungen durchgeführt und in Kooperation mit KIT-INE ein Prozess-Flussschema entwickelt.

Die Arbeiten in Kooperation mit Isabelle Billard am CNRS Straßburg zur Aufklärung des Extraktionsmechanismus von Am(III) und Eu(III) in CyMe<sub>4</sub>BTPPhen/IL werden fortgesetzt. Dabei wird die Säureabhängigkeit der Verteilungsverhältnisse sowie die Nitratabhängigkeit bestimmt und Steigungsanalysen in den beiden signifikanten Regimen der Extraktionskurve durchgeführt.

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

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

G. Modolo, A. Wilden, et al., *Radiochim. Acta* (2013) Vol. 101, Issue 3, pp. 155-162

A. Wilden, G. Modolo, et al., *Solvent Extr. Ion Exch.*, DOI:10.1080/07366299.2013.775890

G. Modolo, A. Wilden, et al., *Prog. Nucl. Energ.*, accepted.

A. Wilden, G. Modolo, et al., *Actinides 2013*, 21.-26.07.2013, Karlsruhe, Germany, Vortrag.

B. B. Beele, A. Wilden, et al., *Actinides 2013*, 21.-26.07.2013, Karlsruhe, Germany, Poster.

A. Wilden, 1. Projektstatusgespräch zur BMBF-geförderten Nuklearen Sicherheitsforschung, Karlsruhe, Germany, 06.-07.03.2013, Vortrag.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str.,<br>52428 Jülich   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>919.706,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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: 1.)  $\text{LnPO}_4$ -Endglieder (Ln= La-Gd) und Mischkristalle (Ln=La/Eu, La/Gd, Sm/Tb) mittels Hydrothermalsynthese und Präzipitation. 2.)  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Mischkristallreihe mit variierendem Nd/Zr-Verhältnis. 3.) Thorium-Arsenat- Einkristalle.  
Materialtransfer: Ausgewählte Materialien für Messungen am GUF-IFG wurden hergestellt und geliefert. Um größere Mengen für Messungen am RWTH-GHI herzustellen, wurde die Co-Präzipitationsroute ausgewählt und optimiert.
- AP2: XRD-Messungen an Phosphatpulvern wurden durchgeführt und Rietveld-verfeinerungen begonnen.  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Mischkristallreihe liegt einphasig im Bereich von 11,7-18,1 mol %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (Defekt-Fluorit-Struktur) und 20,5-36,9 mol %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (Pyrochlorstruktur) vor. Die Gitterparameter verlaufen innerhalb der einphasigen Bereiche linear entsprechend der Ver-

gard'schen Regel. Innerhalb der Mischungslücke und oberhalb von 26,9 mol %  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  sind zwei Phasen mit XRD nachgewiesen worden. Raman-Messungen wurden an den reinen  $\text{LnPO}_4$ -Endgliedern und einer  $(\text{La},\text{Eu})\text{PO}_4$ -Mischkristallreihe durchgeführt. REM/EDX-Messungen an Pellets wurden durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung entspricht im Rahmen der Fehlergrenzen der erwarteten. Charakterisierung Pu-haltiger Pyrochlore mit XRD und REM/EDX. Die REM/EDX-Aufnahmen zeigen eine homogene Pu-Verteilung. Die Diffraktogramme zeigen eine Verschiebung der Reflexe, was auf einen Einbau von Pu in die Kristallstruktur hindeutet.

Über verschiedene DFT-Methoden wird versucht, Lanthanid- und Actinidhaltige Materialien bezüglich der elektronischen, strukturellen und thermodynamischen Eigenschaften abzuschätzen.

AP3: werden vorbereitet.

AP4: Reproduzierbares Verfahren zur Herstellung (Kaltpressen/Sintern; Heißpressen) mit von Pellets mit einer Sinterdichte von 98 % (T.D.) wurde etabliert. Die mechanischen Eigenschaften (Vicker's Härte, Bruchzähigkeit) einiger Phosphat-Mischkristallreihen wurden bestimmt. Die Untersuchungen thermischer Eigenschaften wurden begonnen.

AP5: Auflösungsexperimente wurden an Mischkristallreihen der  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Mischkristallreihe in Abhängigkeit von der Säurestärke ( $c_{(\text{HCl})} = 0,01; 0,1 \text{ mol/L}$ ) und der Temperatur ( $T = 70, 90, 110 \text{ }^\circ\text{C}$  (nur Pyrochlore)) durchgeführt. Die Mischkristalle zeigen ein inkongruentes initiales Auflösungsverhalten (bevorzugte Nd-Freisetzung). Die finalen Auflösungsraten sind jedoch kongruent innerhalb der Fehlergrenzen. Die Auflösungsraten verhalten sich proportional zur Temperatur (steigend) und zur Säurestärke des Auflösungsmediums (steigend).

AP6: -.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Die Synthesen der Mischkristallreihen werden fortgesetzt. Die Syntheserouten werden in Bezug auf die Herstellung von Mischkristallen unterschiedlicher Morphologie und Mikrostruktur optimiert. Synthesen von Hafnaten und Thorium-Phosphat Einkristallen werden vorbereitet. Die ersten Materialien für RWTH-GHI werden geliefert. Die Zusammensetzungen für Messungen am GUF-IFG werden auf die jeweiligen Versuche angepasst und synthetisiert.

AP2: Charakterisierung (XRD, REM/EDX, Raman) wird fortgesetzt. EXAFS-Messungen (HZDR-IRO) werden im Juli durchgeführt. EXAFS Messungen sind an Pu-haltigen Pyrochloren an ANKA-KIT vorgesehen (Proben sind bereits für den Transport vorbereitet). Die Messzeit wurde bereits bevor Projektbewilligung beantragt und wird deshalb nicht an der ESRF durchgeführt. Alle weiteren EXAFS-Messungen werden mit dem Projektpartner HZDR-IRO geplant.

Die Thorium-haltigen Arsenateinkristalle wurden mit dem aus Projektmitteln finanzierten Einkristalldiffraktometer charakterisiert. Es sind neue, bisher unveröffentlichte Kristallstrukturen gefunden worden und werden in Kürze veröffentlicht.

Fortsetzung der Modellierung und Erweiterung auf DFT-U (Hubbard U) Methoden.

AP3: Bestrahlungsversuche werden vorbereitet.

AP4: Die Bestimmung der thermischen und mechanischen Eigenschaften der Matrices wird fortgesetzt. In-situ REM Messungen zur Untersuchung des Sinterverhaltens und Dilatometrie sind geplant. Bestimmung der Oberfläche erfolgt mit BET.

AP5: Statische und dynamische Auflösungsexperimente werden an den Mischkristallreihen durchgeführt.

AP6: Ergebnisse werden auf verschiedenen Konferenzen präsentiert und zur Veröffentlichung eingereicht.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag auf der E-MRS in Strassbourg von Fr. Yulia Arinicheva.

Posterbeitrag von Fr. Julia Heuser ebenfalls auf der E-MRS in Strassbourg (ausgezeichnet mit dem dritten Posterpreis).

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>394.874,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Repräzitationsprozesse 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 AP-2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):

- Literaturstudie zu Pyrochlorphasen beendet.
- Entwicklung eines EXAFS-Fit-Modells zum simultanen Fit an zwei Element-Kanten in Pyrochlorphasen. Test des Modells an einem K-gedopten Co-Titanat mit Pyrochlorstruktur. Die Ergebnisse zeigen keinen Einfluss des K-Dopings auf die lokale Struktur in der Umgebung der Co- und Ti-Atome. Erarbeitung einer Publikation dazu.
- Vorbereitung der ersten XAFS-Messungen im System Lanthan-Europium-Phosphat mit Monazit-Struktur (Yulia Arinicheva und Stefan Neumeier, FZ-Jülich).
- Bestellung eines 4-Element-Si-DRIFT-Detektors.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung des Programmpaketes AP-2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):

- Durchführung der ersten XAFS-Messungen im System Lanthan-Europium-Phosphat mit Monazit-Struktur an den Ln-LIII und Eu-LIII-Kanten (3.-7.07.2013, Yulia Arinicheva und Stefan Neumeier, FZ-Jülich). Auswertung der EXAFS-Spektren simultan an beiden Absorptionskanten (Ln-LIII und Eu-LIII).
- Vorbereitung und Durchführung der ersten XAFS-Messungen an Iodit- und Iodat-gedopten Apatit-Phasen (Natalya Torapava, Univ. Hannover).
- Inbetriebnahme eines 4-Element-Si-DRIFT-Detektors.

### 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, Eingereicht bei: Sensors & Actuators: B. Chemical, Reviews empfehlen Akzeptanz nach „minor revision“

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen                          |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>322.755,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Immobilisierungsmatrizes

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. Dem Projektträger wurde bereits mitgeteilt, dass das Teilprojekt vom KIT-INE an das HZDR-IRE übertragen werden soll. Die zuständigen Stellen in Karlsruhe und in Rossendorf sind bereits informiert und unterstützen den Vorgang. Ab dem 1. Oktober 2013 wird das Arbeitsprogramm von einer Mitarbeiterin in Rossendorf bearbeitet. Wir bitten daher um eine kostenneutrale Verlängerung des Teilprojekts.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Einarbeiten in die Literatur.

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

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp-<br>lergraben 55, 52062 Aachen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langle-<br>biger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>336.612,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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

Es wurden zwei kommerzielle Materialien ( $\text{CePO}_4$  und  $\text{LaPO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ) mittels DTA-Tg, Röntgendiffraktion und REM charakterisiert. Jeweils ein Teil des Pulvers wurde kalziniert und erneut untersucht. Am RWTH-IFK wurden Vergleichsmessungen mittels DTA-Tg vorgenommen, um die kommerziellen Pulver hinsichtlich ihres Rhabdophanzerfalls und möglicher Verunreinigungen sowie weiterer Phasen zu ergründen. Die Ergebnisse wurden auch mit dem FZJ-IEK6 diskutiert. Aus diesen verschiedenen Pulvern sowie einem  $\text{LaPO}_4$ -Pulver, das vom IFK synthetisiert worden war, wurden Pellets gepresst. Diese wurden bei unterschiedlichen Temperaturen und Haltezeiten gesintert (AP4.1). Anschließend wurden sie hinsichtlich ihrer Dichte charakterisiert und in Kooperation mit FZJ-IEK6 wurden Bruchflächen ausgewählter Proben auf ihre Gefüge im REM untersucht (AP4.6). Darüber hinaus wurden sie mittels XRD untersucht. Die Proben wiesen trotz guter Ausgangsgründichte eine unzureichende Verdichtung im Sintern auf, was auf Verunreinigungen sowie nicht erwünschte Phasen zurückzuführen sein könnte. Im Falle der  $\text{LaPO}_4$ -Probe bildeten sich typischerweise dichte und weniger dichte Regionen aus, die Probe aus  $\text{CePO}_4$  wies große Poren auf, die möglicherweise durch einen Überschuss an Phosphor entstanden waren.

Für das IFK (Teilprojekt E) wurden  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Tiegel für die Probensynthese zur Verfügung gestellt. Bei gegenseitigen Besuchen wurden zukünftige Zusammenarbeitsstrategien konkretisiert. Zur Qualifikationserweiterung konnte eine Mitarbeiterin (A. Thust) des GUF-IFG im April am Grundpraktikum Keramik am GHI teilnehmen. Bei der Gelegenheit wurde auch eine Zusammenarbeit diskutiert. Das erste Verbundprojekttreffen im Februar konnte zum intensiven Austausch mit vereinbarten und neuen Kooperationspartnern genutzt werden. Darüber hinaus wurde der Beitrag des GHI zum Verbundprojekt in einem Vortrag beim Projektstatusgespräch im März vorgestellt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die vorhandenen Pulver sowie weiteres Pulver (Lanthan-Praseodymolphosphat) aus dem IFK sollen feiner aufgemahlen werden, um anschließend weitere Versuche zum drucklosen Sinterprozess (AP4.1) durchzuführen mit dem Ziel eine höhere Enddichte zu erreichen. Hierbei sollen neben Sintertemperaturen und Haltezeiten auch die Heizraten variiert werden und der Einfluss auf Dichte und Gefüge herausgestellt werden. Zur Untersuchung des Sinterfortschritts sollen Proben mittels Dilatometrie am IEK6 untersucht werden. Sobald Pulver durch den Projektpartner IEK6 hergestellt worden sind, werden diese ebenfalls für Sinterversuche verwendet. Erste dichte Proben sollen an das IFG zur weiteren Untersuchung mittels PPMS, Dilatometrie und Ultraschallmessungen gesendet werden.

Das zweite Verbundprojekttreffen im August soll für einen direkten Austausch sowie Diskussion der bisherigen Ergebnisse und Konkretisierung der weiteren Vorgehensweise genutzt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp-<br>lergraben 55, 52062 Aachen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langle-<br>biger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>223.380,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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

Es wurde eine Mischkristallreihe der Monazitzusammensetzung  $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$  erfolgreich in 11 Pulverproben synthetisiert (AP1) und mittels Röntgendiffraktion charakterisiert (AP2). Es wurden weiterhin Synthesansätze des Endgliedes  $\text{LaPO}_4$  bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht sowie einerseits Hochtemperaturröntgenbeugungsversuche an  $\text{LaPO}_4$  durchgeführt und  $\text{LaPO}_4$ -Einkristalle mittels Fluxzüchtung hergestellt und charakterisiert. Des Weiteren wurde mit der Synthese und röntgenographischen Charakterisierung einer Mischkristallreihe der Zusammensetzung  $\text{La}_x\text{Sr}_{1-0.5x}\text{Ce}_{1-0.5x}\text{PO}_4$  begonnen.

Im ersten Verbundprojekttreffen im Februar wurden bereits vereinbarte Kooperationen intensiviert und konkretisiert. Im Berichtszeitraum wurden für das Forschungszentrum Jülich (Teilprojekt A) und das RWTH-GHI (Teilprojekt D) DTA-Untersuchungen an  $\text{SmPO}_4$ ,  $\text{LaPO}_4$  und  $\text{CePO}_4$  hinsichtlich des Rhabdophanzerfalls durchgeführt. Weiterhin wurde für das GHI  $\text{LaPO}_4$  für Schrumpfungskarakterisierung und Sinterung hergestellt, vom GHI wurden für das IfK Korundtiegel für die Probensynthese gefertigt. Für die Goethe-Universität Frankfurt am Main (Teilprojekt F) wurden  $\text{LaPO}_4$ -Einkristalle für weitere Charakterisierungsmethoden (z. B. Raman-Spektroskopie) bereitgestellt. Bei gegenseitigen Besuchen der genannten Partner wurden zukünftige Zusammenarbeitsstrategien entworfen.

Das AP5 wird in Kooperation mit dem Forschungszentrum Jülich bezüglich des Austauschs von Proben für Korrosionsversuche und die anschließende Untersuchung der Produkte derzeit vorbereitet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im weiteren Verlauf wird die Mischkristallreihe  $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$  mit Hilfe von DTA/DSC-Untersuchungen am IfK hinsichtlich der Thermodynamik analysiert (AP4). Außerdem sollen Mikrosondenuntersuchungen (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel) sowie IR- (Forschungszentrum Jülich) und Ramanspektroskopiemessungen (Goethe-Universität Frankfurt am Main) durchgeführt werden, die als komplementäre Ergänzung zu den DTA/DSC-Messungen und zur Bestimmung der thermodynamischen und physikalischen Eigenschaften dienen (AP4). Weiterhin sollen zusätzliche Einkristalle dieser Mischreihe synthetisiert werden.

In einem weiteren Schritt soll Tb in  $\text{LaPO}_4$  und  $\text{PrPO}_4$  eingebaut werden, um die Stabilität des Monazits zu untersuchen.

Im zweiten, im August angesetzten Verbundprojekttreffen sollen die bestehenden Kooperationen ausgeweitet und neue innerhalb des Verbundes ausgearbeitet werden. Des Weiteren soll mit einer Publikation in Verbindung mit der Goethe-Universität Frankfurt am Main und dem RWTH-GHI begonnen werden.

Für den im Zuge der Investitionsmittel beantragten Ofen für die Fluxsynthese wurden Angebote eingeholt und die Beschaffung steht unmittelbar bevor.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Abstract und Präsentation für die EMRS-Tagung in Straßburg im Mai dieses Jahres.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>238.092,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Mikrokolorimetrie, (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 Mikrokolorimeter bestimmt.

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



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

Nach der Einstellung von Frau Anja Thust wurden seit dem 01.02.2013 die Kooperationen mit den übrigen Projektpartnern intensiviert. Von den Projektpartnern aus Jülich wurden Keramik-Proben (Lanthan-Europiumphosphate verschiedenster Zusammensetzungen) zur Verfügung gestellt. Die an diesen Proben durchgeführten Ultraschallmessungen zeigten aber überraschenderweise und im Gegensatz zu den vorangegangenen Messungen bisher keine auswertbaren Signale. Ob es sich hierbei um ein technisches Problem handelt oder es an der Probenherstellung liegt wird derzeit geklärt. Des Weiteren wurden seit Mai PPMS Messungen an den Keramiken vorgenommen. Bisher wurden sieben Mischkristalle und ein Endglied charakterisiert. Unsere Ergebnisse zeigen, dass in der Literatur veröffentlichte Daten zum Teil falsch sind. Ob es signifikante thermodynamische Exzeßgrößen gibt wird durch zurzeit laufende Messungen geklärt. Wie geplant wurde mit Dilatometrie-Messungen begonnen, um den Einfluß von unterschiedlichen Herstellungsverfahren auf die Mikrostruktur zu charakterisieren. Hier erwarten wir noch eine heißgesinterte Probe zu Vergleichszwecken. Um ein besseres Verständnis der Arbeiten bei den Projektpartnern zu erhalten, hat Frau Thust im April an einem Praktikum an der RWTH-Aachen, Institut für Gesteinshüttenkunde, zu Mineralischen Werkstoffen – Keramiken und Glas teilgenommen (vermittelt durch A. Wätjen). Die DFT-Rechnungen zur Elektronendichte in Monaziten sind für  $\text{CePO}_4$  und  $\text{LaPO}_4$  beendet.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Arbeiten werden wie geplant weiter durchgeführt. Im Juli wird Frau Thust an der Summer School on Actinide Science and Application in Karlsruhe teilnehmen, um sich noch weiter in das Thema einzuarbeiten. Ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt der nächsten Monate wird die Durchführung der Ultraschallmessungen sein. Hier wird zurzeit geklärt, warum in den neuen Proben die Schallwellen gedämpft werden. Die PPMS-Messreihe an den Lanthan-Europium-Phosphaten wird in den nächsten Monaten beendet. Die geplanten Neutronen-Kleinwinkel-Streuexperimente in Los Alamos können nach der Wiederinbetriebnahme der Einrichtung im August 2013 nun doch stattfinden. Die Messungen werden im Oktober durchgeführt. Sobald die Lanthan-Praseodymphosphat-Keramiken durch die Projektpartner hergestellt worden sind werden diese wie geplant durch PPMS, Dilatometrie und Ultraschallmessungen untersucht. DFT-basierte Rechnungen zu  $\text{EuPO}_4$ -Monazit werden in den nächsten Wochen beendet. Raman-spektroskopische Messungen werden ebenfalls im 2. Halbjahr 2013 durchgeführt.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 021G</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2012 bis 30.09.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>231.108,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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

Zur Problematik des Iod Einbaus in verschiedene Matrizen wurde eine detaillierte Literatürübersicht erarbeitet [1-25]. Es wurde gezeigt, dass Iod nicht ohne weiteres in Apatit eingebaut wird, jedoch existieren zwei Arbeiten die den Einbau von Iodid bzw. Iodat demonstrieren [9-10]. Die Ergebnisse sind jedoch nicht eindeutig und die Jodid Aufnahme bei der Apatit Synthese in [9] konnte später nicht bestätigt werden [19]. Dies erfordert eine Klärung. Die Schwierigkeit des Iod Einbaus beruht auf dem im Vgl. zu anderen Halogenen großen Ionenradius.

Laborarbeit: Fünfzehn verschiedene Synthesen wurden durchgeführt, um optimale Bedingungen der Jod Aufnahme zu finden. Die Proben (Pulver-Form), wurden mit Röntgen Pulverdiffraktometrie, XRD und Rasterelektronenmikroskopie, REM, analysiert. Aliquote von den ersten Filtraten wurden mit Ionenchromatographie, IC, gemessen, um die überschüssige Iod-Konzentration in Lösung, während Apatit-Synthese zu bestimmen

Während eines Messaufenthaltes am FZJ wurden thermogravimetrischen Analysen, TGA durchgeführt und die Herstellung heißer Pellets. Die Durchführung weiterer Arbeiten wurde geplant.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Das nächste Projekttreffen, das vom 15. - 16. August im Mercure Hotel in Hanover stattfinden soll wird geplant und organisiert.

Synthese von Iodid und Iodat hatigen LDH Phasen (layered double hydroxide) wird bei Raumtemperatur durchgeführt und mit XRD charakterisiert. Ferner werden Analysen sowohl der Apatite als auch der LDH Phasen mit einer Mikrosonde durchgeführt. Dies erlaubt die quantitative Analyse der Festphasen. Auslaugungsexperimente an den Apatit Matrizen werden sowohl mit stabilem Iod als auch ggf. zur Steigerung der Sensitivität mit I-125 durchgeführt. Experimente werden unter Sauerstoff (und CO<sub>2</sub>) Ausschluss in einer Inertgas Handschuhbox durchgeführt. EXAFS Messungen der Proben werden an der Rossendorf Beamline (BM 20) am ESRF in Grenoble durchgeführt. Die erste Veröffentlichung der Ergebnisse soll noch dieses Jahr verfasst werden. Arbeitsergebnisse werden auf der Goldschmidt Konferenz in Florenz August 25 - 30th und auf dem "First Russian-Nordic Symposium on Radiochemistry" in Moskau Oktober 21 - 24th unter dem Titel "Immobilization of long-lived iodine after incorporation into apatite matrice" präsentiert.

Ein Doktorand der Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili Tarragona (Spanien), Luis Iglesias Perez, arbeitet im Rahmen eines 6-monatigen Stipendiums der Siebold Sasse Stiftung zusammen mit Fr. Torapava am IRS ebenfalls an der Synthese von LDH Matrizen und deren Charakterisierung.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100,<br>38116 Braunschweig                       |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 033</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronen-<br>streuquerschnitte |   |  |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung  |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.10.2009 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>135.008,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Fertigung der Streukammer ist inzwischen abgeschlossen. Die Kammer soll in der 32. Kalenderwoche zur Verfügung stehen. Verzögerungen hatten sich zum Schluss noch durch wiederholte Undichtigkeiten an Schweißnähten ergeben, die bei Lecktests in der PTB entdeckt wurden und wiederholtes Nachschweißen bei der Firma FocusControl erforderlich machten.

In Zusammenarbeit mit P. Sauvan von UNED (Madrid) wurden die verbliebenen Probleme bei der Monte Carlo Simulation der Produktion monoenergetischer Neutronen mit MCNPX/MCUNED gelöst. Es ist jetzt möglich auch sogenannte Punktdetektoren zu verwenden, und damit die benötigte Rechenkapazität auf ein für Routineanwendungen akzeptables Maß zu reduzieren. Die mit MCNPX/MCUNED erzielten Ergebnisse wurden mit experimentellen Resultaten und dem alten, in der PTB entwickelten Code TARGET verglichen. Damit sind die Arbeiten zur Monte Carlo Simulation der Produktion monoenergetischer Neutronen abgeschlossen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Streukammer wird zunächst in der Hauptwerkstatt der PTB mit einer Messmaschine mechanisch vermessen. Danach sollen Messungen mit der inzwischen fertiggestellten und im Fachbereich 6.1 kalibrierten  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$ -Teilchenquelle erfolgen, um die Berechnung des effektiven Raumwinkels des Teilchendetektors zu verifizieren. Daran anschließend wird die Kammer zunächst mit Blank-Target an einen nicht mit Tritium kontaminierten Strahlrohr erprobt, um möglich Probleme bei der Fokussierung des 300 keV  $\text{D}_2^+$  Strahls zu untersuchen und gegebenenfalls noch kleinere Änderungen vornehmen zu können. Anschließend wird das Ti(T) Target eingebaut und im vierten Quartal 2013 ein erstes TCAP Experiment mit vorhandenen NE213 Szintillationsdetektoren durchgeführt. Die Ergebnisse sollen mit den Simulationen mit MCNPX/MCUNED verglichen werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Die mit MCNPX/McUNED durchgeführten Simulation der Erzeugung monoenergetischer Neutronen wurde auf dem 525. Wilhelm und Else Heraeus-Seminar „Nuclear Physics Data for the Transmutation of Nuclear Waste“ in Bad Honnef und der Tagung NEUDOS12 in Aix-en-Provence vorgestellt. Der Beitrag zu den NEUDOS12 Proceedings wurde zur Veröffentlichung in „Radiation Protection Dosimetry“ eingereicht.



## **2.3 Strahlenforschung**

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,<br>Planckstr. 1, 64291 Darmstadt  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 001A</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2008 bis 30.09.2013  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>972.056,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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 veröffentlicht (Tobias et al., PLoS One 2013). Messungen zur LET Abhängigkeit der NBS1 Rekrutierung, welche nach Schrägbestrahlung mit hochenergetischen schweren Ionen gewonnen wurden, werden im Hinblick auf den Einfluss der Bahn Struktur ausgewertet.

AP2: „Reparaturwege und DNA Prozessierung“:

Eine mögliche kernweite Lokalisation der aktivierten Kinasen ATM und DNA-PK sowie deren Bindung an das Chromatin wurde in Abhängigkeit der Ionendosis und Zeit mit verschiedener Extraktionsmethoden untersucht. Hierfür wurden am Microbeam mit Au bestrahlte humane Fibroblasten herangezogen. Sowohl pATM wie pDNA-PKcs zeigten ein kernweites Signal, welches mit zunehmender Trefferzahl bis zu dem 3fachen Wert unbestrahlter Zellen anstieg.

In Experimenten mit verschiedenen Kinase Inhibitoren wurde untersucht, ob die CTIP-Aktivierung in G1 (wie für G2 bekannt) von ATM bzw. von Zyklin-abhängigen Kinasen (in G1 möglicherweise CDK4 und CDK6) abhängig ist. Inhibition von ATM reduzierte die Resektion Ca-Ionen-induzierter DSB in S/G2-Zellen, und noch deutlicher auch in G1-Zellen. Diese Effekte waren an Pb-Ionen-induzierten DSB weniger ausgeprägt. Damit könnte ATM in G1 vor allem bei der Aktivierung weniger extensiv resektierter DSB eine Rolle zukommen. Die Ergebnisse zu CDK4/6 sind nicht eindeutig und müssen wiederholt werden. Des Weiteren wurden DSB Reparaturkinetiken nach Ionenbestrahlung in Zellen gemessen, deren MRE11- bzw. MRE11- und CTIP-Expression herunterreguliert war. Die Ergebnisse zeigen, dass komplexe, ioneninduzierte DSB MRE11 und CTIP gemeinsam brauchen, um in G1 und G2 mit einem langsamen, resektionsabhängigen Weg repariert zu werden; nur wenn beide Faktoren fehlen schlagen die Zellen einen resektionsunabhängigen Weg ein. Dies unterscheidet sich deutlich von der Reparatur weniger komplexer Röntgen-induzierter DSB. Bei diesen scheint Resektion in G1 nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, da das Ausschalten von CTIP hier zu keiner Veränderung der Reparaturkinetik führt. In G2 wird ein Teil der DSB auch mit einem langsamen, resektionsabhängigen Weg repariert. Im Gegensatz zu komplexeren, ioneninduzierten DSB steigen die Zellen aber schon nach einem Kockdown von CTIP alleine auf einen resektionsunabhängigen Weg um.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: „Reparaturwege und DNA Prozessierung“:

Bezüglich der kernweiten Phosphorylierung von H2AX soll eine Methode etabliert werden (basierend auf Munoz et al. 2013), die nach *in vitro* Dephosphorylierung von H2AX dessen erneute Phosphorylierung an DSB durch exogen zugegebene DNA-PK ermöglicht. Damit soll die Verteilung von DNA-PK aktivierenden DNA-Enden nach Ionenbestrahlung verifiziert werden.

Des Weiteren soll untersucht werden, ob nach DSB Induktion durch schwere Ionen in G1 der PARP1-Resektions-abhängige alternative Reparaturweg beschritten wird. Dazu sollen Reparaturkinetiken mit und ohne PARP-1 Inhibitor in ionenbestrahlten Proben ausgewertet werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Beiträge zu Tagungen:

B. Meyer et al. (Poster): Nuclear-wide H2AX phosphorylation mediated by ATM and DNA-PK after clustered lesion induction , Heavy Ions in Therapy and Space Radiation Symposium - Chiba, May 15th – 18th, 2013

Veröffentlichungen:

F. Tobias et al., Spatiotemporal dynamics of early repair proteins on complex DNA lesions, PLoS One 8(2):e57953.doi:10.1371 Epub 2012 Feb 26

B. Meyer et al.: Clustered DNA damage induces pan-nuclear H2AX phosphorylation mediated by ATM and DNA-PK, Nucleic Acids Res. 2013 Apr 24 [Epub ahead of print]

Des Weiteren wurden zu den BMBF geförderten Projekten drei Berichte für den GSI Report 2012 angefertigt von B. Jakob et al., B. Meyer et al. und N. Aeverbeck et al. Der GSI Report ist noch im Druck.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Duisburg-Essen - Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 001B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2008 bis 30.09.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>625.483,80 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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:

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zu 2.1: Zusätzlich zu den zuletzt beschriebenen Mutanten die keine endogene Ligase I und keine Ligase III im Kern haben, dafür aber eine humane Version von Ligase III, mit und ohne Zink-Fingerdomäne, konnten Mutanten herge-

stellt werden die Ligase III $\beta$  als Verkürzungsmutante enthalten. Auch bei dieser Mutante war es nicht möglich ein Überleben nach Knock out der endogenen Ligase I festzustellen. Aufgrund der Erkenntnisse aus diesen beiden Mutanten lässt sich schließen, dass für die Übernahme der Replikation im Kern, die Zink-Finger- sowie die BRCT Domäne von Ligase III essentiell sind. Diese Tatsache weist auf eine Beteiligung von XRCC1, dem starken Interaktionspartner von Ligase III, auch bei der Übernahme der Replikationsfunktion hin.

Da die Immunfluoreszenz-Färbung kein ausreichendes Signal zu Hintergrund Ergebnis erbrachte, wurden Ligase I mutierte humane Fibroblasten mit Plasmiden transfiziert die Fluoreszenz markierte Ligase I, XRCC1 und PCNA kodieren. Diese Überexpression auf Ligase I mutiertem Hintergrund ergab, dass sich die Kolo-kalisation mit dem Replikationsmarker EdU, abhängig vom Ligase I-Status änderte. So wird XRCC1 in Ligase I mutierten Zellen mit einem 30 % höheren Prozentsatz zu Replikationszentren rekrutiert als das in korrigierten Zellen der Fall ist, während sich der Anteil von PCNA, wenn auch nicht so drastisch, verringert. Diese Beobachtung deutet auch darauf hin, dass Ligase III, in Abwesenheit von Ligase I, mit Hilfe von XRCC1 zu Replikationszentren rekrutiert wird.

Zur Untersuchung der Checkpoint Antwort von DT40 Zellen wurden in den S-phase Checkpoint Experimenten ATR und ATM Inhibitoren eingesetzt. Diese Experimente zeigten keinen Unterschied zu den nicht behandelten Zellen und zeigten dadurch, dass die Abnahme der Replikationsaktivität der Zellen nicht auf einen funktionalen S-phase Checkpoint zurück zu führen ist, bzw. dass der mögliche Effekt eines S-phase Checkpoints von anderen Faktoren überlagert wird. Hier ist vor allem die Apoptose anfällige Natur der DT40 Zellen zu nennen, die die Arbeit bei hohen Dosen deutlich erschwert. Für den G2 Checkpoint zeigte sich ein anderes Bild. Hier konnte gezeigt werden, dass der massive Anstieg im G2 Anteil der Zellen tatsächlich auf einen funktionalen Checkpoint zurück zu führen ist, da der Einsatz eines ATR Inhibitors einen starken Effekt zeigte und nahezu keine Akkumulation von G2 Zellen zu beobachten war. Die hier eingesetzten DT40 Zellen eignen sich demnach zwar nicht für Untersuchungen des S-phase Checkpoints, könnten aber ein nützliches Werkzeug zur Untersuchung von G2 Checkpoints auf unterschiedlichem genetischen Hintergrund sein.

Zu 2.2: Das Zellüberleben der neu hergestellten *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutante wurde mittels Koloniebildungstest bestimmt. Es zeigte sich, dass diese Mutante etwas strahlenresistenter als die *LIG3<sup>-2loxP</sup>LIG4<sup>-/-</sup>* bzw. *LIG1<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>* Zellen sind. Dies deutet darauf hin, dass die Überexpression von Ligase I einen kleinen Vorteil für das Zellüberleben nach Röntgenbestrahlung mit sich bringt.

Zu 2.3: Es wurden weitere Reparaturkinetiken mittels Immunofluoreszenzfärbung nach UVC Bestrahlung und dem CPD Antikörper durchgeführt. Bei allen bisher untersuchten Mutanten, einschließlich bei der neuen *LIG3<sup>-/-</sup>LIG4<sup>-/-</sup>mts-hLIG1* Mutante, zeigte sich, dass die Zellen die durch UVC generierten CPDs etwas besser reparieren können, wenn Ligase III in den Zellen vorhanden ist.

Dahingegen zeigte sich in Experimenten mittels Koloniebildungstest kein Unterschied im Zellüberleben bei allen eingesetzten Mutanten im Vergleich zum Wildtyp.

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

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Zu 2.1: Die Beobachtung von verändertem Rekrutierungsmuster von XRCC1 abhängig vom Ligase I-Status muss noch weiter untermauert werden. Hierfür soll die ebenfalls Ligase I defiziente Maus-Zelllinie PFL13 benutzt werden. Außerdem soll der Einfluss von XRCC1 knock down auf Ligase I defiziente Zellen untersucht werden.

Zu 2.3: Die Experimente zur Beteiligung von Ligase III in der Nukleotidexzisionsreparatur sollen weitergeführt werden indem ein zweiter Anti-6-4 Photoprodukte Antikörper in der Immunofluoreszenzfärbung eingesetzt wird.

#### 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“

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, BednarT, 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><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 001C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt DNA-Strahlenschäden: Wechselwirkung verschiedener Reparaturwege bei der Prozessierung von DNA Strahlenschäden; TP: Mechanismen an komplexen Läsionen |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2008 bis 30.09.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>760.452,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Löbrich            |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bisherige Experimente nach dicht ionisierender Schwerionen-Bestrahlung zeigten, dass aufgrund der Komplexität der Brüche der Anteil resektierter und somit Artemis-abhängiger Brüche wesentlich höher ist als nach dünn ionisierender Strahlung. Weiterhin zeigten Zellen, in denen die Nuklease CtIP depletiert wurde, nahezu keine Reparatur in der G1- und der G2-Phase, was die Vermutung bestätigt, dass nach Schwerionen-Bestrahlung nahezu alle Brüche resektiert werden (1). Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der Strahlzeit mit Kohlenstoffionen an der GSI wurden im Folgenden die Rollen von CtIP und der CtIP-aktivierenden Kinase Plk3 bei der Reparatur komplexer Brüche in der G1-Phase in ersten Experimenten nach Alpha-Teilchen untersucht. Mittels Immunfluoreszenz-Mikroskopie konnte erneut gezeigt werden, dass CtIP-depletierte Zellen einen ausgeprägten Reparaturdefekt in der G1-Phase besitzen. 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. Im aktuellen Berichtszeitraum konnten diese Ergebnisse in weiteren Experimenten nach Alpha-Bestrahlung bestätigt werden. Darüberhinaus wurden Experimente durchgeführt, in denen die Rolle von CtIP und Plk3 bei der Reparatur komplexer Brüche mittels induzierter Kondensation der Chromosomen in der G1-Phase (G1-PCC, *premature chromosome condensation*) untersucht wurde. Zusammenfassend konnte sowohl mittels Foci-Analyse als auch auf chromosomaler Ebene gezeigt werden, dass CtIP in G1 von Plk3 aktiviert wird und dass diese Aktivierung für die Reparatur komplexer Brüche benötigt wird.

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 vorherigen Berichtszeitraum konnte mittels Immunfluoreszenz-Mikroskopie 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 wurden diese Ergebnisse mit biochemischen Ansätzen bestätigt. Mittels  $\gamma$ H2AX-Immunpräzipitation und Western Blot-Analysen konnte gezeigt werden, dass zu späten Zeiten nach Bestrahlung im Verhältnis zu  $\gamma$ H2AX weniger pATM am Bruch vorhanden ist als zu frühen Zeiten. Des Weiteren nimmt auch die Menge an pKAP1, welches als Target von ATM für die Relaxation des Chromatins in der Bruchregion benötigt wird, im Zuge der Resektion ab. Diese Ergebnisse bekräftigen das Modell, dass eine Modifikation des Bruches durch Resektion eine Ursache für die Abnahme des Checkpoint-Signallings darstellt, wodurch die Zelle mit unreparierten Brüchen in die Mitose eintritt.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

In den verbleibenden Monaten des Projekts sollen die chromosomalen Ergebnisse zum Reparaturverhalten CtIP- und Plk1/3-depletierter Zellen in weiteren Experimenten nach Alpha-Teilchen-Bestrahlung verifiziert und die Daten zur Publikation vorbereitet werden. Des Weiteren soll untersucht werden, welchen Einfluss eine Resektion der Brüche auf die Lokalisation weiterer für das Checkpoint-Signalling wichtiger Faktoren (z. B. MDC1, 53BP) bzw. auf Chromatin-Modifikationen hat.

### 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; accepted.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 002F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Strahlung und Umwelt: Ausbreitungspfade von Radionukliden in Luft, Wasser, Boden; TP: Wechselwirkung von Uran(VI) mit Biofilmen |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.04.2008 bis 31.01.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.01.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>127.135,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Bernhard           |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Da mit Hilfe von TEM/EDX Analysen kein Uransignal an den Zellpellikeln detektiert werden konnte, obwohl aufgrund der Ergebnissen aus den Bioakkumulationsversuchen bekannt ist, dass signifikante Uranmengen an den toten Zellen immobilisiert sind, wurden die Proben von toten *Euglena mutabilis* Zellen zusätzlich mit TEM/EELS (Transmissionselektronenmikroskop/Elektronenenergie-verlustspektroskopie) untersucht. Hierbei konnte ein schwaches Uransignal an der Zellmembran der *E. mutabilis* Zellen nachgewiesen werden. In den *E. mutabilis* Zellen wurde jedoch mit dieser Technik kein Uransignal gefunden. Diese Beobachtung wird als deutliches Indiz dafür gewertet, dass die Uranakkumulation an toten *E. mutabilis* Zellen nahezu ausschließlich auf den Zellmembranen (Zellpellikel) stattfindet und dass es dabei nicht zu lokalen Anreicherungen kommt. Bei den lebenden *E. mutabilis* Zellen findet jedoch ein aktiver Detoxifizierungs-Prozess statt, bei dem das Uran intrazellulär aus dem Cytoplasma entfernt wird und in Vakuolen oder Vakuolen-ähnlichen Vesikeln abgelagert wird.

Darüber hinaus wurden noch FT-IR-Messungen zu Sorptionsprozessen von U(VI) an *Euglena mutabilis* Zellen durchgeführt. Es war hierbei möglich einen dünnen Film aus *Euglena*-Zellen auf der Oberfläche des ATR-Kristalls zu fixieren. Diese als präparierter Film aufgebrachten Zellen waren jedoch nicht mehr lebendig, weshalb diese Untersuchungen ausschließlich den passiven Sorptionsprozess an toten Zellen repräsentieren. Die während des Kontaktes des Zell-Filmes mit einer U(VI)-Lösung (0,01 mM Uran in 0,1 M NaCl) als mobile Phase aufgenommenen IR-Spektren ermöglichten die Detektion der Uran(VI)-Akkumulation direkt an der Grenzfläche der Zellen zur umgebenden Lösung. Die Bande bei  $922\text{ cm}^{-1}$  wird durch die asymmetrischen Streckschwingungen des  $\text{UO}_2$  – Moleküls verursacht. Der deutliche Anstieg der Intensität dieser Bande bei  $922\text{ cm}^{-1}$  deutet daraufhin, dass diese Bande auf die Akkumulation des Uran(VI) an der *Euglena*-Film-Grenzfläche zurückzuführen ist und nicht allein von der wässrigen Spezies der mobilen Phase verursacht wird. Die beobachteten Banden bei  $1533$  und  $1455\text{ cm}^{-1}$  deuten auf eine Koordination des Uran(VI) zu carboxylischen funktionellen Gruppen hin. Banden, welche ein Indikator für die Koordination zu phosphatischen funktionellen Gruppen wären, würden im Bereich um  $1100\text{ cm}^{-1}$  erwartet. In diesem Bereich werden die IR-Spektren jedoch durch starke Hintergrundsignale der *Euglena*-Zellen selbst überlagert. Somit ist es mit dieser Methode nicht möglich die Koordination zu phosphatischen Gruppen nachzuweisen. Es ist jedoch auch nicht möglich die Bindung durch Phosphatgruppen aufgrund dieser Messungen auszuschließen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Arbeiten am Abschlussbericht sowie Arbeiten an einer weiteren Publikation mit dem vorläufigen Titel „Immobilization of Uranium by *Euglena mutabilis* cells“, in der die TEM Ergebnisse im Mittelpunkt stehen, werden den Abschluss zu diesem Projekt bilden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Brockmann S., Arnold T., Bernhard G. (2013) Speciation of bioaccumulated uranium(VI) by *Euglena mutabilis* cells obtained by laser fluorescence spectroscopy, submitted to Radiochimica Acta.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer<br>Feld 280, 69120 Heidelberg  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 003A</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.04.2008 bis 31.08.2013   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>572.506,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Boukamp                |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- 2.1: Die Relevanz der Telomerschädigung für die Entstehung von Hautcarcinomen wurde weiter bestätigt (siehe Publikation Leufke et al., Oncogene , in press).
  - Um den Mechanismus der Telomeraggregat-Bildung besser verstehen zu lernen (siehe Vorbericht), wurde die Rolle der Schelterin Proteine TRF2 und POT1 untersucht. Die Inhibition von TRF2 wurde durch spezifische siRNA erreicht. Hierfür mussten die Zellen 2x (im Abstand von 2 Tagen) mit siRNA transfiziert werden. Nur dann war nahezu kein TRF2 mehr nachweisbar. Diese Depletion führte zu einer starken „Verklumpung“ der Telomere und es waren nur noch wenige individuelle Telomere pro Zelle erkennbar. An einem Großteil der Telomere befanden sich sog. Damage-foci (p53BP1-positive Foci). D. h. durch TRF2 Depletion kommt es zu einer Öffnung der Telomere (dysfunktionelle Telomere) und einer unspezifischen Aneinanderlagerung. D. h. aber auch, dass TRF2 am Telomere absolut essentiell ist.
  - Im Gegensatz dazu konnte POT1 durch einmalige Transfektion mit spezifischer siRNA komplett inhibiert werde. Diese führte zu einer deutlichen Induktion von TAs. Diese TAs, wie auch die anderen Telomere, waren weitgehend frei von Damage foci. Damit lagen die Telomere auch weiterhin in einer geschützten Form vor. Dies macht es wahrscheinlich, dass die Runterregulation von POT1, die in den Kontrollzellen nach Bestrahlung nachweisbar ist, für die TA Bildung von Bedeutung ist.
- 2.2: Weitere Analysen zur Rolle von PARP1 bei der UV-bedingten Telomerverkürzung wurden durchgeführt.



- Wie im Vorbericht beschrieben, kam es nach PARP Inhibition zur Reduktion von TRF2 am Telomer (CHIP Analyse). Dieses unerwartete Ergebnis wurde nun auch durch quantitative Immunfluoreszenz bestätigt. Interessanterweise korrelierte dies aber nicht mit einer Abnahme der Telomerlänge (Southern Blot Analysen), d. h. Modifikation der Schelterin Proteine durch PARP führen nicht zwingend zu einer Telomerverkürzung.
- 2.3: Der OTK Strahlungsversuch wurde weiter ausgewertet, um die Konsequenz von unterschiedlichen UVA Dosen zu ermitteln und mit dem Effekt von kombinierter Bestrahlung (UVA plus UVB) zu vergleichen. Wie im vorherigen Antrag angeführt, wurden zur Analyse 3 Zeitpunkte gewählt 2 h (frühe Schadensinduktion), 3 und 9 Tage (phänotypische Ausprägung der Schädigung).
  - Die im Vorbericht beschriebene Telomerverkürzung (3 Tage nach Bestrahlung) konnte auch noch nach 9 Tagen – wenn auch weniger stark ausgeprägt - bestätigt werden. D. h. UVA Strahlung ist in der Lage, in den Basalzellen der Epidermis eine Telomerverkürzung zu bewirken.
  - Wiederholungsexperimente wurden durchgeführt – speziell auch ein Experiment, in dem die OTKs über 3 Wochen mehrfach bestrahlt wurden, d. h. es wird die Frage angegangen, ob chronische Bestrahlung einen deutlicheren Effekt auf die Schadensinduktion/Telomerverkürzung hat. Material der Experimente wurde auch nach Buxtehude (AG Greinert) für epigenetische Analysen weitergeleitet.
- 2.4: Um die Konsequenzen der UVA Bestrahlung für die dermalen Fibroblasten zu untersuchen:
  - wurden nun erstmals auch dermale Äquivalente (auf Basis von cell-derived Matrix) für 4 Wochen 3x wöchentlich bestrahlt. Diese Experimente werden derzeit ausgewertet.
  - Von der AG Scharffetter-Kochanek (Ulm) wurden Mausfibroblasten von SOD2-defizienten Mäusen erhalten, um so die Rückwirkung von verstärkter Fibroblastenschädigung (nach UV Bestrahlung) auf die Epidermis studieren zu können. Mit 3 verschiedenen Ansätzen war es bisher nicht möglich, optimale Bedingungen zu etablieren. Die Mausfibroblasten zeigen keine Dichte-abhängige Wachstumskontrolle, bauen keine optimale dermale Matrix auf und sind wesentlich aggressiver in der Degradation von vorgegebener Matrix. Da dies sowohl für die SOD2-defizienten als auch wt Fibroblasten gilt, kann ein Gen-spezifischer Effekt ausgeschlossen werden. Das heißt aber auch, dass für die erfolgreiche Bearbeitung dieser Frage, eine langwierige Etablierung des Systems erforderlich wäre, was den Zeitrahmen der Förderung weit sprengen würde und deshalb derzeit nicht weiter verfolgt werden kann.
- 2.5: In Kooperation mit AG Krutmann (Düsseldorf) soll ein Wiederholungsexperiment der OTKs mit IRA (unterschiedliche Dosen) durchgeführt werden. Da die Lampe sehr frequentiert ist, war es bisher nicht möglich, einen Termin zu vereinbaren, an dem die Bestrahlungseinheit wieder nach Heidelberg kommt. Dies wird im November der Fall sein. Die Logistik für die optimale Ausnutzung der möglichen Bestrahlungszeit ist aber bereits erarbeitet.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.1: Wie oben ausgeführt, werden die Untersuchungen zum Mechanismus der TA Entstehung mit Hochdruck fortgeführt. Derzeit stehen speziell die Rolle ROS und Nesprin1 im Vordergrund.
- 2.3: Weitere Analysen der zahlreichen inzwischen durchgeführten Bestrahlungsexperimente (OTK Versuche), speziell auch des Experimentes mit chronischer Bestrahlung:
  - frühe und andauernde Schädigung in der Epidermis – Doppelstrangbrüche – dysfunktionelle Telomere) Proliferation, Differenzierung, Stress-Antwort (Heat shock Proteine), Apoptose (Caspase 3, Damage response (p53BP1 Damage Foci), Telomerase Expression – hTERT Färbung
  - frühe und andauernde Schädigung im dermalen Äquivalent (Fibroblastenzahl, Apoptose, Kollagen Degradation (MMP1 Induktion, Gelatinase Assay), aberrante Genexpression.
- 2.4: Auswertung der Experiments zu chronischen Bestrahlung des dermalen Äquivalents.
- 2.5: Weitere Analysen des ersten IRA Bestrahlungsexperiments und wie nun vereinbart (November 2013) Wiederholung des IRA Experiments unter kontrollierter „Wärmeentwicklung“ zur Klärung, ob es sich bei den ersten Veränderungen um einen „Wärmeartefakt“ oder aber IRA-spezifische Effekte handelt.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Leufke C, Stammer H, Leykauf J, Kronic D, Purdie K, Jauch A, Holtgreve-Grez H, Böhm-Steuer B, Bröcker EM, Mauch C, Utikal J, and Boukamp P. The telomere profile distinguishes two classes of genetically distinct cutaneous squamous cell carcinomas. *Oncogene* in press

Durchführung der Winter School: Research School Maintenance of Expertise (Kompetenzerhalt) in UV-Radiation Research, 29.-31.1.2013, Schloss Mickeln, Düsseldorf

BMBF Statusgespräch 7.3.2013 Karlsruhe

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

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universitätsklinikum Ulm, Albert-Einstein-Allee 29, 89081 Ulm   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 003B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Alterungskorrelierte Prozesse der UVA-induzierten Hautkarzinogenese |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.04.2008 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013    |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>471.694,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Scharffetter-Kochanek |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Dieser Projektteil wird nicht weiter verfolgt, da die Ergebnisse die Hypothese einer ROS-getriebenen direkten Cyclobutan-Pyrimidin-Dimeren-Generierung nicht unterstützten.
- AP2: Langzeit-UVA-Bestrahlungsexperimente der Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäuse wurden fortgesetzt, um die Ergebnisse des ersten Bestrahlungsversuches zu einer gesteigerten Tumorigenese durch Verlust der antioxidativen SOD2-vermittelten Abwehr zu validieren.
- AP3: Organotypische Kulturen (OTC) zwischen humanen Keratinozyten und murinen SOD2-defizienten sowie Wildtyp Fibroblasten zeigten aufgrund einer bisher nicht beschriebenen biologischen Inkompatibilität keine Differenzierung der Keratinozyten und keine Entwicklung einer Epidermis. Die Matrixproduktion verläuft gestört und eine organotypische Kultur als Modellhaut aus humanen und murinen Fibroblasten bildet sich nicht aus. Obwohl dieses Ergebnis biologisch interessant ist, ist eine Weiterführung in der jetzigen Förderphase nicht sinnvoll, da ein langwieriger Entwicklungsaufwand absehbar ist.
- AP7: Murine SOD2-defiziente Keratinozyten zeigten keine spontan, durch Feeder-Zell-Entzug induzierte Immortalisierung. Auch ausgedehnte Versuche der Ko-Kultur mit dem ursprünglich beschriebenen Feeder-Stamm der 3T3 Fibroblasten, der aus den USA importiert wurde, zeigten nach Entzug der Feeder-Zellen keine dauerhafte Immortalisierung. Möglicherweise hemmt der Verlust der SOD2-Funktion die spontane Immortalisierungsreaktion. Daher wurde der Fokus der Experimente auf gealterte Fibroblasten und ihre tumorfördernde Wirkung gelegt.
- AP8: Der Langzeit-UVA-Bestrahlungsversuch von Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäusen in Kombination mit ROS-Scavengern (EUK-134) wird fortgesetzt, um eine mögliche Revertierung der Tumorraten durch antioxidative Maßnahmen zu prüfen.
- AP9: Tumorgewebe der Epidermis-spezifisch SOD2-defizienten Mäuse wurde histologisch untersucht und die Tumorarten bestimmt. Erste Färbungen zur Analyse der extrazellulären Matrix (Kollagen) und der Wachstumskontrolle (Ki67) wurden durchgeführt und befinden sich in der mikroskopischen Auswertung.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die Auswertung und Fortführung der immunhistologischen Färbungen für Zellzyklus- und andere Markermoleküle ist in Bearbeitung.
- AP7: Da ein zentraler Punkt der Arbeiten die tumorprogressive Wirkung von seneszenten stromalen Fibroblasten ist, wurden wegen der schwierigen Keratinozytenkultur SOD2-defiziente Fibroblasten durch AG3 in Kombination aus UV und IR bestrahlt. Zurzeit werden die Bedingungen optimiert, da die getestete Dosis der Kombinationsbestrahlung für die SOD2-defizienten Fibroblasten toxisch ist.
- AP8: Die Langzeit-UV-Bestrahlungsversuche werden mit ROS-Scavengern (EUK-134) fortgeführt um zu prüfen, ob die UV-vermittelte Tumorigenese durch ROS-Scavenger unterdrückt werden kann.
- AP9: Gewebeproben der UV-induzierten Tumore werden bei AG4 und in Kooperation mit AG2 weiter molekular analysiert.
- AP10: Epidermis-spezifisch SOD2-defiziente Mäuse wurden zur AG3 für einen Embryotransfer geschickt, um die Hygienebedingungen des Tierstalls des IUF zu erfüllen und die IR-Bestrahlung in Düsseldorf durchzuführen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

In Vorbereitung.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>IUF- Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 003C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Mitochondriale Schäden                               |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.04.2008 bis 31.03.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 31.03.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>427.457,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. med. Krutmann      |   |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Der geplante Tierversuch (UVB, IRA sowie UVB/IRA-Kombinationsbestrahlung von HIF-1 $\alpha$ -defizienten und Wildtyp-Mäusen) konnte nach erfolgreicher Zucht der Mäuse gestartet werden. Die Mäuse wurden bisher acht Wochen bestrahlt, ohne dass signifikante dauerhafte Hautveränderungen beobachtet werden konnten. Die Bestrahlung wird fortgeführt, bis es zur Ausbildung von Hauttumoren kommt.
- AP2: Diese Arbeiten können erst durchgeführt werden, wenn die Arbeiten unter 1. abgeschlossen wurden.
- AP3: Im Rahmen dieses Projektes ist darüber hinaus geplant, Mäuse, die eine Epidermis-spezifische Inaktivierung des Mitochondrien-spezifischen, antioxidativ wirksamen Enzyms MnSOD aufweisen, einer chronischen UVA-, IRA- bzw. UVA/IRA-Kombinationsbestrahlung auszusetzen. Mit Hilfe dieses Modells soll untersucht werden, inwieweit die strahlungsbedingte mitochondrielle ROS-Produktion von Bedeutung für die Entstehung von Hautschäden ist. Zuchtpaare dieses Mausstamms wurden bereits von der AG4 nach Düsseldorf transferiert, wo derzeit ein Embryo-Transfer der Tiere durchgeführt wird, bevor die Zucht der Mäuse für die geplanten Versuche beginnen kann. Parallel zu diesem Ansatz werden MnSOD-defiziente und Wildtyp-Fibroblasten und Keratinozyten mit UVA, IRA oder einer UVA/IRA-Kombination bestrahlt, um zu untersuchen, inwieweit die mitochondrielle strahlungsbedingte ROS-Produktion zur Entstehung von DNA-Schäden führt (die wiederum eine Grundlage für die Schädigung der Haut sind).
- AP4: In einer randomisierten, Vehikel-kontrollierten, doppelt verblindeten Studie konnte erstmals gezeigt werden, dass der bis dato nur in-vitro beobachtete Schutzeffekt gegen IRA-induzierte Hautschädigungen auch nach topischer Applikation von Antioxidantien auf die menschliche Haut beobachtet werden kann. In einer Studie zeigte sich, dass die IRA-induzierte Aufregulation der MMP-1 mRNA durch das antioxidationshaltige Testpräparat signifikant um ca. 60 % reduziert wurde. In einer 2., unabhängigen, kontrollierten humanen in-vivo Studie konnten wir zudem erstmals zeigen, dass diese Schutzwirkung nicht mit einem konventionellen, ausschließlich UV-Filter enthaltenden Sonnenschutzmittel erzielt werden kann, sondern vielmehr die Zugabe topisch wirksamer Antioxidantien erfordert.
- AP5: In Kooperation mit AG2 (Buxtehude) wurden zwischenzeitlich die Ergebnisse aus gemeinsam durchgeführten Experimenten ausgewertet, bei denen epidermale Stammzellen sequentiell mit IRA plus UVA bestrahlt wurden. Hierbei zeigte sich, dass die biologischen Antworten der sequentiellen Bestrahlung sich von der einer reinen IRA oder UVA-Bestrahlung unterscheiden und zudem von der Reihenfolge der Bestrahlungen abzuhängen scheinen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Nach Beginn des Tierversuchs wird dieser fortgeführt, bis es zur Entstehung von Hauttumoren kommt.
- AP2: Diese Arbeiten können erst nach Abschluss der unter 1. beschriebenen Arbeiten begonnen werden.
- AP3: Nach erfolgreichem Embryo-Transfer der MnSOD-defizienten Mäuse sollen die Tiere weitergezüchtet werden, bis genügend Tiere zur Durchführung der geplanten Bestrahlungsversuche zur Verfügung stehen. Parallel dazu werden die Bestrahlungsexperimente mit MnSOD-defizienten Hautzellen durchgeführt.
- AP4: Die im Rahmen der klinischen Studien erhobenen Befunde werden zurzeit zur Publikation vorbereitet.
- AP5: Die in Kooperation mit der AG 2 erhobenen Befunde weisen auf die Notwendigkeit hin, in einem neuen, unabhängigen Forschungsprojekt die beobachteten Wechselwirkungen von IRA, UVA aber auch UVA und UVB bzw. UVB und IRA Strahlung einer grundlegenden wissenschaftlichen Analyse zu unterziehen. Ein entsprechender Antrag wurde zwischenzeitlich erstellt und zur Förderung beim BMBF eingereicht.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Elbe Kliniken Stade-Buxtehude gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH), Bremervörder Str. 111, 21682 Stade  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 003D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Epigenetische Veränderungen, Schadensinduktion, Prozessierung und Reparatur |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.04.2008 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>463.374,24 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Volkmer                  |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

#### *Arbeitspaket 4:*

Analyse der Promotermethylierung in Zellen mit unterschiedlichen Bestrahlungen. **Ergebnisse:** Der Methylierungsstatus wurde in der chronisch mit UVA-bestrahlten (1mal pro Woche für 5 bzw. 15 Wochen, 200 oder 400 kJ/m<sup>2</sup>) humanen Keratinozytenzelllinie KH8.2.00 überprüft. Dabei konnte bisher keine Abweichung im Promotor von dem Tumorsuppressor p16<sup>INK4a</sup> festgestellt werden. Die Promotermethylierung in den Promotoren weiterer Gene z. B. LIN28, HIC1 usw. wird der Zeit untersucht. Da die Etablierung der qPCR-Line1 Methode zur Bestimmung globaler DNA-Methylierung erfolgreich war, kann nun der Methylierungsstatus genom-weit in den Zellen mit unterschiedlichen Bestrahlungen damit gemessen werden.

#### *Arbeitspaket 5:*

Untersuchung der IR-Bestrahlungsexperimente (möglicher Beteiligung von IRA an der Reparatur UV-induzierter DNA-Schäden, epigenetische Veränderungen). Untersuchung der Expression und epigenetischer Veränderungen in akut und chronisch UV-bestrahlten Zellen. Vergleichende Analyse von Expression und epigenetischen Veränderungen hautkrebsrelevanter Gene in den Proben mit unterschiedlichen Hauttumorstadien um evtl. stadienspezifische Signaturen zu identifizieren.

*Ergebnisse:* Um die mögliche Beteiligung der IRA-Strahlung an die DNA-Reparatur UV-induzierter Schäden zu untersuchen, wurden zunächst HaCaT Zellen mit IRA (2000 kJ/m<sup>2</sup>) vorbestrahlt, anschließend mit UVA (600 kJ/m<sup>2</sup>) oder UVB (300 J/m<sup>2</sup>) bestrahlt und die Reparatur-Kinetik bestimmt. Eine Reparatur-Zeitkonstante von 47h konnte sowohl bei den UVA-bestrahlten HaCaT Zellen ohne als auch mit IRA-Vorbestrahlung ermittelt werden. Die IRA-Vorbestrahlung veränderte die Reparaturkinetik UVB-induzierter Schäden ebenfalls nicht. In den Berichten 2012-1 und -2 haben wir gezeigt, dass in den chronisch mit UVA-bestrahlten (1mal pro Woche für 5 bzw. 15 Wochen, 200 oder 400 kJ/m<sup>2</sup> UVA) KH8.2.00 Zellen die epigenetischen Modifikationen und die Genexpression Haut-/Hautkrebs-relevanter Gene im Vergleich zu den unbestrahlten Zellen kaum verändert waren. Die KH8.2.00 Zellen wurden weiter mit UVA (insgesamt 25 Wochen) bestrahlt. Auch hier konnte Veränderung der Expression nur bei HIC1 und p16<sup>INK4a</sup> (2-fach Reduzierung, 200 kJ/m<sup>2</sup>) festgestellt werden. Die epigenetischen Modifikationen müssen noch untersucht werden. Nach akuter Bestrahlung (UVA oder UVB) von HaCaT-Zellen ist eine Änderung der Expression hautkrebsrelevanter Gene hauptsächlich nach UVB zu beobachten. Die Erhöhung der Expression in den Genen p16<sup>INK4a</sup>, p14<sup>ARF</sup>, p21<sup>CIP1</sup>, KLF4 und HIC1 lag 6 Stunden nach Bestrahlung bei einem Faktor von ~2. 16 Tage nach Bestrahlung nimmt die Expression, ausgenommen bei HIC1, deutlich ab. Nach akuter UVA Bestrahlung (200 und 600 kJ/m<sup>2</sup>) ist eine Expressionserhöhung bei den Genen p16<sup>INK4a</sup> und HIC1 zu beobachten. Im Gegensatz zu p16<sup>INK4a</sup> persistiert auch hier 16 Tage nach Bestrahlung die Expressionserhöhung bei HIC1. Eine Untersuchung der DNA Methylierung im Promotorbereich der untersuchten Gene ergab keinen Zusammenhang zwischen Expressionsänderung nach akuter Bestrahlung und epigenetischer Expressionsregulation via DNA-Methylierung. Bei dem Vergleich der Expression von hautkrebsrelevanten Genen in gesunder Haut zu Proben des Stachelzellkarzinoms deutet sich an, dass einige Gene (KLF4, NOTCH1) im Laufe der Cancerogenese tendenziell herunter reguliert wurden, andere tendenziell hoch (TenC, CDH1). Ob epigenetische Regulationsmechanismen daran beteiligt sind wird überprüft.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

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

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Siehe Bericht 2011-2.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str.,<br>52428 Jülich   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 005A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.05.2008 bis 31.10.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>686.460,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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: Etablierung eines Probanden-Pools für die Untersuchungen zur biodosimetrischen *in vivo* Anwendbarkeit der bereits *in vitro* identifizierten Gensignaturen im Niedrig- und Hochdosisbereich. Publikation der Ergebnisse (*in vitro* Gensignaturen) zu den Hoch- und Niedrigdosisexperimenten.
- 2.2: Erfolgreiche qRT-PCR Validierung von 5 Kandidatengenen, die die Diskriminierung von drei Strahlenqualitäten (Auger-Elektronen,  $\alpha$ -Partikeln und  $\gamma$ -Strahlung) erlauben.
- 2.3: Es wurden vergleichende Untersuchungen bezüglich der Zytotoxizität von I-125-markierten und P-32-markierten TFOs in SCL-II Zellen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass, bei gleicher Anzahl akkumulierter Zerfälle pro Zelle, die mit dem Auger-Elektronen-Emitter I-125 markierten TFOs eine um ca. 20 % höhere Toxizität besitzen.
- 2.4: Analyse der bisherigen Daten mit neuen Methoden; Evaluierung der Daten mit neuen klinischen Erhebungen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.1: Etablierung eines Probanden-Pools für die Untersuchungen zur biodosimetrischen *in vivo* Anwendbarkeit der bereits *in vitro* identifizierten Gensignaturen im Niedrig- und Hochdosisbereich. Überprüfung der *in vivo* Anwendbarkeit der identifizierten Gensignaturen/Markergene für die Dosiszuordnung im Niedrig- und Hochdosisbereich.
- 2.2: Ermittlung der jeweiligen Genfunktion der identifizierten Kandidatengene sowie Analyse beteiligter Signalwege und biologischer Prozesse
- 2.3: Untersuchungen zur Spezifität und Komplexität der durch I-125-TFO induzierten DNA Schäden im zellulären System mittels geeigneter Plasmidkonstrukte.
- 2.4: Etablierung der Chromatinstruktur als Indikator der individuellen Strahlenempfindlichkeit.

### 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 Jul 25. [Epub ahead of print] (2013)

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><br>Universität Duisburg-Essen, Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br>02 NUK 005C |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.05.2008 bis 31.10.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.283.590,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 Tumorlinien 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:** Der strahlensensibilisierende Effekt von ara-A wurde in humanen Zellen untersucht, in denen mittels RNA Interferenz der HRR Faktor Rad51 depletiert wurde. Die Rad51 depletierten Zellen konnten durch ara-A nicht weiter sensibilisiert werden. Der Einfluss der Nucleosidanalogue (NA) dFdC, ara-C und F-ara-A auf die Reparatur von DSB

wurde im Vergleich zu ara-A mit Hilfe verschiedener Reporterzelllinien untersucht. Dabei zeigte sich, dass mit Ausnahme von ara-C alle getesteten NAs einen stark hemmenden Einfluss auf die HRR hatten. Prozesse der nicht homologen Endverknüpfung (NHEJ) blieben unbeeinflusst oder wurden verstärkt. Ein erst kürzlich veröffentlichtes Zellsystem wurde verwendet, um die Frequenz mutagener Reparaturereignisse zu messen. Die Versuche zeigten, dass, ebenfalls mit Ausnahme von ara-C, alle getesteten NAs zu einer starken Zunahme mutagener Reparatur führten.

**Ziel 2:** MDC1-Foci wurden mittels Life Cell Imaging in I-SceI und MDC1-GFP kotransfizierten CHO10B4 Klonen mit simplen und geclusterten Brüchen ermittelt. In Gegensatz zu 53BP1-Foci, wurde eine Anzahl an MDC1-Foci in allen Zelllinien gebildet, die das theoretische Maximum an Foci entsprechend der Anzahl an Integrationen und der Zellzyklusverteilung entspricht. Cytogenetische Untersuchungen wurden nach der Zugabe des DNA-PKcs Inhibitors NU7441 durchgeführt. Die Anzahl an Exchanges war in den Zelllinien mit simplen DSBs (CHO-1xISceI-D7.C2) deutlich erhöht im Vergleich zu der Kontrolle ohne NU7441, wobei in Zellen mit geclusterten DSBs (CHO-4xISceI-R11.C3) keine Erhöhung festgestellt wurde, da hier die maximale Anzahl an Exchanges auch ohne Inhibitor erreicht wird. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass DSB-Reparaturprozesse an geclusterten Schäden scheitern.

**Ziel 3:** Es wurden 3 humanen Hautfibroblasten von Patienten mit Kopf-Hals Tumoren in frühen (proliferationsaktiv) und späten (seneszent) bezüglich der  $\gamma$ H2AX Focibildung nach Bestrahlung in Abhängigkeit von ATM untersucht. Hierzu wurden die Fibroblasten 1 h vor Bestrahlung mit ATM Inhibitoren (ATMi) behandelt. Die Focibildung wurde nach 1h (initial) und 24h (residual) bestimmt. ATMi führte in allen Fällen zu einer Reduktion der initialen und Erhöhung der residualen Focibildung. Die initiale wie residuale Focibildung in seneszenten Fibroblasten war im Allgemeinen um 20-30 % deutlich geringer. Dieser Effekt war nach ATMi deutlicher, mit 40-50 % Reduktion der initialen Focibildung in seneszenten im Vergleich zu proliferationsaktiveren Fibroblasten.

**Ziel 4:** In früheren Experimenten hatten wir mittels ChiP Analysen herausgefunden, dass der Anteil von  $\gamma$ H2AX 1h nach Bestrahlung als Maß für den initialen Anteil von DNA Doppelstrangbrüchen auf Chromatinfragmenten die vermehrt den Euchromatinmarker H3K4me3 tragen, um etwa 30 % höher ist als auf Fragmenten die vornehmlich den Heterochromatinmarker H3K9me3 tragen. Diese Studien wurden fortgeführt und optimiert, und die Analysen mit weiteren Heterochromatinmarker (H3K27me3) und Euchromatinmarker (H3K9me1) erweitert. In den Folgestudien hat sich der Unterschied mit 40 % höherem Anteil an  $\gamma$ H2AX auf dem euchromatischen Marker (H3K4me3) im Vergleich zum heterochromatischen Marker H3K9me3 gefestigt ( $p < 0.01$ ). Die Induktion von  $\gamma$ H2AX auf Chromatinfragmenten mit den Chromatinmarkern H3K27me3 und H3K9me1 war jedoch nicht signifikant von denen auf dem H3K9me3 unterschiedlich. Das Verhältnis von  $\gamma$ H2AX Signalen nach 4h im Vergleich zu den initialen Werten nach 1h wurde als Maß für den Anteil residualer  $\gamma$ H2AX auf den verschiedenen Markern ermittelt. Dieser war nur auf dem H3K4me3 Marker signifikant geringer im Vergleich zu H3K9me3. Es ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Markern. Diese Daten zeigen, dass es wohl Unterschiede von  $\gamma$ H2AX auf verschiedenen Chromatinkompartimenten 1 h nach Bestrahlung gibt. Dieser Unterschied lässt sich aber nicht unbedingt allgemein auf Hetero- oder Euchromatinmarker zuordnen.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

**Ziel 1:** Weitere Experimente zur Untersuchung des Einflusses nukleosidanaloger Chemotherapeutika auf mutagene DSB Reparatur sind geplant. Insbesondere soll der Einfluss von Nukleosidanalogen auf die End-Resektion sowie der Effekt von Nukleosidanalogen auf die Bildung Strahlen induzierter Reparatur Foci weiter untersucht werden.

**Ziel 2:** Immunostaining für MDC1 und 53BP1 soll in I-SceI transfizierten CHO-1xISceI-D7.C2, CHO-2xISceI-R11.C13 und CHO-4xISceI-R11.C3-Zellen durchgeführt werden. Cytogenetische Untersuchungen mit dem PARP Inhibitor sollen Aufschluss über den Beitrag von B-NHEJ an der Reparatur von geclusterten Brüchen geben.

**Ziel 3:** Die Reparaturfähigkeit von replikativ gealterten (seneszenten) Fibroblasten nach fraktionierter Bestrahlung in Abhängigkeit von ATM wird in 2 weiteren Fibroblasten untersucht.

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

#### 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 DSB formation after exposure to heavy ions. *Radiat Oncol* 2013, 8:77

Paul K, Wang M, Mladenov E, Bencsik-Theilen A, BednarT, 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 DSB 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 NHEJ in genomic instability and cancer. *Transl Cancer Res* 2013, 2, 163-177

Schipler A, Iliakis G. DNA DSB 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><br>Universität Rostock, Ulmenstr. 69, 18057 Rostock   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 005D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.05.2008 bis 31.10.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>326.176,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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:

- Metaanalyse von vier strahlungsrelevanten Microarray Datensätzen: Für die Rekonstruktion eines regulatorischen Netzwerkes, welches die Geninteraktionen nach Strahlungseinwirkung in peripheren Blutlymphozyten widerspiegelt, wurden vier Datensätze unterschiedlicher Plattformen mit insgesamt 200 Microarray-Samples durch eine Metaanalyse aufbereitet. Schritte der Metaanalyse waren (a) die Identifikation und Selektion von Proben, die auf allen Arrays unterschiedlicher Technologien aufgetragen wurden, (b) die Zusammenführung von Proben, die mehrfach auf einem Array aufgetragen wurde, aber das gleiche Gen repräsentieren, (c) das Filtern von Genen, die in einem Großteil der untersuchten Samples eine Änderung der Genexpression nach Bestrahlung aufweisen und (d) die Normalisierung der Genexpressionsdaten.
- Rekonstruktion des genregulatorischen Netzwerkes: Auf Basis unserer systematischen Evaluation verschiedener Methoden zur Netzwerkrekonstruktion (siehe Zwischenbericht 1./2.Halbjahr 2012) wurde für die Herleitung eines strahlungsinduzierten genregulatorischen Netzwerkes die Methode mit höchster Vorhersagegenauigkeit ausgewählt. Diese Methode sagt anhand der zuvor selektierten Genexpressionsdaten potentielle Interaktionen zwischen zwei Transkriptionsfaktoren oder einem Transkriptionsfaktor und einem Zielgen vorher. Die Transkriptionsfaktoren wurden zuvor mit Hilfe der Transfac Datenbank selektiert.
- Analyse des rekonstruierten Netzwerkes: Das vorhergesagte Netzwerk wurde zunächst mit Cytoscape visualisiert und hinsichtlich topologischer Charakteristika untersucht. Hierzu gehörten unter anderem die Identifikation von Teilgraphen mit hoher Konnektivität (Cluster) und Gen-Hubs (Transkriptionsfaktoren mit einer hohen Anzahl von eingehenden und ausgehenden Kanten). Diese wurden darüberhinaus funktional analysiert, um Prozesse und Signalwege zu identifizieren, die in der zellulären Strahlungsantwort eine besondere Rolle spielen. Unter anderem zeigte sich, übereinstimmend mit unseren vorherigen Ergebnissen, eine hohe Konnektivität von p53-regulierten Genen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Bestimmung eines Schwellenwertes: Ein kritischer Schritt bei der Rekonstruktion von regulatorischen Netzwerken ist die geeignete Wahl eines Schwellenwertes, welcher die vorhergesagten Interaktionen, die in das Netzwerk aufgenommen werden, von den vorhergesagten Interaktionen, die verworfen werden, trennt. Verschiedene Methoden für die Bestimmung dieses Schwellenwertes werden implementiert.
- Funktionale Analyse: Durch weitere funktionale Analysen, wie z. B. einer GO-Enrichment Analyse, hoffen wir, informative / strahlungsrelevante Subgraphen identifizieren zu können und zusammen mit der im nächsten Schritt vorgesehenen Validierung, bisher unbekannte Interaktionen zwischen strahlungsinduzierten Genen bestimmen zu können.
- Validierung der Vorhersageergebnisse: Um unser vorhergesagtes Netzwerk zu validieren, erfolgt ein Literatur- und Datenbankabgleich.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 007E</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt Individuelle Strahlenempfindlichkeit und genomische Instabilität: Einfluss von Rb1 Gen-Variationen auf die Ausbildung akuter Nebenwirkungen und auf das Auftreten bösartiger Strahlenspätchäden nach den bei einer konventionellen Strahlentherapie angewendeten Gamma-Dosen |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2009 bis 30.06.2013   |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>425.076,00 EUR  |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Atkinson               |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

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

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

TP1: Rosemann (Abschluss des Vorhabens zum 31.12.2012)

- Abschluss des Vorhabens zum 31.12.2012. In diesem Berichtszeitraum keine Aktivitäten

TP2: Multhoff

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

TP2: Multhoff

Unserer Arbeitsgruppe ist es gelungen aus Normal- und Tumorgewebe von Mäusen reproduzierbar vitale primäre mikrovaskuläre Endothelzellen zu isolieren. In Publikationen anderer Arbeitsgruppe wurde gezeigt, dass vitale Endothelzellen nur aus embryonalen und sehr jungen Mäusen (< 4 Wochen) gewonnen werden können. Mit der von uns etablierten Methode, konnten vitale Endothelzellen auch aus älteren Mäusen (bis zu 9 Wochen) isoliert werden. Die von uns generierten Endothelzellen aus Normal- und Tumorgewebe exprimieren nicht nur einen sondern ein ganzes Panel an unterschiedlichen Endothelzell-typischen Markern wie z.B. CD31, CD102, CD105 auf der Zelloberfläche. In Zellkultur weisen die primären Endothelzellen das typische „Cobblestone“-Wachstumsmuster auf. Funktionell und morphologisch konnten Unterschiede in Endothelzellen nachgewiesen werden, die aus Tumor und Normalgewebe isoliert wurden. Tumorendothelzellen weisen eine wesentlich stärkere Expressionsdichte des Markers CD31 auf als Endothelzellen aus Normalgewebe wie z.B. dem Herzen oder der Lunge.

Tumorendothelzellen sind wesentlich flächiger und größer als Endothelzellen aus Normalgewebe. Werden die Endothelzellen im IBIDI Fluss-System einem Scherstress ausgesetzt richten sich die Endothelzellen entlang der Flussrichtung aus. Die von uns entwickelte Methode und die vergleichende Analyse von Tumor und Normalendothelzellen wurden in einer Publikation zusammengefasst, die noch in diesem Monat zur Publikation eingereicht werden soll.

Das Hitzeschock Protein 70 (Hsp70) wird auf der Zelloberfläche von Tumoren, nicht aber auf Normalgewebe, exprimiert. Vitale Tumorzellen, nicht aber Normalgewebe, sezernieren Hsp70 aktiv in den Zellkulturüberstand. Dieser Befund führte zu der Überlegung Hsp70 im Zellkulturüberstand von Tumorsphäroiden zu bestimmen. Wir konnten zeigen, dass das Wachstum der Tumorsphäroide mit der Ausschüttung von Hsp70 in den Zellkulturüberstand korreliert. Tumor-tragende Mäuse weisen im Vergleich zu gesunden Kontrolltieren erhöhte Hsp70 Serumwerte auf. Eine durch Bestrahlung initiierte lokale Tumorkontrolle nach einer Einzelbestrahlung des Tumors bei von 30 Gy führte zu einer Erniedrigung der Hsp70 Serumwerte. Diese Daten legen den Schluss nahe, dass Hsp70 im Serum als Tumor-spezifischer Biomarker qualifizieren könnte.

In einer Gruppe von 15 Tumorpatienten (Chondrosarkompatienten) konnten, wie im Mausmodell bereits gezeigt, im Vergleich zu gesunden Probanden erhöhte Hsp70 Serumwerte nachgewiesen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

TP2:

Nachdem gezeigt werden konnte, dass der Hsp70 Gehalt im Serum von Tumor-tragenden Mäusen und Tumorpatienten im Vergleich zu gesunden Spendern erhöht waren, ist geplant die Wertigkeit von Hsp70 als Tumor Biomarker im Serum von Patienten an einer größeren Gruppe von Patienten und Normalpersonen zu überprüfen. Darüber hinaus sollen Patienten mit unterschiedlichen Tumorentitäten in die Testreihen einbezogen werden. Zusätzlich dazu soll das Ansprechen von Tumorpatienten auf eine Strahlentherapie mit den Hsp70 Serumwerten korreliert werden.

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

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Gonzalez Vasconcellos I, Anastasov N, Sanli-Bonazzi B, Klymenko O, Atkinson MJ, Rosemann M.: Rb1 haploinsufficiency promotes telomere attrition and radiation induced genomic instability *Cancer Res.* 2013 Jul 15;73(14):4247-55.

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

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

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

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

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

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.08.2013   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>159.922,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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. EU-RADOS) 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

- In einer Kollaboration mit dem DKFZ Heidelberg wurden inhomogene Verteilungen des Radionuklids  $^{18}\text{F}$  untersucht. Dazu wurden Gefäße mit  $^{18}\text{F}$ -2-FDG in eine perforierte Lunge des LLNL Kalibrierphantoms eingesetzt und in verschiedenen Konfigurationen gemessen. Hierbei wurden Abweichungen in der Zähleffizienz im Vergleich von Punktquelle zu homogener Verteilung von bis zu Faktor 3 gefunden.
- Weiterhin wurde eine Methode zur statistischen Analyse der berechneten Zähleffizienzen und anthropometrischen Parameter (AP) entwickelt. Dazu wurden verschiedene Algorithmen im Bereich des maschinellen Lernens auf ihre Anwendbarkeit für diesen Anwendungsfall untersucht. Diese Algorithmen basieren grundsätzlich auf der Erstellung eines Prädiktors aus Trainingsdaten unter Minimierung der Komplexität dieses Prädiktors.
- Konzeptionell stellt die entwickelte Methode eine Erweiterung der aktuell eingesetzten Methode für Phoswich-Detektoren bei Lungenmessungen dar. Hierbei wird die Zähleffizienz basierend auf dem Verhältnis von Gewicht und Größe der Person durch ein lineares Modell vorhergesagt, was in der Anwendung jedoch keine zufriedenstellenden Resultate liefert.
- Die entwickelte Methode besteht aus zwei Komponenten: (1) Feature Subset Selection, und (2) Model Training. Komponente (1) bewertet beliebige Kombinationen von AP auf ihre prädiktive Performanz hinsichtlich der Zähleffizienz. Die besten Kombinationen können durch eine strukturierte Suche im Parameterraum gefunden werden. Komponente (2) erstellt einen optimalen Prädiktor für eine beliebige Kombination von AP. Eine explizite Repräsentation eines solchen Prädiktors erfolgt durch Evaluierung auf einem Raster. Variationen der Methode bezüglich der verwendeten Sampling-Methoden und Basisfunktionen für die Regression zeigen nur geringe Unterschiede und weisen auf eine robuste Methodik hin. Eine Variation der Photonenenergie zeigt nur geringe Abweichungen für niedrige Energien. Wie zu erwarten, ist jedoch eine Abhängigkeit vom Quellorgan (d. h. Lunge oder Leber) gegeben.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Als nächster Schritt ist die Erstellung von Prädiktoren für verschiedene Parametersätze geplant, um eine Veränderung in der Unsicherheit durch die Akquise von weiteren AP beurteilen zu können. Weiterhin soll die Methodik an realen Fällen getestet werden.
- Weitere Sensitivitätsanalysen sollen eine Einordnung von bei der Modellierung getroffenen Annahmen ermöglichen (z. B. bezüglich der Genauigkeit bei der Detektorpositionierung im Routinebetrieb).
- Für die Zusammenarbeit mit dem Projektpartner am HMGU ist eine Übertragung der entwickelten Methodik für Leber- und Lungenmessungen auf Knochenmessungen am Kopf geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Pözl S. et al., 2013. Voxel2MCNP: a framework for modeling, simulation and evaluation of radiation transport scenarios for Monte Carlo codes. *Physics in Medicine and Biology*. (accepted)

Pözl S., Breustedt B., 2011. Calibration of partial body counters using Voxel2MCNP and the XCAT phantom series. *4th International Workshop on Computational Phantoms for Radiation Protection, Imaging and Radiotherapy*. Zurich, Switzerland, August 20-22, 2013.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg       |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.937.835,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Tschiersch               |   |

### 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Zum Erhalt und Weiterentwicklung der Kompetenz in der Strahlenforschung sollen im Rahmen des Verbundprojekts Strahlung und Umwelt II in neun Arbeitspaketen Nachwuchs-kräfte ausgebildet und neue Erkenntnisse auf folgenden Gebieten erarbeitet werden: Ausbreitung von Radionukliden in Luft, Wasser und Boden, Transport von Radionukliden in Pflanzen, Validierung biokinetischer Stoffwechselmodelle und Strahlenbelastung durch natürliche Radionuklide. Intensive interne und Zusammenarbeiten mit den Verbundpartnern Universität Bremen, Leibniz Universität Hannover, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Karlsruher Institut für Technologie und VKTA Rossendorf ist bereits in den Programmen der jeweiligen Arbeitspakete festgelegt.

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm ist in neun Arbeitspakete (AP) gegliedert. In AP3.4 werden die experimentellen Ergebnisse der übrigen AP hinsichtlich der Dosisabschätzung modelliert. Im Einzelnen haben die APs folgende Themen:

- AP1.1: Modellierung des Verbleibs von Radionukliden in städtischer Umgebung und der resultierenden Exposition (Kaiser)
- AP1.3: Radioökologie bei Schnee (Tschiersch)
- AP2.3: Mechanismen der Blattaufnahme von Radionukliden in Pflanzengewebe (Kanter)
- AP3.1: verbesserte Abschätzung der internen Dosis nach Inkorporation natürlicher Radionuklide aus Böden mit Hilfe von Modellstudien mit Heilerde (Höllriegl, Oeh)
- AP3.3: Pobandenspezifische Kalibrierung des HMGU Teilkörperzählers (Rühm)
- AP3.4: Biokinetische Modellierung und interne Dosisabschätzung auf der Basis experimenteller Messdaten (Li, Oeh)
- AP4.1: Aufnahme und Ausscheidung von Ra-226, Pb-210, Ra228 und Th-228 an NORM/TENORM-Arbeitsplätzen (Shinonaga)
- AP4.2: Entwicklung von aktiven Detektoren zur Bestimmung individueller Radon- und Thoronexpositionen (Rühm)
- AP4.3: Innenraumexposition durch Thoron (Tschiersch)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Die automatisierte Routine Location Factor Calculation Module (LFCM) zur Berechnung von Gammadosisraten aus geographischen Umgebungsdaten wurde zur Berechnung von Umgebungsfaktoren für die Region um Moosach in Bayern verwendet und die Ergebnisse in

einer Veröffentlichung zusammengefasst. Eine weitere Optimierung der Routine mit Daten zu Gammadosisraten aus der Fukushima Präfektur nach dem Nuklearunfall im März 2011 wird mit entsprechendem Kartenmaterial durchgeführt.

- AP1.3: Neben weiteren Schnee- und Regenproben wurden auf der Zugspitze zusätzlich Aerosolproben genommen und  $\gamma$ -spektrometrisch die Radionuklidaktivitäten bestimmt. Daraus wurden Auswaschkoeffizienten für unterschiedliche Niederschlagsereignisse berechnet. Für das 2D-Video-Distrometer wurde die Datenaufzeichnung optimiert und entsprechende Algorithmen für die Klassifizierung der Ausgabedaten entwickelt. Eine Masterarbeit über die Migration von Radionuklidtracern in Schnee wurde erfolgreich abgeschlossen.
- AP2.3: Die Laborversuche wurden vorbereitet. Ein geeigneter PostDoc für die Versuchsdurchführung wurde gewonnen.
- AP3.1: Die Probandenuntersuchungen wurden beendet; Messungen und Auswertungen der Urinproben sind nahezu abgeschlossen. Die in vitro-Löslichkeitsstudien mit  $^{238}\text{U}$ -kontaminierter Erde bzw.  $^{238}\text{U}$ -haltigem Phosphatdünger sind in Bearbeitung. Das Uran-Modell für die biokinetischen und dosimetrischen Berechnungen wurde aktualisiert.
- AP3.3: In GEANT4 wurde eine Routine zur Berücksichtigung der Detektorauflösung implementiert. Damit konnten mit den Detektoren gemessene Photonenspektren einer  $^{241}\text{Am}$ -Quelle über einen weiten Energiebereich bis 60 keV reproduziert werden. Im Voxelpantom des Schädels einer Person wurde der kortikale Knochenanteil mit  $^{241}\text{Am}$  kontaminiert und die Detektoreffizienz simuliert. Anschließend wurden erste personenspezifische Parameter wie die Dicke der Kopfhaut verändert und die Auswirkung auf die Detektor-Effizienz untersucht.
- AP3.4: In Kooperation mit AP4.3 wurden die altersabhängigen Dosiskoeffizienten für  $^{222}\text{Rn}$  und dessen Folgeprodukte berechnet. Ziel ist es, die Strahlenbelastung aus Thorongas und Radongas und dessen Folgeprodukte in einem gemischten Strahlenszenario quantitativ zu bestimmen und zu vergleichen.
- AP4.1: Die Probandenstudien konnten mit der Untersuchung der Referenzgruppe abgeschlossen werden. In Kooperation mit AP4.2 wurden  $^{222}\text{Rn}$  Hintergrundmessungen vor Ort durchgeführt und ausgewertet. Die Validierung der entwickelten analytischen Methoden wird derzeit abgeschlossen. Parallel dazu läuft die Analyse der Realproben (Lebensmittel, Stuhl und Urin). Erste Ergebnisse für die Reinigungsarbeiter liegen vor.
- AP4.2: Es wurden 25 neue Radon-Exposimeter mit verbesserter Sensitivität hergestellt und kalibriert. Der neue Kalibrierungs-Koeffizient ist nun  $16,2 \text{ Bq/m}^3$  (zuvor  $31 \text{ Bq/m}^3$ ), mit einer Standardabweichung von  $1,6 \text{ Bq/m}^3$  für die 25 Prototypen. Des Weiteren wurde eine neue Platine mit verbesserter Digitalelektronik entwickelt, welche eine vom PC unabhängige Spektroskopie erlaubt. Diese wird nun in den neuen Exposimeter-Prototypen verwendet, um in verschiedenen Mischkonzentrationen die Thoron Nachweisgrenze zu ermitteln.
- AP4.3: An bislang fünfzig Proben von Lehmbaustoffen wurden Exhalationsmessungen durchgeführt, um den Einfluss baulicher Maßnahmen auf die Exhalation bestimmen zu können. Die Messungen der Thoron-Exposition in acht Wohnhäusern wurden beendet und ausgewertet. Sie ergaben signifikante Thoron-Konzentrationen. In einem ausgewählten Haus soll eine mehrwöchige intensive Messkampagne durchgeführt werden. Passive Messungen in einigen weiteren Häusern werden derzeit vorbereitet.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeitspakete werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans weiter abgearbeitet. Beim letzten Workshop des Verbundes am 20./21. Juni 2013 in Neuherberg wurde die weitere Zusammenarbeit der Verbundpartner besprochen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>324.816,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Pflanzen- und Bodenprobennahme im Gelände wurde abgeschlossen. Die Laboranalysen werden aktuell statistisch ausgewertet um mögliche Muster in der SM/RN-Aufnahme zu bestimmen. (Der Biokonzentrationsfaktor im Screening 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. Die unterschiedliche Einlagerung von SM/RN in Pilzfruchtkörperteilen wird weiter untersucht, um unterschiedliche Mechanismen der Aufnahme, des Transports und der Einlagerung zu identifizieren. Dazu ist in einer Abschlussarbeit eine detaillierte Charakte-

risierung der unterschiedlichen Einlagerung in verschiedenen Geweben von Fruchtkörpern erfolgt, die Rückschlüsse auf Mechanismen der Einlagerung erlauben. Außerdem werden Guttationstropfen untersucht, die zur Ausscheidung extensiver Schwermetall/Radioisotopmengen dienen könnten. 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 müssen nun durch qRT-PCR verifiziert werden. Damit ist die Modellierung des Transfers in Pflanzen und Pilzen auf einem guten Wege.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Modellierung des Transfers von SM/R in biogeochemischen Barrieren
- Modellierung des Transfers in Pflanzen und Pilzen
- Mesokosmen mit standorttypischen Pflanzen belasteter Standorte
- Transkriptomdaten-Auswertungen zu Pilzen auf stabilen/strahlenden Cs-Isotopen
- Porenwassergewinnung an den Untersuchungsstandorten

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- Bizo ML, Formann S, Krause K, Rosu C, Kothe E. 2013. Resistance of young stresses caused by heavy metals such as Cs and Cd. *Env Eng Managem J* 12, 325-330.
- Costa JSD, Kothe E, Amoroso MJ, Abate CM. 2013. Overview of copper resistance and oxidative stress response in *Amycolatopsis tucumanensis*, a useful strain for bioremediation. In: *Actinobacteria. Application in bioremediation and production of industrial enzymes* (Amorosos MJ, Benimeli CS, Cuzzo SA, Eds.). CRC, Boca Raton, USA, pp 74-86.
- Haferburg G, Kothe E. 2013. Activation of silent genes in actinobacteria by exploiting metal stress. In: *Actinobacteria. Application in bioremediation and production of industrial enzymes* (Amorosos MJ, Benimeli CS, Cuzzo SA, Eds.). CRC, Boca Raton, USA, pp 1-25.
- Reinicke M, Schindler G, Roth M, Kothe E. 2013. Multi-metal bioremediation by micrial assisted phytoremediation. In: *Actinobacteria. Application in bioremediation and production of industrial enzymes* (Amorosos MJ, Benimeli CS, Cuzzo SA, Eds.). CRC, Boca Raton, USA, pp. 87-105.
- Sinerez ML, Kothe E, Abate CM. 2013. Cadmium bioremediation by a resistant *Streptomyces* strain. In: *Actinobacteria. Application in bioremediation and production of industrial enzymes* (Amorosos MJ, Benimeli CS, Cuzzo SA, Eds.). CRC, Boca Raton, USA, pp.122-135.
- Kothe E, Schlunk, I, Senftleben D, Krause K. 2013. Ectomycorrhiza-specific gene expression. In: *The Mycota XI. Agricultural applications* (Kempken F, Ed.). Springer, Heidelberg, in press.
- Phieler R, Voit Annetkatrin, Kothe E. 2013. Microbially supported phytoremediation of heavy metal contaminated soils – strategies and applications. In: *Geobiotechnology* (Schippers A, Glombitza F, Sand W, Eds.) Springer Heidelberg, in press.
- Knabe N, Jung E-M, Freihorst D, Hennicke F, Horton S, Kothe E. 2013. A central role for Ras1 in morphogenesis of the basidiomycete *Schizophyllum commune*. *Euk Cell* 12, in press.
- Schütze E, Miltner A, Nietzsche S, Achtenhagen J, Klose M, Merten D, Greyer M, Roth M, Kästner M, Kothe E. 2013. Live and death of *Streptomyces* in soil – what happens to the biomass? *J Plant Nutr Soil Sci*, in press.
- 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

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.03.2014  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>430.874,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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: Bodenproben wurden an weiteren 8 Standorten gewonnen, 3 sind zusätzlich für Ende Juli geplant. Damit ist die Entnahme von Bodenproben abgeschlossen. Die Gesamtzahl liegt dann bei 29 Flächen, auf denen jeweils Proben aus 5 Tiefenstufen zur Erstellung von Profilen gewonnen wurden bzw. werden.
- AP3: Die Probenahme von Niederschlag durch den Deutschen Wetterdienst wurde planmäßig Ende Februar 2013 beendet, die Probenahme an den Bundeswasserstraßen durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde lief Ende März 2013 aus.

- AP4: Die Aerosolsammlung an den vier ausgewählten Standorten wurde bis Ende Februar (Offenbach, Potsdam) bzw. Ende Juni (Braunschweig, Freiburg) fortgesetzt.
- AP5: Für die Aufarbeitung der Proben wurden weiterhin die etablierten Verfahren eingesetzt.
- AP6: Es wurden an der ICP-MS bisher 95 Bodenproben, 108 Filterproben und 201 Wasserproben sowie 8 Schneeproben und an der AMS insgesamt 95 Bodenproben, 138 Filterproben und 371 Wasserproben sowie 8 Schneeproben gemessen. Weitere ICP-MS Messungen werden zurzeit durchgeführt, die nächsten Messungen an der AMS werden im September 2013 erfolgen.
- AP7: Bei der Messung der Bodenproben ergab sich für fast alle Proben, dass der größte Teil des  $^{129}\text{I}$  in den oberen 10 cm zu finden ist. Die Errechnung der Gesamtdeposition in den Proben ergibt, ähnlich wie beim Regen, ein Gefälle von Norden nach Süden bzw. von Westen nach Osten. Der höchste Wert wurde mit  $741 \text{ mBq m}^{-2}$  für Norderney berechnet, in Breungeshain (Hessen) finden sich  $424 \text{ mBq m}^{-2}$ , in Potsdam dagegen nur  $164 \text{ mBq m}^{-2}$  und in Nürnberg  $201 \text{ mBq m}^{-2}$ .  
Bei den Flusswasserproben zeigen sich ebenfalls etwas höhere  $^{129}\text{I}$ -Werte im Norden  $169 \text{ fg kg}^{-1}$  (Geeste/Ems) und Westen  $154 \text{ fg kg}^{-1}$  (Wesel/Rhein) als im Süden  $28 \text{ fg kg}^{-1}$  (Regensburg/Donau) und Osten  $43 \text{ fg kg}^{-1}$  Dresden/Elbe).  
Die Messungen der Aerosolfilterproben bis Februar 2012 ergaben für die Proben aus Norddeutschland erwartungsgemäß höhere  $^{129}\text{I}$ -Konzentration als für die aus Süddeutschland: sie lagen im Monatsdurchschnitt in Braunschweig bei max.  $0,62$  und in Potsdam bei  $0,77 \text{ fg m}^{-3}$ ; in Offenbach lag der entsprechende Wert bei  $0,50 \text{ fg m}^{-3}$ , auf dem Schauinsland wurden max.  $0,19 \text{ fg m}^{-3}$  gefunden.  
Die inzwischen gemessenen Schneeproben weisen wiederum stark unterschiedliche Ergebnisse auf, die  $^{129}\text{I}$  Gehalte lagen bei  $66 \text{ fg kg}^{-1}$  bzw.  $583 \text{ fg kg}^{-1}$  und die daraus resultierenden Isotopenverhältnisse bei  $203 \cdot 10^{-9}$  bzw.  $1538 \cdot 10^{-9}$ .

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Die letzten 3 Bodenprobenahmen sind für Ende Juli 2013 geplant. Parallel zu den  $^{127}\text{I}$ - und  $^{129}\text{I}$ -Bestimmung werden weiterhin entsprechende bodenkundliche Parameter (pH,  $C_{\text{org}}$ , Gehalt an Fe-, Al-, Mn-oxiden, Korngrößenanalyse) untersucht.
- Bereits gesammelte Proben werden für die Analyse vorbereitet.
- Die Messungen an der ICP-MS und der AMS und deren Auswertung werden fortgesetzt.
- Die für die Schneeproben gemessenen Werte werden mit den entsprechenden Klimadaten abgeglichen.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- 1 Vortrag bei der DPG-Frühjahrstagung 18.-22. März 2013 in Hannover
- 1 Vortrag beim 7. RCA-Workshop 10.-11. Juni 2013 in Dresden
- 1 Posterbeitrag beim 7. RCA-Workshop 10.-11. Juni 2013 in Dresden

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Forschungszentrum Jülich GmbH, Leo-Brandt-Straße, 52428 Jülich  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>140.493,20 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Hofmann                  |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Forschungsprojekt "Strahlenschutz und Umwelt: Radionuklide in der Umwelt, ihren Transport in die Lebensmittel-Kette, deren Biocinetics im Menschen" ist in vier Projekte unterteilt. Das Projekt 2 konzentriert sich auf "Prozesse an der Schnittstellen Pflanzen-Mikroben und der Transport von RN in Pflanzen und in die Nahrungskette. Das Projekt 2 ist weiter in vier Arbeitspakete verteilt. Work Package 2.1 ist unter dem Titel "Einfluss von Biofilmen auf das Migrationsverhalten von Uran und Americium in der Umwelt" und der Fokus der Work Package 2.2 ist "Mikrobielle Prozesse der Mobilisierung und Immobilisierung (von Schwermetallen) im Boden." Arbeitspaket 2.3 befasst sich mit der "Mechanismen der Blattaufnahme von Radionukliden in Pflanzengewebe". Und das Arbeitspaket 2.4 von Agrosphäre (IBG-3) des Forschungszentrums Jülich beteiligt sich mit dem Titel "Verfügbarkeit von Radionukliden in Böden – Effekte von Bodenmanagement und Klimawandel". Dieses Arbeitspaket berücksichtigt die nachhaltige Nutzung der Böden für die Nahrungs- und Futterproduktion. Um dieser neuen Herausforderung zu überwinden und die wachsenden Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit Anforderungen als Folge der steigenden Bevölkerung gerecht zu werden, bedarf es für den Boden-Management-Systeme zu verbessern.

Es wird das Verhalten der Radionuklide (RN, z. B. Cs-134, Cs-137 oder Sr-90, Sr-85) in Bodensystemen desselben Typs mit unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung untersucht. Eine bodenschonende Minimierung der Bodenbearbeitung wird dazu beitragen, dass Bodenverlust durch Erosion reduziert wird. Eine solche Bodenbearbeitung in Kombination mit der Anwendung von Mulch verändert die Eigenschaften der organischen Substanz des Bodens sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen/Radionukliden. Darüber hinaus sind extreme Wetterbedingungen auf Grund des Klimawandels zu erwarten. Extreme Feuchtewechsel werden die natürlichen Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe verändern und sich so in noch unbekannter Weise auf die Mobilisierung von Radionukliden in der Bodenmatrix auswirken.

Eine Vernetzung mit dem Arbeitspaket *Microbial Processes of Sequestration and Mobilization in Soil* (Prof. Kothe, Jena) ist vorgesehen.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

In diesem Arbeitspaket wird das Verhalten ausgewählter Radionuklide in verschiedenen Bodenbewirtschaftungssystemen im Hinblick auf Zugänglichkeit, Transport und Pflanzenaufnahme beleuchtet.



### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

The radionuclides application to the lysimeter soils was completed in March 2013; also the seasonal crop (summer wheat) was sown simultaneously. For this, the top 3 cm soil was removed from both parts of each lysimeter and seeds were placed manually in equidistance rows of 9 cm apart from each other. One third of the removed soil was spread directly over the seeds and 2/3 soil was used for radionuclides application. For soil contamination, the radionuclide solution was applied on 100 g lysimeter soil (combusted at 600 °C) and left for drying overnight. Next day, this 100 g soil was ground using mortar and pestle and then mixed to the remaining lysimeter soil (about 30 Kg) in several steps in a *Rhönradmischer*. The contaminated soil was spread over the 1 cm non-contaminated soil. To probe the movement of water in lysimeter soils, a conservative water tracer (Potassium Bromide, KBr) was also applied on lysimeter soils with the help of a hand sprayer.

The soils incubated with different application rates of biochar and digestate have been characterized for various soil parameters (pH, conductivity,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , TOC, TC, TON, TN, H and S). Presently, the incubated soils are being used for sorption experiments at room temperature to realize the effect of organic amendment on sorption kinetics of cesium and strontium. Preliminary studies revealed that a soil/solution ratio of 1/5 and a shaking time of 24 hrs are appropriate for maximum sorption, which is being used for detailed sorption experiments.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Harvesting of summer wheat in August, 2013 and radioactivity measurement in plants and soil to calculate transfer factors (TFs) - to realize the effect of organic amendment on soil-plant transfer of applied radionuclides.
- Sowing of next seasonal crop (Indian mustard and sun flower) in Aug/Sep, 2013 and March/April, 2014, respectively- continuation of transfer factors (TFs) determination for different crops.
- Sorption/desorption experiments with soils amended with biochar and digestate at different temperatures to simulate the conditions to the changing environmental effects.
- 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 soils.
- Bromide tracer tracking with suction cups and leachate sampling.
- Harvesting of Indian mustard and sun flower and radioactivity measurement in plants and soil to calculate the transfer factors (TFs).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>351.591,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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

Die zeitaufgelöste Laserfluoreszenzspektrometrie ist für die Untersuchung der Bindungsform fluoreszierender radioaktiver Schwermetallionen wie U(VI) wegen ihrer exzellenten Empfindlichkeit eine unverzichtbare Methode. In organischer Matrix biologischer Proben wird die Fluoreszenz dieser Ionen bei kontinuierlicher Laseranregung jedoch durch die sehr intensive Fluoreszenz organischer Stoffe – die ja ständig mit angeregt werden - stark gestört. Die Ausschaltung dieser störenden Fluoreszenz organischer Stoffe über das Ausnutzen der unterschiedlichen Lebenszeit von Metallfluoreszenzen und Fluoreszenzen organischer Stoffe mittels Entwicklung eines verfeinerten Messsystems ist Inhalt dieses Arbeitspaket-Teiles. Es wurde dazu ein quasi gepulster Strahl geschaffen, indem mittels eines akusto-optischen Modulators (AOM) ein 80-MHz-Laserstrahl alternierend, in einer Frequenz von 100 kHz, für je 2  $\mu$ s zur Probe hin ge-

beugt wurde. Mittels einer an ein Oszilloskop angeschlossenen Photodiode kann diese quasi gepulste Laserstrahlung überprüft, und mittels Delay-Generatoren genau eingestellt werden. Frequenzverdrehung und -verdopplung mit den optischen Aufbauten (Harmonixx/APE und Inspire/Newport) schaffen einen Wellenlängenbereich von 230-1020 nm, innerhalb dem die Probe so quasi gepulst angeregt werden kann. Mit einer Single Photon Avalanche Diode werden die daraufhin von der Probe ausgehenden Fluoreszenzsignale detektiert und in einem Multichannel Picosecond Event Timer & TCSPC Module im Verhältnis zur Anregung in ein Histogramm geordnet, welches dann die zeitliche Abklingkurve der Fluoreszenz beschreibt. So gelang es, die Fluoreszenzlebenszeitkurve von U(VI) Spezies, die sich an der Oberfläche der Protozoen *Euglena Mutabilis* haften, zu ermitteln. Diese Kurve wies anfänglich eine schnell abfallende Fluoreszenz auf, die in eine deutlich langsamer abfallende Fluoreszenz überging. Das spricht für einen schnell abfallenden Anteil von Fluoreszenz, der von organischen Stoffen hervorgerufen wird sowie einen langsamer abklingenden Fluoreszenzanteil, der von Uranylspezies in und auf *Euglena* Zellen stammt. Die Lebenszeit der von Organika verursachten Fluoreszenz betrug nur 35 ns, die der Fluoreszenz der Uranylspezies 24  $\mu$ s, was auf phosphatische Bindungsform des Urans hindeutet. Mittels Variieren des Zeitpunktes des Öffnens der SPAD gegenüber der Laseranregung kann die störende Fluoreszenz organischer Stoffe nun ganz aus der Fluoreszenzlebenskurve herausgehalten werden.

Seit 2010 wird das ehemalige Uran-Bergwerk Königstein kontrolliert geflutet. Die Schächte unter Tage sind seitdem unzugänglich. Um die Artenvielfalt der Mikroorganismen darin zu untersuchen, wurden drei verschiedene Systeme zur Gewinnung der „unter Tage-Mikroorganismen“ eingesetzt. Zum einen wurde das Grubenwasser filtriert (10 Liter), andererseits wurden die bewachsenen Objektträger aus der Flusszelle und die Träger aus dem *in-situ* Reaktor zur mikrobiellen Analyse genutzt. Quantitativ wurden die Mikroorganismen mittels CARD-FISH (siehe Bericht Januar 2013) analysiert. Molekularbiologische Methoden wie z. B. PCR und Pyrosequenzierung wurden zur qualitativen Analyse der vorkommenden Mikroorganismen-Arten des Grubenwassers durchgeführt. Dabei konnten die auftretenden Mikroorganismen vor und nach Flutung der Grube verglichen werden. Vor Flutung der Grube im Jahre 2010 dominierte die Bakterienart *Ferrovum myxofaciens*, die zu den Betaproteobacteria gehört. Weitere häufig vorkommende Arten waren vor der Flutung *Acidithiobacillus ferrooxidans* und *Leptospirillum ferrooxidans*. Nach der Flutung hat sich die Zusammensetzung der Arten deutlich verschoben. Im Grubenwasser aus dem Jahr 2012 dominieren Arten der Gruppe Gammaproteobacteria z. B. *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Die einst in den Biofilmen dominierende Art *Ferrovum myxofaciens* konnte im gefluteten Grubenwasser nicht mehr detektiert werden. Der Sauerstoffgehalt von nur 1mg/L ist höchstwahrscheinlich der Grund für die Verschiebung. Dominierende Archaea nach der Flutung sind Thermoplasmata (<90 %) mit dem Vertreter *Ferroplasma sp.*

Am deutlichsten ist die Veränderung vor und nach der Flutung bei der Zusammensetzung der Eukaryonten-vielfalt. Nach der Flutung sind nur noch wenige verschiedene Arten der Gruppen Fungi, Alveolata und Amoebozoa nachweisbar. Vor der Flutung war ein breites Spektrum von Arten der Gruppen Flagellaten (*Bodo saltans*), Ciliaten, Amoebozoa (*Vannella*, *Vahlkampfia*), Rotatoria, Fungi uvm. in den unter Tage-Biofilmen detektiert worden. Das Artenspektrum der drei Systeme zur Gewinnung von Biomasse unterschied sich leicht. Im Biofilm-Reaktor haben sich die, im Wasser dominanten, *Acidithiobacillus ferrooxidans*-Bakterien auch als dominierende Gemeinschaft an die Reaktor-Träger angesiedelt. An den Objektträgern der Flusszelle dagegen bildeten Vertreter der Gruppe Alphaproteobacteria den Hauptteil der Biofilm-Gemeinschaft. Bei den Archaea war in allen drei Systemen die Thermoplasmata-Gruppe dominant im Biofilm vertreten.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

Nach Untersuchung der Diversität soll die RNA-Extraktion mit anschließender Sequenzierung dazu dienen, die stoffwechselaktiven Mikroorganismen des Grubenwassers zu detektieren. Die Interaktion von Biofilmen im *in-situ* Reaktor mit Metallen und Radionukliden solle anschließend analysiert werden. Dabei wird besonders die Zusammensetzung/Chemie des abfließenden Wassers am Reaktor unter dem Einfluss der Biofilme berücksichtigt.

Nachdem mit dem neuen Laser-Messsystem Fluoreszenz-Lebenszeitkurven ermittelt werden konnten, soll mit einer zusätzlich zwischen geschalteten, zeitaufgelöst detektierenden CCD-Kamera die zeitliche spektrale Änderung des Fluoreszenz-Signales aufgezeichnet werden. Die Einkopplung der Laseranregung ins Konfokale Mikroskop (CLSM) wurde erreicht – die Auswahl optimaler Mikroskop-Objektive, die sowohl die Laseranregung als (in Gegenrichtung) auch die Fluoreszenz in ausreichendem Maße passieren lassen, ist noch abzuschließen.

#### 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><br>Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.,<br>Bautzner Landstr. 128, 01328 Dresden                                 |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015G</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>247.200,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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: Eine erneute Literaturrecherche zur  $^{226}\text{Ra}$ -Analytik in Ausscheidungen hat eine neue Möglichkeit zur verbesserten Anreicherung aus Urinproben eröffnet.
- AP3:  $^{226}\text{Ra}$ : Bei der Übertragung der Methode auf reale Ausscheidungsproben werden Ausbeuteschwankungen zw. 5 und 80 % beobachtet, was auf die stark variierende Zusammensetzung aufgrund individueller Ernährungs- und Stoffwechselunterschiede zurückzuführen ist. Durch die Untersuchung einer alternativen Anreicherungsmethode mit  $\text{TiOCl}_2$  soll die Robustheit der Trennmethode vor allem für Ra erhöht sowie der störende Einfluss von Calcium, Mangan und Phosphat reduziert werden. Erste Versuche sind sehr erfolgversprechend.
- AP4/5: Die Analysen der Ausscheidungsproben der Arbeiter sind nahezu abgeschlossen: ca. 150 von 180 Werte. Zur Bestimmung von  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$  in den Stuhlproben wurde neben der alphaspektrometrischen Methode die Gammaspektrometrie erfolgreich angewandt.  
Im Februar 2013 wurde die Probandenstudie der Referenzgruppe nicht strahlenexponierter Personen in München durchgeführt, an der 6 Personen teilgenommen haben. Es wurden ca. 72 Proben gesammelt, an denen ca. 360 Werte ermittelt werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Literaturrecherche wird fortgesetzt, um weitere Informationen in die Methoden-optimierung einfließen zu lassen. Für ein detailliertes Verständnis von Aufnahme- und Ausscheidungsraten sind ebenfalls weitere Literaturrecherchen notwendig, um den Einfluss eines evtl. vorhandenen Körperdepots auf die Ausscheidungsraten beurteilen zu können.
- AP3: Das für  $^{226}\text{Ra}$  bestehende Problem der Calciumabtrennung wird weiter optimiert. Die Fällungsreaktion mit  $\text{TiOCl}_2$  ist auch für  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  und  $^{228}\text{Th}$  zu testen, um weiterhin eine sequentielle Analyse aller interessierenden Radionuklide aus einem Probenaliquot realisieren zu können. Das sequentielle Verfahren wird an geeigneten Proben- und Referenzmaterialien getestet.
- AP4/5: 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 beide Probandengruppen werden durchgeführt (ca. 360 Analysen und 20 QS-Analysen).

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Die Ergebnisse für die laufende Methodenentwicklung und der Ablauf der Probandenstudie in der Berufsgruppe wurden in einem Kurzvortrag auf dem KVSF-Workshop am 20./21.06.2013 in Neuherberg (HMGU) vorgestellt.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 015H</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.08.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>113.639,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Fischer                  |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Projekts ist die Erfassung und Modellierung des Transports nuklearmedizinisch angewandter Radioisotope im städtischen Abwassersystem und im daraus beaufschlagten Fließgewässer in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Vorgesehenes Untersuchungsgebiet ist die Stadt Bremen mit dem Fluss Weser. Die Ergebnisse sind für die Prognose der Radionuklidausbreitung nach einem Eintrag im städtischen Bereich und möglicherweise auch für Emissionen aus kerntechnischen Anlagen anwendbar. Innerhalb des Teilprojektes A sind Kooperationen mit den anderen Arbeitspaketen, insbesondere zu AP1.1 (städtisches Kanalsystem) und AP1.2 (Verhalten von Iod in Wasser und Sediment) vorgesehen.

Das Projekt ist ein Folgevorhaben von universitätsinternen Forschungsprojekten.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

### *Teilprojekt A (Abwasser)*

Zu- und Ablauf der größten städtischen Kläranlage sollen in einer mehrwöchigen Kampagne kontinuierlich beprobt und Zeitreihen der Radionuklidkonzentrationen gammaspektroskopisch ermittelt werden. Gleichzeitig soll der Eintrag der Isotope anhand von mittleren Untersuchungszahlen (Diagnostik) bzw. individuellen, anonymisierten Patientendaten (Therapie) erhoben werden. Hieraus soll ein einfaches räumliches und zeitliches Modell des Abwasserpfades und der Kläranlage erstellt werden.

### *Teilprojekt B (Fließgewässer)*

In einer zweiten Kampagne sollen Sedimentproben aus der Weser entnommen (Längs- und Querprofile) und auf medizinische und weitere Isotope untersucht werden. Aus den ermittelten Konzentrationen und den aus Teil A gewonnenen Eintragungswerten soll ein Ausbreitungs- und Depositionsmodell für  $^{131}\text{I}$  im Fließgewässer erstellt werden. Daten für  $^{137}\text{Cs}$  und  $^7\text{Be}$  werden nach eigenen Voruntersuchungen hierbei hilfreich für die Ermittlung der Verdünnung im Tidenbereich der Weser sein.

### *Teilprojekt C*

Die in Teil A und B erstellten Modelle sollen anhand eines Vergleichs der hydrologischen Daten mit denen anderer Lokalitäten verallgemeinert und so eine überregionale Gültigkeit angestrebt werden. Eine Validierung kann ansatzweise anhand der in IMIS erhobenen Daten zur Umweltradioaktivität (zu denen das Labor beiträgt und auf die es bundesweiten Zugriff hat) erfolgen. Weiterhin soll ein Vergleich der Ergebnisse mit denen aus derzeit angewandten hydrologischen Ausbreitungsmodellen wie RODOS/RIVTOX erfolgen. Im Fall einer erfolgreichen Implementierung des Abwassermodells aus AP1.1 kann dieses numerische Modell zusätzlich verwendet und anhand der erhobenen Daten validiert werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Die im letzten Berichtszeitraum entwickelte Methode zur Fällung von organisch gebundenen  $^{131}\text{I}$  in Oberflächenwasser mit Hilfe von Kationen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) konnte mit Abwassern aus 4 verschiedenen Kläranlagen weiter untersucht werden.
- Für die Methode zur Fällung von anorganisch gebundenen  $^{131}\text{I}$  in Oberflächenwasser wurden weitere Versuche zur Abhängigkeit der Iod- Ausbeuten von Parametern wie pH-Wert, Salinität und Leitfähigkeit durchgeführt.
- Es fand ein Laborbesuch bei Projektpartnern des IRS in Hannover im Januar 2013 statt, die ihre Aufbereitungsverfahren für die Messung von  $^{127}\text{I}$  und  $^{129}\text{I}$  in Fließgewässern demonstrierten. Zusätzlich werden im IRS Bentonite modifiziert, die bei Fällungsmethoden von  $^{131}\text{I}$  eingesetzt werden können. Proben davon werden zurzeit in der Universität Bremen getestet.
- Ein weiterer Laborbesuch erfolgte bei Projektpartnern des Helmholtzzentrums München im Rahmen des Projekttreffens im Juni 2013 auf der Zugspitze. Im Schneefernerhaus wird ein Gammaskpektrometer mit einer speziellen Abschirmung betrieben, welches in ähnlicher Bauweise auch in der Universität Bremen angeschafft werden soll. Hier fand ein Erfahrungsaustausch bezüglich der Messtechnik in der Gammaskpektroskopie statt.
- Gegenseitige Laborbesuche und Erfahrungsaustausch mit dem städtischen Kanalnetz- und Kläranlagenbetreiber haben stattgefunden. Diese sind sowohl für KVSF-II als auch für die im Transaqua-Verbund beantragten Projekte wichtig. Die schon bestehende Kooperation wurde vertieft und es besteht auf beiden Seiten starkes Interesse an weiteren gemeinsamen Arbeiten im Bereich der Umweltradioaktivität.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die vorgesehenen Messungen im städtischen Kanalnetz konnten bisher nicht durchgeführt werden, da zum geplanten Zeitpunkt keine Patienten in der kooperierenden Radioiodstation behandelt wurden. Die Kampagne beruht auf Einträgen von entlassenen Patienten in das Kanalnetz und wegen der kurzfristigen Einweisungen und Entlassungen ist sie im Voraus nicht absolut sicher planbar. Ein neuer Versuch soll im Spätsommer 2013 gestartet werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Es sind Beiträge zu diesem Projekt auf folgenden Tagungen/Konferenzen präsentiert worden:

Es wurde ein Vortrag mit dem Thema "Verfahren zur Bestimmung von  $^{131}\text{I}$  in Fließgewässern" im Rahmen des 15. Fachgesprächs zur Überwachung der Umweltradioaktivität vom 5. bis 7. März 2013 in Bremen gehalten.

Zu diesem Vortrag wurde ein Artikel für den Tagungsband des 15. Fachgesprächs zur Überwachung der Umweltradioaktivität eingereicht.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz,<br>Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz                              |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 016A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.851.937,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 prädiaktivem 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 Malignomerkrankungen 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: Nachweis molekularer Marker der Autophagie in der Glioblastomzelllinie LN-229. Bestimmung der Induktion von Autophagie, Seneszenz, "Mitotischer Katastrophe", Apoptose und Nekrose 96 h nach Bestrahlung (10 Gy) (120 h für Apoptose/Nekrose). Induktion der DNA-Doppelstrangbrüche (DSBs) mit Detektion (Western Blot) der phosphorylierten Form von H2AX (45 min - 12 h und 24-144 h). Reparatur der DSBs überwiegend 8-12 h



- nach Bestrahlung. Anstieg des  $\gamma$ H2AX Signals nach 48-72 h. Dies kann den späten Eintritt der verschiedenen Zelltod- und Überlebensmechanismen nach Bestrahlung erklären.
- TP2: Bisher wurden 45 Mamma- und 25 Prostatakarzinompatienten (Teilkörperbestrahlung) sowie 5 Patienten mit akuten Leukämien (Ganzkörperbestrahlung) in die Studie eingeschlossen. Mittels gamma-H2AX Foci Quantifizierung konnten direkt nach einer Strahlenexposition die theoretischen äquivalenten Ganzkörperdosen erfolgreich abgeschätzt werden. Zytogenetische Analysen liefern zu späteren Zeitpunkten nach der Exposition ( $\geq$  1Tag) relevante Ergebnisse.
- TP3: Beginn der Asservierung der Rektumkarzinom-Biopsien aus Mainz (1 Biopsie seit 01/12). In Kooperation mit der Neurochirurgie der Unimedizin (Prof.Dr.Giese) insgesamt 40 Glioblastom-Biopsien mit bestätigter Diagnose asserviert. Biolumineszenz-Messungen zur ATP, Laktat, Glukose Bestimmung an (33/40) Biopsien durchgeführt oder Material für die Messungen am Mikrotom geschnitten. Immunhistochemische Färbungen gegen CD45 und HE durchgeführt. 57 Rektumbiopsien vom Darmkrebszentrum Regensburg erhalten und analysiert. Durchführung von Immunfluoreszenzfärbungen gegen die beiden jeweils wichtigsten Membrantransporter für Glukose (GLUT-1 und GLUT-3) und für Laktat (MCT-1 und MCT-4).
- TP5: Die humanen Krebszelllinien Caco2 und Panc1 mit Überexpression von IGF1R wurden stabil mit einer dominant negativen Mutation des IGF-1R transfiziert. Das hat zur Folge, dass bei einer Bindung an den IGF-1R unverändert erfolgen kann, die Signaltransduktion jedoch unterbunden wird. Bestrahlung der Zellen mit Gammastrahlung (0-10 Gy). Bestimmung der Vitalitäten nach 2-4 Tagen. In beiden Zelllinien reagierten die Zellen mit gestörter IGF1R-Signaltransduktion sensitiver auf die Strahlenexposition. Ermittlung einer Reduktion des LD50 von 2-2,3 Gy bei den transfizierten Zellen. Dieser Effekt soll nun in vivo untersucht werden.
- TP6: Die Rekrutierung wurde fortgeführt. Zusätzlich auftretende, logistische Probleme konnten aufgefangen und mit alternativen Lösungsansätzen gelöst werden. Insgesamt liegen nun die Daten von 7 Kliniken vor. Die Rekrutierung von Kliniken wurde für 24 von 25 abgeschlossen. Die Auswertestrategie wurde festgelegt. Alternative Ansätze zur Gewinnung von Organdosen wurden mit internationalen Kollegen besprochen.
- TP7: Die Rekrutierung der Kontrollen der molekular-epidemiologischen Fall-Kontroll-Studie KIKME in der Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz läuft. Die ausgefüllten Fragebögen und die aus Hautbiopsien kultivierten Zelllinien von 7 Kontrollen ohne Krebserkrankung liegen vor.
- TP8: Fortbildungsveranstaltung, Strahlenkolloquium IMBEI 31/01/13.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- TP1: Analysen zur Klärung der downstream Signalmolekülen von ATM, die zur Induktion von Autophagie nach Bestrahlung führen. Mechanismen der Induktion der „zweiten Welle“ von DSBs nach Bestrahlung und Nachweis, dass diese für die Induktion von Zelltod- und Überlebensmechanismen notwendig ist.
- TP2: Weiterhin Rekrutierung und Untersuchung von Tumorpatienten mit unterschiedlichen Tumorentitäten vor und nach der Radiotherapie und Vergleich verschiedener Bestrahlungstechniken.
- TP3: Durchführung der immunhistochemischen Färbungen (MCT1, MCT4, GLUT1, GLUT3) an dem bis dahin vorhandenen Biopsiematerial. Erweiterung des immunhistochemischen Färbepanels für Glioblastome um CD147 /IDH-1 als potentiell mutierten Marker. Korrelation der mittels Biolumineszenz und Immunhistochemie generierten Daten mit den Patientendaten.
- TP5: Innerhalb der nächsten Monate sollen in vivo Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu werden CD1Nü-Mäusen Zellen der IGF1-R Mutante subcutan injiziert. Der angewachsene Tumor wird einer Bestrahlung unterzogen. Das Tumorstadium mit und ohne Bestrahlung der IGF1-R Mutante im Vergleich zu den nicht transfizierten Zelllinien soll Aufschluss über die Strahlensensitivität in vivo geben.
- TP6: Abschluss der Datenerhebung, Abgleich mit dem Krebsregister, Gewinnung von Organdosen. Umsetzung der Auswertestrategie und Auswertung der Daten.
- TP7: Rekrutierung weiterer Kontrollen ohne Krebserkrankung. Einholung des GPOH-Votums (Gesellschaft für Pädiatrische Onkologie und Hämatologie) zur Rekrutierung von Probanden über das DKKR. Fertigstellung des Datenmanagements.

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- 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*, 2013; 8 (1)
- Seidenbusch M.C., Schneider K.: Anthropometry of paediatric patients and of the mathematical MIRD phantoms applied for dose reconstruction (ISIMEP research project of the Federal Republic of (Germany), Förderkennzeichen 02NUK016A). *Pediatr Radiol* 2013; 43 (Suppl 3): S527
- Walenta, S., Voelxen, N., Sattler, U., Mueller-Klieser, W.: Localizing and Quantifying Metabolites In Situ with Luminescence: Induced Metabolic Bioluminescence Imaging (imBI). *Neuromethods* (in press).

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Klinikum der Universität München, Lindwurmstr. 2a, 80337 München  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 016B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>285.788,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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

- AP1: Die Anwendung des Dosisrekonstruktionsalgorithmus auf die CT-Datensätze erfordert die Definition anatomischer Landmarken, als welche nun aufgrund ihrer geringen interindividuellen Varianz definitiv die Abschnitte des Achsenskeletts festgelegt wurden. Anatomische Landmarken wurden inzwischen bei ca. 1.600 Patienten anhand visueller Auswertung der Bilddatensätze identifiziert.

- AP2: Gleichzeitig wurde die Strahlenexposition durch das Topogramm (synonym: Scanogramm, Scout view) bei der CT-Untersuchung des Thorax durch jeweils individuelle Monte-Carlo-Simulationen bei 1.400 Patienten nun unter Berücksichtigung der individuellen Expositionsgeometrien ermittelt. Wie gezeigt werden konnte, wurden am DvHK im Rahmen von Topogrammen der Thoraxregion in der Regel Effektivdosen zwischen 0,5 und 1 mSv appliziert.
- AP3: Folgende weitere rechnergestützte Analysen der Bilddatensätze und der zugehörigen DICOM-Daten mit dosimetrischer Relevanz werden derzeit vorgenommen: (a) Bestimmung der anatomischen und metrischen Abweichung zwischen Topogramm-Länge und wahrer Scan-Länge sowie der hierbei applizierten Strahlendosen bei Topogrammen der thoraco-abdominalen und abdominalen Region anhand visueller Auswertung. (b) Volumetrie der Brustdrüse bei Patienten bis zum vollendeten 7. Lebensjahr.
- AP4: Zur Dosisrekonstruktion im Rahmen des Gesamtprojektes wurde die Entwicklung eines gemäß dem Informationsgehalt der Patientendatensätze abgestuften Dosisrekonstruktionsverfahrens fortgeführt. Aufgrund des großenteils dosimetrisch sehr reduzierten Informationsgehaltes der bundesweit erhobenen Datensätze zur CT-Exposition wurden folgende Maßnahmen getroffen: (a) 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; (b) sukzessiver Aufbau einer CT-Scanner-Datenbank zur Erfassung der Standard-Expositionsparameter der CT-Scanner diverser Hersteller; (c) Berechnung geräte- und untersuchungsspezifischer CT-Konversionsfaktoren, vorläufig unter Vernachlässigung der Formfilterung; (d) erste Erprobung einer Rekonstruktion von Organ- und Effektivdosen für den zum Berichtszeitpunkt vorliegenden Datenbestand.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Komplettierung der Datenbank anatomischer Landmarken
- Ausbau der CT-Scanner-Datenbank
- Ermittlung weiterer geräte- und untersuchungsspezifischer Konversionsfaktoren
- Validierung der rekonstruierten Organ- und Effektivdosen

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Seidenbusch MC, Schneider K. Anthropometry of children and mathematical phantoms applied to dose reconstruction in paediatric radiology. *Insights Imaging* 2013; S316

Schneider K, Teusch V, Seidenbusch MC. Radiation exposure during scanograms (scoutviews) in paediatric computed tomography (CT). *Insights Imaging* 2013; S316

Seidenbusch MC, Teusch V, Kammer B, Stahl R, Becker HC, Schneider K. Strahlenexposition durch Topogramme in der pädiatrischen Computertomografie (ISIMEP-Projekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 02NUK016A). *Fortschr Röntgenstr* 2013; 185 - VO106

Seidenbusch MC, Schneider K. Anthropometry of paediatric patients and of the mathematical MIRD phantoms applied for dose reconstruction (ISIMEP research project of the Federal Republic of Germany), Förderkennzeichen 02NUK016A). *Pediatr Radiol* 2013; 43 (Suppl 3): S527

Seidenbusch MC, Schneider K. Radiation exposure of the mammarian glands in paediatric high resolution computed tomographic (HRCT) examinations. (ISIMEP research project of the Federal Republic of Germany), Förderkennzeichen 02NUK016A) *Pediatr Radiol* 2013; 43 (Suppl 3): S527

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung<br>GmbH, Achterstr. 30, 28359 Bremen                             |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 016CX</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C |   |  |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2012 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>52.133,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Die verbleibende PACS Erhebung konnte am Standort Hannover im Januar 2013 abgeschlossen werden.

Die Datenerhebung an der fünften Klinik in Bremen gestaltete sich auch im 1. Halbjahr 2013 aufgrund mangelhafter Kooperationsbereitschaft auf Seiten der IT-Abteilung des Klinikums als äußerst schwierig. Kontaktaufnahmen und Zusagen zur Datenerhebung wurden erneut verschoben. Jedoch konnte im Mai 2013 ein Durchbruch in der Zusammenarbeit erzielt werden, so dass die Klinikdaten in den letzten beiden Juniwochen 2013 erhoben wurden.

Die finale Aufbereitung der Klinikdaten begann Anfang 2013 für die bereits erhobenen Standorte (Lübeck, Göttingen, Hannover, Oldenburg). Die aufbereiteten Daten wurden zwischen März und Juni 2013 an das Gesamtstudienzentrum in Mainz übermittelt.

Ergebnisse:

Die Datenerhebung in den fünf Kliniken am Studienzentrum Nord (BIPS) ist zu 100 % beendet. Im Januar 2013 konnte die PACS Erhebung am Standort Hannover abgeschlossen werden. Für weitere 1.229 Patienten mit insgesamt 7.717 Untersuchungen konnten Dosimetrie-Informationen erhoben werden. Die Datenextraktion am Klinikum Bremen-Mitte wurde im Juni 2013 abgeschlossen. Es konnten zusätzliche 1335 Patienten mit ca. 1.800 Untersuchungen aus den RIS-Daten in die Kohorte aufgenommen werden. Der Kohortenbeitrag am Studienzentrum Nord beträgt nach Abschluss aller Erhebungen 18.247 Patienten.

Die finale Aufbereitung der Klinikdaten erfolgte für die bereits abgeschlossenen Standorte (Lübeck, Göttingen, Hannover, Oldenburg) im 1. Halbjahr 2013. Die Datenübermittlung an das Gesamtstudienzentrum in Mainz wurde zwischen März und Juni 2013 durchgeführt.

Die Aufarbeitung und Übermittlung der RIS-Daten aus dem Klinikum Bremen-Mitte an das Gesamtstudienzentrum erfolgte Anfang Juli 2013.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Das Pooling der gesammelten Daten beider Studienzentren für die gemeinsame Auswertung ist zum Zeitpunkt der Berichtserstellung in den finalen Vorbereitungen.

Zeitgleich werden weiteren Arbeiten für eine Verknüpfung der Kohortendaten mit Gemeinde-/Landkreisziffern vorbereitet, um auf diesen Aggregationsebenen im Anschluss weitere Analysen durchzuführen.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 016D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ISIMEP - Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.09.2010 bis 31.12.2013  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>532.606,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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

*API (TP4)*: Innerhalb des letzten Berichtszeitraumes konnte die Optimierung der Versuchsbedingungen zur sensitiven Messung des G2/M-Checkpoints erfolgreich abgeschlossen werden. Gleichfalls wurden die immunfluoreszenzmikroskopischen Experimente mit allen vorliegenden Zelllinien der GenKIK-Studie durchgeführt sowie das Scanning und die darauf folgende Bildanalyse und Zelldetektion vollständig abgeschlossen. Im aktuellen Berichtszeitraum wurde die Auswertung der Rohdaten und deren statistische Analyse fortgesetzt. Die bis zum jetzigen Zeitpunkt ausgewerteten Daten weisen auf eine ausgeprägte interindividuelle Variation der G2/M-Checkpoint-Sensitivität hin, während parallel dazu die Messung der korrespondierenden DSB-Reparaturkapazitäten mittels  $\gamma$ H2AX-Foci-Analyse nur schwache Unterschiede hinsichtlich der individuellen  $\gamma$ H2AX-Focizahlen zeigte. Als bislang einzige Ausnahme ist auf eine BRCA2 +/- heterozygote Zelllinie hinzuweisen, welche signifikant höhere  $\gamma$ H2AX-Fociwerte innerhalb der G2-Phase aufweist, gleichzeitig jedoch in der G2/M-Checkpoint Messung unauffällige Resultate im Normbereich zeigt.

*AP2 (TP7)*: Die Optimierung des auf ImageJ basierenden Fokusdetektionsprogramms wurde im aktuellen Berichtszeitraum abgeschlossen. Die in digitaler Form archivierten und aufbereiteten Rohdaten für die Messung des DSB-Schadensniveaus nach niedrigen Dosen ionisierender Strahlung in den verfügbaren GenKIK-Zelllinien werden seitdem dem Fokusdetektionsprogramm zugeführt und ausgewertet. Die Interpretation dieser Daten wurde parallel vorangetrieben. Hierfür wurde eine Kooperation mit dem an der TU Darmstadt ansässigen Institut für Festkörperphysik (AG Drossel) in Form einer Masterarbeit aufgebaut. Ein Schwerpunkt der Arbeitsgruppe Drossel liegt auf der Bearbeitung von Fragen zur Strahlenbiophysik und der Modellierung von Prozessen in der Zelle. In den ersten Monaten der Kooperation wurden bereits belastbare Ansätze entwickelt und in Form eines internen „Project-Proposal“ fixiert. Die Auswertung der DSB-Reparaturkapazität in der G1- und G2-Phase nach einer hohen Dosis IR in den GenKIK-Zelllinien wurde parallel durchgeführt und steht vor ihrem Abschluss.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

*API (TP4)*: Aktuell werden an der Universitätsmedizin Mainz die Hautstanzen gesunder Probanden rekrutiert (Probanden der KIKME-Studie) und dort in Kultur genommen. Sobald die entsprechenden Zelllinien vorliegen, wird deren Transfer nach Darmstadt und darauffolgend die Kultivierung und Kryokonservierung erfolgen, damit eine ausreichende Menge an Zellmaterial für nachfolgende Experimente zur Verfügung steht. Die Auswertung der Rohdaten wird weiter fortgesetzt und soll im Laufe der nächsten Monate abgeschlossen werden. Die statistische Analyse der bisherigen Ergebnisse soll in Kooperation mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik (IMBEI) unter Berücksichtigung aller epidemiologischen Informationen erfolgen. Des Weiteren sollen die Daten zur Publikation vorbereitet und entsprechend aufgearbeitet werden.

*AP2 (TP7)*: In den nächsten Wochen soll die finale Auswertungsstrategie zur automatischen Messung des DSB-Schadensniveaus nach niedrigen Dosen ionisierender Strahlung definiert und auf alle GenKIK -Zelllinien und allen Zelllinien mit bekannter heterozygoter genetischer Prädisposition (Brca1+/-, Brca2+/-) angewendet werden. Ebenfalls soll die Auswertung der DSB-Reparaturkapazität nach einer hohen Dosis IR in diesem Zeitraum abgeschlossen werden. Die erhaltenen Daten zur Reparatur nach niedrigen und hohen Dosen sollen anschließend unter Berücksichtigung aller epidemiologischen Informationen statistisch ausgewertet werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

13th International Wolfsberg Meeting on Molecular Radiation Biology / Oncology, 22. - 24. Juni 2013, Ermatingen, Schweiz

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><br>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,<br>Planckstr. 1, 64291 Darmstadt  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.590.730,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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: Die Radonexpositions-kammer wurde erfolgreich in Betrieb genommen und erste Dosimetrie und Zellkulturexperimente damit durchgeführt.
- AP3: Es wurden erste Experimente zur Induktion von Chromosomenaberrationen in vivo durchgeführt: Es wurde Schäden in Knochenmarkszellen von Mäusen gemessen, die mit 1 Gy Röntgenstrahlen be-



strahlt worden waren. Die Analyse wurde 15 Min., 8 Std., 24 Std. und 1 Monat nach der Exposition durchgeführt. Die Untersuchung zeigt, dass für diese Dosis ein Strahleneffekt nur zu den frühen Zeitpunkten detektierbar ist (15 Min. und 8 Std.); nach 24 Stunden hat die Aberrationsrate wieder das Kontrollniveau erreicht. Weiterhin wurde mit der Patientenstudie begonnen. Es wurden Chromosomenaberrationen in Lymphozyten von 2 Patienten aus Bad Steben (vor Therapiebeginn sowie am Ende der Therapie) gemessen. Die Untersuchung weist darauf hin, dass es durch die Behandlung zu keiner nennenswerten Veränderung in der Aberrationsrate kommt. Interessanterweise war die Spontanrate des einen Spenders deutlich erhöht.

- AP4: (a) Entzündungshemmende Strahlungseffekte (Zelltod, Phagozytose & Adhäsion): Zur weiteren Untersuchung des Einflusses verschiedener Strahlenarten auf die Phagozytose-Aktivität wurden primäre Monozyten mit bestrahlten (teilweise apoptotischen oder nekrotischen) Lymphozyten co-kultiviert. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in der Phagozytose-Aktivität von Monozyten beim Vergleich von UV- und ionisierender Strahlung. Mit dem Protein-Array-System wurde in ersten Analysen eine reduzierte Freisetzung mehrerer inflammatorischer Faktoren nach Bestrahlung beobachtet. Versuche zur Adhäsion unter dynamischen Bedingungen wurden fortgeführt. Detaillierte Dosiswirkungskurven wurden mit Ea.hy.926 Zellen für Photonen unter statischen Bedingungen erstellt. (b) Differenzierung von Osteoblasten (OBs) und Osteoklasten (OCs): Erste Röntgenexperimente haben gezeigt, dass die Bestrahlung von Osteoclasten (OC)-Vorläuferzellen weder die Differenzierung noch das Überleben signifikant beeinflussen. Für OBs wurde hingegen bestätigt, dass eine Bestrahlung mit Dosen unterhalb von 2Gy zu einer verstärkten Mineralisierung führt, andere Differenzierungsmarker sich aber nicht eindeutig zeigen lassen. Der Transport von Patientenblut ist in Zusammenarbeit mit AP9 (GaipI) erfolgt, die Proben werden im Moment untersucht.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Vervollständigen der Dosimetrie und Durchführung weiterer Experimente mit Zellkulturen der verschiedenen Arbeitspakete. Nach Fertigstellung des Tierhaltungsraumes werden erste Experimente mit Versuchstieren durchgeführt. Von diesen wird anhand von Gewebeproben die Zerfallsproduktverteilung gemessen.
- AP3: Die mFISH Analyse von Chromosomenaberrationen in Lymphozyten von 2 Patienten aus Bad Steben wird fortgesetzt, insbesondere wird eine höhere Anzahl von Zellen analysiert, um statistisch relevante Aussagen treffen zu können. Weiterhin werden erste Versuche mit der Radonkammer (AP1) durchgeführt. Es sollen humane Lymphozyten bestrahlt werden und DNA-Schäden in Form von  $\gamma$ -H2AX Foci und Chromosomenaberrationen quantifiziert werden.
- AP4: (a) Die Ergebnisse zur Phagozytose durch Makrophagen und Monozyten liegen als Abschlussarbeiten vor. In Zusammenarbeit mit AP9 (GaipI) wird eine Publikation vorbereitet werden. In den Experimenten zur Adhäsion sollen weitere detaillierte Dosis-Wirkungsbeziehungen für primäre Endothelzellen erstellt werden und bei der Quantifizierung der Freisetzung von Zytokinen (Bead-array) Faktoren, die neben TGF- $\beta$  potentiell für eine geminderte Adhäsion relevant sind, identifiziert werden. (b) Die am Differenzierungsprozess von MSCs und OBs beteiligten Faktoren sollen mittels PCR Methode und ELISA untersucht werden. Der Einfluss von Strahlung auf die Aktivität von und OCs soll quantitativ untersucht werden. Der Einfluss von TH17 Zellen an Entzündungsreaktionen soll in vitro und in Patientenproben (mit AP9, GaipI) untersucht werden. Zelluläre Reaktionen die mit der Aktivierung von Ionenkanälen und deren potentiell entzündungshemmenden Wirkung zusammenhängen sollen weiter untersucht werden (mit AP7, Thiel), ebenso die Beteiligung des NF $\kappa$ B-Signalweges und die Induktion cholinergischer Systeme in primären Endothel- und Knochenzellen (mit AP5 und 6).

#### 5. Berichte, Veröffentlichungen

- D. 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, in press.
- Paz N., Kramer J., Frohns F., Durante M., Nasonova E., Ritter S., Cytogenetic analysis of mouse bone marrow cells after radiation exposure. GSI Report 2013, in press.
- Roth B. et al: "Cell cycle and radiation associated activation of ion channels in the plasma membrane of primary lymphocytes". GSI annual report 2013, in press.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>195.960,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 ersten elektrophysiologischen Messungen zur Wirkung von  $\alpha$ -Strahlen auf Ionenkanalaktivität in lebenden Zellen durchgeführt. In den Pilotexperimenten wurden A549 Zellen benutzt, da wir aus vorhergehenden Untersuchungen gelernt hatten, dass in diesen Zellen  $\text{Ca}^{2+}$ -sensitive  $\text{K}^+$ -Kanäle vorhanden sind, die in einem Zeitfenster von wenigen Minuten nach Röntgenbestrahlung aktiviert werden. Eine Serie von Kontrollmessungen zeigte, dass die selben Zellen zuerst elektrophysiologisch vermessen werden können, dann von dem Messgerät auf die abgeschirmte  $\alpha$ -Quelle positioniert werden können um dann wieder elektrophysiologisch gemessen werden zu können. Diese Prozedur hat keinen Einfluss auf die Aktivität der Ionenkanäle; die Daten sind wichtig für das experimentelle Protokoll, denn sie unterstreichen, dass die Messungen in der Art möglich sind, wie wir sie durchführen. Wenn bei der gleichen Prozedur die  $\alpha$ -Quelle nicht abgeschirmt ist führt dies nach wenigen Minuten zur Aktivierung der gleichen Kanäle, die auch durch Photonen-bestrahlung aktiviert werden. Entsprechend einer dosimetrischen Kalibrierung der Strahlen können wir daher zum ersten Mal festhalten, dass eine Anzahl von ca. 7 Treffern von  $\alpha$ -Teilchen pro Zelle ausreicht, um einen zellulären Effekt auszulösen. In vorherigen Experimenten hatten wir schon gefunden, dass die Aktivierung der Kanäle nach Bestrahlung möglicherweise über eine Anstieg von cytosolischen Radikale vermittelt wird. In dem Zusammenhang ergab sich die Frage nach der Quelle der Radikale. Eine mögliche Quelle sind Membranen und Fettsäuren, die bei

Bestrahlung oxidiert werden. Am Max-Planck-Institut für Zellbiologie in Dresden forscht die weltweit führende Arbeitsgruppe an der Charakterisierung von Lipiden. Die massenspektrometrische Analyse von Membranen vor und nach Bestrahlung wird klare Auskunft darüber geben, ob es durch Bestrahlung zu einer chemischen Modifikation der Membranen kommt und ob diese eine Quelle für Radikale darstellt. Wir haben inzwischen Kontakt zu der Gruppe in Dresden; eine Studentin war in Dresden, um die präparativen Schritte für die Aufbereitung der Zellen, die für die Membrananalyse notwendig ist, zu lernen. Die Fortführung des Projektes wird erstmalig einen quantitativen und qualitativen Einblick über die Veränderung der Lipide nach Bestrahlung liefern.

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

Die oben beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass wir die  $\alpha$ -Quelle benutzen können, um die Wirkung von Radon auf Zellen zu simulieren. In den folgenden Arbeiten werden wir nun andere Zelltypen, die für die Entzündungsreaktionen mehr relevant sind, mit der gleichen Methode untersuchen. Parallel dazu werden die Untersuchungen zur Funktion der Ionenkanäle, die durch Strahlung aktiviert werden, weiter fortgesetzt. Im Zentrum des Interesses steht dabei die Bedeutung der entsprechenden Kanäle bei der Migration und Proliferation von Zellen. Parallel werden die oben genannten Arbeiten zur Wirkung von Strahlung und hier besonders von  $\alpha$ -Strahlen, auf Membranen und Fettsäuren in Zellen vorangetrieben.

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

Eine erste Publikation ist in Arbeit und wird im kommenden Antragszeitraum fertig sein.

Poster-Präsentation:

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

Vorträge:

Gerhard Thiel: Up-regulation of  $K^+$  channels by ionizing radiation and its consequence on cell development; Univ. Milano, Mai 2013. Christine Gibhardt, Bastian Roth: Electrophysiological monitoring of membrane parameters in cells under stress, Workshop on Lipid Bilayers, Dresden, April 2013

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017C</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 C |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>213.924,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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

Humane Osteoblasten wurden aus Knochenmark von Patienten gewonnen. Mesenchymale Stammzellen (MSCs) wurden aus dem Knochenmark isoliert und in Kultur vermehrt. Nach drei Passagen wurden MSCs durch Einsatz von Osteoblasten-spezifischen Medien zu Osteoblasten differenziert. Wie im letzten Teilbericht erwähnt, haben wir die Expression von cholinergen Komponenten in diesen humanen Osteoblasten charakterisiert. Bis jetzt haben wir die Osteoblasten mit 0.5, 2 und 4 Gy Röntgen bestrahlt, um Effekte von ionisierender Strahlung auf cholinerge Komponenten und deren Mechanismen zu studieren. Eine Erhöhung der mRNA von Azetylcholinesterase (AChE) wurde dabei beobachtet, die entweder bei früher Differenzierung oder bei Stress involviert sein dürfte. Wir haben die Rolle von AChE als Differenzierungsmarker in verschiedenen anderen Geweben studiert (z. B. Retina). Da nicht-neuronale cholinerge Mechanismen bei der Entwicklung von Extremitätenanlagen, wie auch bei dem cholinergen anti-inflammatorischen Signalweg (*cholinergic anti-inflammatory pathway*, CAIP) beteiligt sind, wird es interessant sein zu studieren, wie ionisierende Strahlung (Röntgen oder Radon) allgemein das cholinerge System bei Krankheitsverläufen beeinflussen kann.

3D-Modellsystem für Säuger: im letzten Teilbericht hatten wir ein 3D-Modellsystem für die Gliedmaßenentwicklung vorgestellt, bei dem von Extremitätenanlagen des Hühnerembryos ausgegangen wurde. Nun haben wir ein entsprechendes Modell entwickelt, bei dem wir entsprechende Anlagen des Mausembryos verwenden, was sich inzwischen als exzellentes Mammalier-Modell erwiesen hat. In Kürze dargestellt: wir gewinnen Extremitätenanlagen aus dem elf Tage alten Mausembryo (E11), welche dann zu Einzelzellen trypsiniert und dissoziiert werden. Die mesenchymalen Zellen werden dann in einer Hochdichte-Zellkultur angesetzt (*high density micromass cultures*) und in kommerziellem CMRL-Kulturmedium gezüchtet. Die Zellen wurden so lange gezüchtet, bis sie an die Kulturschalen anhafteten, um dann Röntgenstrahlung von 0.5, 2 und 4 Gy ausgesetzt zu werden. Die Kulturen wurden nach 4 und 8 Tagen nach Bestrahlung fixiert. Sie wurden sodann hinsichtlich Knorpelbildung (Alzian-Blau), der AChE-Aktivität (Karnovsky-Roots-Technik) und der Alkalischen Phosphatase-Aktivität angefärbt, um die Differenzierung von Knorpel und Knochen zu verfolgen. Unsere bisherigen Resultate zeigen eindeutig, dass Röntgenstrahlung die Differenzierungsmuster der Kulturen beschleunigt, und dass dabei sicherlich cholinerge Mechanismen auch mitbeteiligt/mitbetroffen sind. Diese Befunde wurden soeben bei der GBS-Tagung (24.-29. September 2013) in Darmstadt als Poster publiziert. Eine entsprechende Studie muss nun durch Exposition von humanen Osteoblasten sowie Micromass-Kulturen mit verschiedenen Dosen von Radon erfolgen.

### 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><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt  |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017D</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 D |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>582.853,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Cardoso            |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Projekt Grewis sollen die genetische und die entzündungshemmende Wirkung von dicht ionisierender Strahlung - insbesondere von Radon - untersucht werden. Neben Röntgen- und Alpha-Bestrahlungen sowie Experimenten mit Ionenstrahlen sollen Zellkulturen und Tiere in einer Radon Kammer exponiert werden, da die Radon-Exposition im Bereich des Strahlenschutzes sowie in der Therapie entzündlicher Erkrankungen eine wesentliche Rolle spielt. Chromosomenaberrationen in peripheren Lymphozyten und hämatopoetischen Stammzellen der Maus sollen als genetische Indikatoren analysiert und mit menschlichen Daten aus der Tumor- und Rheuma-Therapie verglichen werden. In Zell- und Tier-Versuchen soll die entzündungshemmende Wirkung von Radon mit molekularbiologischen Mitteln untersucht werden und mit Therapie Daten verglichen werden (siehe Antrag).

In unserem Teilprojekt (*AP5*) soll die Rolle des Transkriptionsfaktors NF- $\kappa$ B in der Vermittlung von anti-inflammatorischen Effekten nach Bestrahlung untersucht werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Konstruktion einer Radonkammer sowie physikalische Dosimetrie für die Bestrahlungsexperimente (GSI)

AP2: Biologische Dosimetrie, Untersuchung der Schadensinduktion durch Radon in Zellkulturen und Gewebe (TUD)

AP3: Abschätzung des Strahlenrisikos durch Untersuchung chromosomaler Aberrationen (GSI)

AP4: Untersuchung von zellulären und molekularen Interaktionen in Blutgefäßen und im Knochen (GSI)

*AP5: Die Rolle von NF- $\kappa$ B bei der anti-inflammatorischen Wirkung von Strahlung (TUD)*

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 Expression von NF- $\kappa$ B in primäre menschliche Osteoblasten und in Endothelzellen auf RNA und Protein Ebene analysiert haben, konzentrierten wir uns auf die Aktivierung von NF- $\kappa$ B nach Bestrahlung. Zu diesem Zweck untersuchten wir die Translokation von NF- $\kappa$ B in den Zellkern (rotgestrichelter Bereich in Abb.) mittels Lebendzellmikroskopie.

Endothelzellen, welche GFP-RelA exprimieren, wurden mit TNF $\alpha$  behandelt und anschließend mit Niedrig- (0.5 Gy) und Hochdosis (6 Gy) bestrahlt. Bilder der lebenden Zellen wurden über ein Zeitraum von vier Stunden am „Operetta High-content/High-throuput imaging system“ aufgenommen. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen erstens, dass durch X-ray Bestrahlung allein keine Aktivierung von NF- $\kappa$ B erfolgt und zweitens, dass die Bestrahlung nicht die Aktivierung von NF- $\kappa$ B durch TNF $\alpha$  inhibiert.

## 4. Geplante Weiterarbeiten

Im Laufe der nächsten sechs Monate werden wir die oben beschrieben und getesteten Analysen auf andere Zellen und NF- $\kappa$ B Signalwegkomponenten erweitern. Des Weiteren werden wir die endogene Proteinmenge und Aktivierung über Immunfluoreszenzfärbung quantifizieren.

## 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5,<br>64289 Darmstadt  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>723.992,40 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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. Auch in diesem Berichtszeitraum war die Radonexpositionskammer noch nicht einsatzbereit, weshalb wichtige weiterführende Experimente mit zellulären Monolayern an der  $\alpha$ -Quelle durchgeführt werden konnten.

Bisher wurden die Zellen für die  $\alpha$ -Bestrahlung auf Mylarfolie ausgesät, die auf 6,5 cm große Kunststoffringe geklebt wurde. Da es bei dieser Methode problematisch war die Zellen während der Bestrahlung steril zu halten und für die Immunfluoreszenzfärbung der Zellen die Folie umgespannt werden musste, haben wir eine einfachere und effektivere Methode entwickelt: Zellen werden in 24-well Platten mit Mylarfolie-Boden ausgesät. Aussaat der Zellen in 24-wells ermöglicht sterile Arbeitsbedingungen auch während des Bestrahls und die Zellen können direkt in den wells gefärbt werden. Die Bestrahlungsbedingungen an der  $\alpha$ -Quelle sind jetzt optimiert und die Quelle steht nun für Bestrahlungsexperimente den anderen Verbundpartnern ohne Einschränkung zur Verfügung.

Da entzündlich-rheumatische Erkrankungen der Gelenke und chronische Schmerzen des Bewegungsapparates zu den Hauptindikationen für eine therapeutische Radonbehandlung zählen, soll untersucht werden, ob und 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 wurde in einem Vorexperiment eine C57BL/6 Maus mit 2 Gy Röntgenstrahlung bestrahlt und die Knochen entnommen. Die Knochen wurden mit Hilfe einer EDTA-Lösung für maximal 22 Stunden dekalzifiziert und anschließend in Paraffin eingebettet. Eine Inkubationszeit von 4 Stunden war ausreichend, um die kleinen Knochen der murinen Fibula und Tibia mit dem Mikrotom zu schneiden. Der murine Femur musste jedoch für 21 Stunden dekalzifiziert werden, um eine ausreichende Schneidbarkeit zu erreichen. Anschließend wurde eine  $\gamma$ H2AX-Immunfluoreszenzfärbung der angefertigten Knochenschnitte durchgeführt. Hierbei hat sich herausgestellt, dass Knochengewebe eine störende, extrem hohe Autofluoreszenz aufweist. Aufgrund dieser Autofluoreszenz war es bisher noch nicht möglich,  $\gamma$ H2AX-Foci in Knochengewebe direkt nachzuweisen. Als Alternative zur Immunfluoreszenzfärbung wurde eine immunhistochemische Färbung (sekundärer Antikörper gekoppelt mit einem HRP markierten Polymer) getestet. Falls es sich herausstellt, dass Immunfluoreszenzfärbungen im Knochengewebe nicht möglich sind, stellt eine immunhistochemische Färbung eine gute Alternative dar, um DNA Schäden im Knochen nachzuweisen.

Im Dezember 2012 wurde eine neue Röntgenbestrahlungsanlage der Firma PXI Precision Xray erworben, die eine maximale Betriebsspannung von 320kV aufweist. Die bisher verwendete Röntgenanlage konnte nur Röntgenstrahlen mit einer maximalen Energie von 135kV erzeugen. Für Röntgen-Kontrollexperimente mit Mäusen ist jedoch eine möglichst große Beschleunigerspannung von Vorteil, da die erzeugten hochenergetischen Röntgenstrahlen durchdringender sind und somit keine Dosisinhomogenitäten innerhalb des zu bestrahlenden Tieres auftreten. Somit ist eine optimale Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse nach international üblichen Standards gegeben. Die Röntgenröhre wurde in Betrieb genommen und eine ausführliche Dosimetrie vorgenommen. Nach gründlicher Konsultation mit den entsprechenden leitenden Stellen wurde der Tierversuchsantrag beim zuständigen Regierungspräsidium eingereicht. Im Anschluss an eine positive Begutachtung des Antrags kann umgehend mit den Tierversuchen begonnen werden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im zweiten Halbjahr 2013 sind Optimierungen der  $\gamma$ H2AX-Färbungen im Knochengewebe geplant. Sollte sich herausstellen, dass eine Immunfluoreszenzfärbung an Dünnschnittknochenschnitten nicht möglich ist, wird parallel dazu eine immunhistochemische Färbung etabliert. Neben Experimenten mit der Radonkammer sind weiterführende Versuche mit der  $\alpha$ -Quelle bzw. Röntgenröhre geplant.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main   |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017F</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</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 |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>280.992,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Als ein wesentliches Charakteristikum nicht-DNA-zielgerichteter Effekte ionisierender Strahlung werden nicht-lineare Dosis-Wirkungsbeziehungen angesehen. In diesem Zusammenhang gelang es in der Endothelzell-Linie EA.hy926 und in primären Nabelschnurendothelzellen (HUVEC) diskontinuierliche Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Expression des Hitzeschockproteins 70 (Hsp70) (AP2) und von reaktiven Sauerstoffmetaboliten (ROS) (AP3) mit maximalen Effekten nach Bestrahlung mit einer Dosis von 0,5 bis 0,7 Gy zu detektieren. Zudem gelang, abhängig von einer Stimulation mit dem Zytokin TNF- $\alpha$ , in der Linie EA.hy926 der Nachweis einer diskontinuierlichen DNA-Schadensreparatur mit signifikantem Anstieg residueller Phosphohiston H2AX-Foci 24 Stunden nach Bestrahlung mit einer Dosis von 0,5 Gy (AP1). Dieser Effekt konnte nach Inhibition der DNA-Reparaturproteine RAD51 und DNA-PKcs weitgehend aufgehoben werden. Es kann entsprechend eine Beteiligung der Mechanismen der homologen Rekombination (HR) und der Nicht-homologen Endverknüpfung (NHEJ) spekuliert werden. Während für EA.hy926 Zellen im Gegensatz zu HUVEC eine nicht-lineare Induktion von Apoptose mit einem lokalen Maximum nach Bestrahlung mit 0,5 Gy beobachtet werden konnte, scheint der Zellzyklus in keiner der Endothelzellen nach niedrig dosierter Bestrahlung wesentlich beeinflusst zu sein (AP1).

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die Arbeiten in AP1 werden, dem Zeitplan entsprechend weitergeführt. Dabei soll ein möglicher funktioneller Einfluss der Reparaturmechanismen der homologen Rekombination und der Nicht-homologen Endverknüpfung auf Endothelzell-Aktivitäten (z. B. Adhäsion) mittels spezifischer Hemmstoffe untersucht werden. Im Rahmen von AP2 werden Zeitkinetiken erstellt und die Bedeutung von sekretiertem Hsp70 sowie HMGB1 im Kulturüberstand mittels ELISA-Technologie evaluiert. Der Nachweis von reaktiven Sauerstoff-(ROS) und Stickoxid-Metaboliten (AP3) wird primär in Endothelzellen mit der Aktivität und Expression der Enzyme Superoxiddismutase, Glutathionperoxidase und der induzierbaren Stickstoffmonoxid-Synthase korreliert und anschließend in Lymphozyten untersucht.

### **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 epub ahead of print.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schloss-<br>platz 4, 91054 Erlangen  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 017G</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von<br>dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in<br>Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt G |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.02.2012 bis 31.07.2015  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>292.116,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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. Der Fokus für das letztgenannte Projekt lag in diesem Berichtszeitraum weiter auf **AP1**. Dem Ethikantrag der „RAD-ON01“-Studie wurde zugestimmt (Ethik-Kommission Nr. 12131) und es wurde wie geplant im März mit der Studie in die 100 Patienten eingeschlossen sind gestartet. Es wird eine umfangreiche Immunphänotypisierung (IPT) mittels Mehrfarben-Durchflusszytometrie im Blut von Radonbad-Patienten im Längsschnitt durchgeführt. Im Januar erfolgte zunächst die IPT verschiedener gesunder Spender (NHD, *normal healthy donor*). Diese Messungen wurden anschließend ausgewertet und umfangreiche Analyse-Protokolle erstellt, die eine gleichbleibende und v.a. hoch reproduzierbare Analyse für den Vergleich aller Blutproben erlauben. Im März wurde mit der Studie gestartet und bis heute 4 Zeitpunkte erhoben (t0: direkt vor Therapie, t1: direkt nach Therapie, t2: 12 Wochen nach Therapie, t3: 18 Wochen nach Therapie). Zu jedem Zeitpunkt wurde allen 100 Patienten Blut entnommen und sie wurden durch Studienärzte auf weitere Parameter (Schmerzen, Blutdruck, EKG) hin untersucht. Die Blutproben mussten für die IPT immer am Tag der Blutentnahme verarbeitet und gemessen werden. Die aufwändige Auswertung der Messdaten hat begonnen und wird weiter geführt. Neben der IPT sollen weitere Analysen des Blutes erfolgen (entzündliche und anti-entzündliche Zytokine im Serum, RNA-Transkriptions-Aktivität in Leukozyten, Telomerase-Aktivität in Leukozyten), wofür entsprechende Vorbereitungen des Probenmaterials mit anschließender Einlagerung am Abnahme-Tag erfolgte.

**AP2:** Die funktionellen *ex vivo* Analysen von Immunzellen werden fortgesetzt, sobald durch die IPT der Radonbad-Patienten Informationen darüber vorliegen, welche Immunzellpopulation durch Radon besonders moduliert werden.

**AP3:** In Anlehnung an den Versuch einer einmaligen Bestrahlung von hTNF- $\alpha$  transgene Mäuse mit 0.5 Gy zeigte der Folgeversuch, dass sich eine Verbesserung des Krankheitsbildes durch eine Erhöhung der Dosis auf 2x0.5Gy signifikant verlängern lässt. Sowohl die lokale als auch systemische Bestrahlung zeigten sehr gute Effekte in beiden Versuchen.

**AP5:** Die histomorphometrischen Auswertungen von Pfoten und Tibien des Bestrahlungsversuches mit 1x0.5Gy zeigten, dass sich die Verbesserung der Krankheitssymptome nach Bestrahlung nicht nur auf ein äußerliches Abschwellen sowie eine Verbesserung der Griffstärke beschränkte, sondern dass es auch in der Pfote selbst zu einer Verringerung der Leukozyteneinwanderung, einer Reduktion der Knochenerosion sowie einer Verbesserung der Knorpelstruktur mit einem geringeren Proteoglykanverlust innerhalb des Knorpels kam. Anhand der ausgewerteten Tibien konnte festgestellt werden, dass es auch hier nach Bestrahlung zu einer Erhöhung des Knochenvolumens sowie der Anzahl und Verteilung der Trabekel kam, was eine verbesserte Stabilität des Knochens zur Folge hat. Auch wurde die Mausosteoklastenkultur aus C57Bl/6 sowie hTNF- $\alpha$  transgenen Mäuse für zusätzlichen *ex vivo* Analysen erfolgreich etabliert und erste Versuche deuten darauf hin, dass niedrig dosierte Röntgenstrahlen die Anzahl der Osteoklasten nicht beeinflussen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im Rahmen der „RAD-ON01“-Studie (AP1) wird im Oktober der letzte Untersuchungszeitpunkt (t4: 6 Monate nach Therapie) sein. Bis dahin sollen die Auswertungen der bereits vorhandenen durchflusszytometrischen Messdaten abgeschlossen sein. Außerdem wird mit der Analyse der Zytokine im Serum, der RNA-Transkriptions-Aktivität in Leukozyten sowie der Telomerase-Aktivität in Leukozyten gestartet. Mit den Erkenntnissen aus der „RAD-ON01“-Studie soll im Herbst die Planung einer weiteren Studie, zu den Einflüssen niedrigdosierter Röntgenstrahlung auf den Immunstatus, erfolgen. Diese wird an der Strahlenklinik Erlangen durchgeführt werden.

Es werden in Analogie zum Bestrahlungsversuch der Mäuse mit 1x0.5Gy die histomorphometrischen Auswertungen von Pfoten und Tibien der Mäuse nach Bestrahlung mit 2x0.5Gy durchgeführt (AP5). Im Rahmen der *ex vivo* Versuche soll die Entwicklung der Osteoklasten nach Strahlungsexposition weiter untersucht werden. Des Weiteren soll mit Hilfe eines „pit formation assays“ sowie mittels ELISA untersucht werden, ob die Behandlung mit niedrig dosierter Röntgenstrahlung weniger einen Einfluss auf die Entwicklung sondern mehr auf die Aktivität der Osteoklasten hat und ob es durch die Bestrahlung der Kultur zu einer Veränderung in der Genexpression kommt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Multhoff G, Rödel F, Pockley AG, Gaipl US. Frontiers research topic: radiation-induced effects and the immune system. *Front Oncol.* 2013;3:55. doi: 10.3389/fonc.2013.00055. Epub 2013 Mar 25.

Ott OJ, Jeremias C, Gaipl US, Frey B, Schmidt M, Fietkau R. Radiotherapy for calcaneodynia. Results of a single center prospective randomized dose optimization trial. *Strahlenther Onkol.* 2013 Apr; 189(4):329-34.

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br>02 NUK 024A |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1 |   |  |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |  |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>310.026,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 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 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 Kandidatengen regulierte Zelllinien und strahlenresistente Zelllinien der Verbundpartner ein.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Identifizierung und Validierung von Targetproteinen

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

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- a. Die Kultivierung der strahlenüberempfindlichen, normalen Zellen ist abgeschlossen. Es wurde eine strahlenüberempfindliche lymphoblastoide Zelllinie (4060-200) sowie eine strahlenunempfindliche lymphoblastoide Zelllinie (20037-200) der LUCY-Studie (Lung Cancer in the Young) kultiviert. Als Kontroll-Zelllinie dient eine lymphoblastoide Zelllinie eines ATM-Patienten GM03189 (Coriell, USA) Für die Generierung der Proteom-Profile mit Hilfe der 2D-DIGE-Analyse wurden die lymphoblastoiden Zelllinien kultiviert, mit 1 Gy und 10 Gy (137Cs-Quelle) bestrahlt und 4 h und 24 h post-Bestrahlung für die 2D-Proteomanalyse geerntet. Pro Zeitpunkt wurden jeweils  $3 \times 10^7$  Zellen geerntet, wobei zu jedem Zeitpunkt post-Bestrahlung eine unbestrahlte Probe als Kontrolle geerntet wurde (Gesamtzellzahl Proteom-Analyse:  $1,2 \times 10^8$  Zellen). Im Rahmen dieser Bestrahlungsversuche wurden Aliquots der drei Zelllinien mit 1 Gy bzw. 10 Gy zu den Zeitpunkten 0h, 0.5h, 1h, 2h, 4h, 8h und 24h an AP2 und AP4 für weitere Analysen weitergegeben (kultivierte Gesamtzellzahl:  $3 \times 10^8$  Zellen / biol. Replik, 4 biologische Replikate), um Transcription, miRNA-Expression und Phosphorylierungen zu analysieren. Für die Proteom-Analyse wurden die Zelllinien lysiert und die Proteinkonzentration bestimmt (4 biologische Replikate von 4). Um die Empfindlichkeit der Proteomanalyse zu erweitern, wird eine Aufteilung in zwei pH-Bereiche (pH 4-7 und pH 6-11) vorgenommen Die Vorversuche zur Etablierung sind erfolgreich abgeschlossen.
- 3 OKF6-Zelllinien (1 strahlenresistente FancA-überexprimierende Zelllinie, 1 Vektorkontrolle sowie 1 Linie ohne Vektor; HMGU) wurden für die Etablierung der 2D-Analyse vermehrt und Aliquots als Grundlage für die die Kultivierung der 4 biologischen Replikate eingefroren. Aus einem Teil der Zellen wurde die Proteinkonzentration bestimmt, um die Anzahl der Zellzahl für die Proteom-Analyse zu bestimmen.. Für die 2D-DIGE-Analyse werden die strahlenresistente FancA-überexprimierende Zelllinie und die Vektorkontrolle kultiviert. Im Rahmen der geplanten Bestrahlungsversuche für die Proteom-Analyse (pH 3-10) werden wie unter Punkt 1 beschrieben Aliquots einer Zeitreihe der bestrahlten und unbestrahlten Zelllinien an AP3 und AP4 weitergegeben.
- b. Nach der Proteom-Analyse sollen weitere strahlenregulierte Kandidatenproteine in den o.g. Zelllinien sowie in 11 weiteren lymphoblastoiden Zelllinien, als auch in stimulierten und nicht-stimulierten humanen B-Lymphozyten mittels Westernblot getestet werden. Die Kultivierung und Bestrahlung (2. biologisches Replikat von 4) mit 10 Gy und anschließender Ernte nach 4 h und 24 h der lymphoblastoiden Zelllinien sowie die Proteinbestimmung sind abgeschlossen. Westernblots mit Kandidatenproteinen (Rad50, Vinculin, Vimentin, Elongation factor 2, SIRT1, SIRT2, Proteasom, Fibrinogen), um die eingesezte Antikörper-Verdünnung zu bestimmen, sind abgeschlossen.
- Austausch der lymphoblastoiden Zelllinien vor und nach Bestrahlung mit AP3 sind abgeschlossen.
  - Austausch der lymphoblastoiden Zelllinien vor und nach Bestrahlung mit AP4 sind abgeschlossen.
  - Das erste Verbundtreffen 2013 fand am 23. April an der Charite, Berlin, statt.
  - Beim Koordinator wurde vom 10.-21.6.13 der Kurs „Interdisciplinary Radiation Research (InteRad)“ angeboten. Alle Projektpartner erhielten regelmäßige Information über unterschiedliche Fortbildungen im Bereich Strahlenforschung von der Projektkoordination.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Posterpräsentation bei DoReMi-Network of Excellence, Workshop: Contribution of epigenetic mechanisms that influence susceptibility to radiation-induced cancer, April 24-26 2013, Stockholm University  
 A. Guertler, N.Kunz, U. Kulka, U. Roessler, A.A. Friedl, M. Gomolka, S. Hornhardt:  
 Radiation response in lymphoblastoid cell lines with different radiosensitivity

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg                                     |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 024B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2 |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>377.780,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Dr. Unger                    |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundprojekt sollen in humanen Zelllinien mit genau charakterisierter Strahlenempfindlichkeit veränderte Gene bzw. Proteine erfasst werden. Durch integrative Analyse von molekularen Daten verschiedener Ebenen (Genom, Transkriptom, Epigenom, Proteom und Phosphoproteom) sollen deregulierte Netzwerke und deren zentrale Effektorgene/-proteine identifiziert werden. Über funktionelle *in vitro* und *in vivo* Analysen soll die Bedeutung von Kandidatengen in der Signalkaskade nach Strahlenschädigung in den verschiedenen Arbeitspaketen näher untersucht werden, dabei insbesondere bereits im Vorhaben 02NUK007C identifizierte Kandidatenproteine. Über zeitaufgelöste Perturbationsexperimente und die Erstellung mathematischer Modelle aus den gewonnenen Daten sollen involvierte Signalkaskaden und potentielle molekulare Angriffspunkte systembiologisch erfasst werden. Mit Hilfe von *in vitro* und *in vivo* (Maus-Xenograft) Experimenten wird dann verifiziert, ob und wie molekular zielgerichtete strahlensensibilisierende und -protektive Substanzen („small molecules“) diese Signalwege beeinflussen. Ziel ist, die molekularen Mechanismen der strahlensensitivitätsmodulierenden Netzwerke und die Wirkung dieser pharmakologischen Substanzen darauf aufzuklären.

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern: Bundesamt für Strahlenschutz, AG-SG1.1, Koordination und AP1 (Dr. S. Hornhardt, Dr. M. Gomolka), Helmholtzzentrum München, Abteilung für Strahlenzytogenetik, AP2 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. V. Zangen), AP3 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. K. Unger), Charite Berlin, Institut für Pathologie, AP4 (Prof. Dr. Nils Blüthgen), Universitätsklinikum Essen, Institut für Zellbiologie, AP5 (Prof. Dr. V. Jendrossek), LMU München, Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie, AP6 (Prof. Dr. Prof. Dr. K. Lauber).

In dem hier vorliegenden Bericht werden AP2 „Identifizierung von Targetproteinen mittels genomischer und epigenomischer Charakterisierung“ und AP3 „Integrative Datenanalyse“ beschrieben.

Zwischen AP2 und den restlichen Arbeitspaketen besteht ein enger thematischer und methodischer Austausch. Die in AP2 generierten Zelllinien werden an AP1 für die proteomischen Analysen und an AP5 für *in vitro* und *in vivo* Untersuchungen weitergegeben. Die in AP2 generierten Daten werden an AP3 für die integrative Datenanalyse sowie an AP4 zur Systemanalyse von Kandidatengen übermittelt. Die in AP6 generierten strahlenresistenten Zelllinien werden in AP2 Omics-charakterisiert.

Im Berichtszeitraum wurden bereits drei Zelllinien an AP1 für die Proteomanalyse übergeben.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP2: „Identifizierung von Targetproteinen mittels genomischer und epigenomischer Charakterisierung“

- Generierung von HNSCC-Tumorzelllinien oder hTERT immortalisierten normalen Zellen mit über- und unterexprimierten Targets (FancA, MCM7 und SerpinB9) (HMGU /LMU)
- „Omics“-Charakterisierung von Zelllinien-Modellen aus AP2.1 mit über- und unterexprimierten Targets (FancA, MCM7 und SerpinB9) (HMGU)
- „Omics“-Charakterisierung von Zellkulturmodellen strahlenüberempfindlicher normaler Zellen und strahlenresistenter Zellen aus dem Hals-Kopf-Bereich (HMGU/ Bfs/ LMU)



AP3: „Integrative Datenanalyse“

- Primäranalyse und Organisation der Daten aus der „omics“-Charakterisierung von Zelllinien aus AP2 (HMGU/ BfS/ LMU)
- Integration der Daten der verschiedenen molekularen Ebenen und der Phänotypisierungs Daten aus AP1 und AP2 (HMGU/ BfS/ LMU/ IFZ)
- Berechnung von Korrelationsmatrizen aus Daten der verschiedenen molekularen Ebenen (HMGU)
- Identifizierung der molekularen Regulationsnetzwerke und Zielmoleküle zur Strahlenüberempfindlichkeit/-resistenz (HMGU/ CUB)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2:

Im Berichtszeitraum wurden die Subklonierung sowie die Charakterisierung der bereits generierten Subklone aus primären Zelllinien aus dem Kopf-Hals-Bereich (aus Tumor- und Normalgewebe) fortgesetzt. Hierbei wurden Zytokeratinfärbungen durchgeführt (Nachweis von Zellen epithelialen Ursprungs) sowie Wachstumskurven und Überlebenskurven nach in vitro Bestrahlung erstellt. Zusätzlich wurden qRT-PCR Experimente zur Überprüfung der FancA Expression auf mRNA-Ebene durchgeführt. Dazu wurden HNSCC-Zelllinien von AP6 erhalten. Des Weiteren wurden Zellpellets einer bereits existierenden, FancA überexprimierenden Zelllinie sowie einer Vektorkontrolle nach zwei Zeitpunkten nach in vitro Bestrahlung für die Erfassung globaler Kopienzahlveränderungen und mRNA Expression kryokonserviert. Zellpellets von jeweils 4 biologischen Replikaten strahlenüberempfindlicher LUCY 4060-200 Zellen, normal strahlenempfindlicher LUCY 20037-200 Zellen und von einem ATM-defizienten Patienten von 7 Zeitpunkten nach  $\gamma$ -Bestrahlung mit 1 Gy und 10 Gy und Scheinbestrahlung wurden an AP2 von BfS übergeben. Aus den Pellets wurde mRNA/miRNA, genomische DNA und Gesamtprotein isoliert. Letztere wurden nach Qualitätskontrolle und Quantitätsbestimmung an AP4 (Charité) übergeben. Die mRNA aller Zeitpunkte wurde nach Qualitätskontrolle einer globalen Microarray Transkriptom Analyse unterzogen. Die jeweils ersten und letzten Zeitpunkte werden derzeit einer globalen Kopienzahlanalyse unterzogen.

AP3:

- Die Daten der 2D-DIGE und den miRNA Analysen an den LUCY Zelllinien (BfS) von AP2 wurden an AP3 übergeben und auf einem sicheren Dateiserver abgelegt. Die Daten wurden präprozessiert und die Datenpunkte innerhalb eines Datensatzes und die Datensätze hinsichtlich ihrer Qualität gefiltert.
- Die bereits vorhandenen Phänotypisierungsdaten aus AP2 wurden bereits übergeben und gespeichert und werden mit neu generierten Daten komplementiert.
- Die Berechnung der Korrelationsmatrizen basiert auf Daten aus AP2, die erst noch generiert werden müssen.
- Die Identifizierung der molekularen Regulationsnetzwerke schließt sich an die Ergebnisse aus 2. und 3. an.
- Die Datenanalyse der LUCY Zelllinien hinsichtlich globaler genomischer Kopienzahl und Gesamttranskriptom wird derzeit durchgeführt, mit dem Ziel die beiden molekularen Ebenen miteinander zu verrechnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP2:

Die Klonierung primärer Zelllinien aus dem Kopf-Hals-Bereich und die Charakterisierung der generierten Subklone werden weitergeführt. In Abstimmung mit dem IFZ und der LMU wird eine definierte Anzahl an Zelllinien aus dem Kopf-Hals-Bereich für die Analysen in den verschiedenen APs ausgewählt. Es werden dann Zellkultursysteme etabliert, die eine induzierbare Targetgenexpression ermöglichen und so durch die funktionelle Analyse der Targetgene deren Effekt auf die Strahlenempfindlichkeit der Zellen erfassen. Nach Nukleinsäureextraktion aus den kryokonservierten Zellpellets der FancA überexprimierenden Zelllinie und der Vektorkontrolle wird die DNA des jeweils ersten und letzten Zeitpunktes einer Array-basierten Kopienzahlanalyse unterzogen, die mRNA einer Array-basierten Transkriptomanalyse. Von den LUCY Zelllinien werden globale omics Daten bezüglich micro RNA und DNA Methylierung erstellt.

AP3:

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm, wobei die Erstellung eines integrativen „Frameworks“ und die Rekonstruktion von Deregulationsnetzwerken im Vordergrund stehen.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Klinikum der Universität München, Marchioninstr. 15,<br>81377 München   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 024C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3 |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>328.608,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Lauber             |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem Verbundprojekt sollen in humanen Zelllinien mit genau charakterisierter Strahlenempfindlichkeit veränderte Gene bzw. Proteine erfasst werden. Durch integrative Analyse von molekularen Daten verschiedener Ebenen (Genom, Transkriptom, Epigenom, Proteom und Phosphoproteom) sollen deregulierte Netzwerke und deren zentrale Effektorgene/-proteine identifiziert werden. Über funktionelle *in vitro* und *in vivo* Analysen soll die Bedeutung von Kandidatengenen in der Signalkaskade nach Strahlenschädigung in den verschiedenen Arbeitspaketen näher untersucht werden, dabei insbesondere bereits im Vorhaben 02NUK007C identifizierte Kandidatenproteine. Über zeitaufgelöste Perturbationsexperimente und die Erstellung mathematischer Modelle aus den gewonnenen Daten sollen involvierte Signalkaskaden und potentielle molekulare Angriffspunkte systembiologisch erfasst werden. Mit Hilfe von *in vitro* und *in vivo* (Maus-Xenograft) Experimenten wird dann verifiziert, ob und wie molekular zielgerichtete strahlensensibilisierende und -protektive Substanzen („small molecules“) diese Signalwege beeinflussen. Ziel ist, die molekularen Mechanismen der strahlensensitivitätsmodulierenden Netzwerke und die Wirkung dieser pharmakologischen Substanzen darauf aufzuklären.

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern: Bundesamt für Strahlenschutz, AG-SG1.1, Koordination und AP1 (Dr. S. Hornhardt, Dr. M. Gomolka), Helmholtzzentrum München, Abteilung für Strahlenzytogenetik, AP2 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. V. Zangen), AP3 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. K. Unger), Charite Berlin, Institut für Pathologie, AP4 (Prof. Dr. Nils Blüthgen), Universitätsklinikum Essen, Institut für Zellbiologie, AP5 (Prof. Dr. V. Jendrossek), LMU München, Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie und Radioonkologie, AP6 (Prof. Dr. K. Lauber).

In dem hier vorliegenden Bericht wird AP6 „Einfluss potenziell radiosensitiverender und radioprotektiver Substanzen“ beschrieben. Ziel ist die Generierung verschiedener radioresistenter HNSCC-Zellklone aus HPV-positiven und -negativen Ausgangszelllinien. Anschließend soll versucht werden, diese mit Hilfe von molekular zielgerichteten Substanzen, die die Signalwege der Strahlenresistenz adressieren, *in vitro* und *in vivo* zu radiosensibilisieren.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket 6: Einfluss potenziell radiosensitiverender und radioprotektiver Substanzen

- Generierung von strahlenresistenten HNSCC-Zelllinien für AP1, AP2 und AP4 (HMGU/ LMU)
- In vitro*-Analyse der Strahlenwirkung nach Modulation durch Substanzen, die zielgerichtet in Signalwege angreifen, die im Rahmen des Projektverbundes als potentielle Zielstrukturen für eine therapeutische Manipulation der Strahlenempfindlichkeit identifiziert wurden (LMU/ CUB)
- In vivo*-Analyse der Strahlenwirkung nach Behandlung mit Substanzen, die unter AP6.2. strahlensensitivitätsmodulierende Wirkung gezeigt haben (LMU/ IFZ)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- a. Die Generierung radioresistenter HNSCC-Klone wurde fortgesetzt. Dabei wurden von drei etablierten HNSCC-Zelllinien (UPCI SCC 099, UPCI SCC 131 und UPCI SCC 154) insgesamt 16 Klone generiert, die zurzeit hinsichtlich ihrer Strahlenresistenz in Koloniebildungs- und Viabilitätstests charakterisiert werden. Die vielversprechendsten Kandidaten werden anschließend an AP1, AP2 und AP4 weitergegeben.
- b. 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 wird derzeit untersucht, inwiefern sich die Radiosensitivität der HNSCC-Zelllinien mit Hilfe des Tyrosinkinase-Inhibitors Dasatinib bzw. eines neuartigen Hsp90 Inhibitors modulieren lässt.
- c. 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 b.) erfolgreich getesteten Substanzen *in vivo* untersucht werden soll, wurden die erworbenen HNSCC-Zelllinien mit AP5 ausgetauscht und mit der Etablierung wurde begonnen.

Austausch von Zelllinien mit AP1, AP2 und AP5.

Das 1. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 23. April 2013 in Berlin (CUB) statt. Hieran haben für das AP6 Kirsten Lauber und Linda Kinzel teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP6: Das formulierte Arbeitsprogramm wird wie geplant weiter bearbeitet.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 024D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4 |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>364.656,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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.

#### AP5.2:

Ein weiterer Austausch von HNSCC-Zelllinien mit AP2 und AP6 ist erfolgt. Zur Verifizierung der Tumorigenität wurden Xenografttumoren dieser Zelllinien durch Injektion einer Tumorzellsuspension in das Subkutangewebe immundefizienter NMRI nu/nu Mäuse generiert. Diese Experimente sind für vier HNSCC-Zelllinien bereits erfolgt, weitere 6 Zelllinien werden aktuell getestet (laufender Versuch). Das Wachstum der experimentellen Tumoren wurde und wird kontinuierlich verfolgt (Ermittlung der Wachstumskurven). Es werden folgende Parameter erfasst: i) die Latenzzeit bis zum Anwachsen der Tumoren, ii) die Tumorzinzidenz, iii) die Zeit bis zum Erreichen eines Tumolvolumens von 1000 mm<sup>3</sup>. Aus den ersten vier getesteten Zelllinien konnte eine der *in vitro* strahlensensitiven HNSCC Zelllinien bereits als sehr guter Kandidat für die geplanten Untersuchungen zur Strahlensensitivität *in vivo* identifiziert werden. In den laufenden Experimenten zeichnet sich ab, dass aus den 6 aktuell getesteten Zelllinien eine der *in vitro* als strahlenresistent definierten HNSCC Zelllinien *in vivo* sehr gut wächst und somit wahrscheinlich ebenfalls für die anschließenden Untersuchungen zur Strahlensensitivität *in vivo* gut geeignet ist.

#### AP6.3:

Um die Untersuchungen zu den Auswirkungen der Gabe von im Rahmen der Arbeiten in AP6.2 identifizierten Inhibitoren auf die Effektivität der Strahlentherapie *in vivo* zu ermöglichen, wurde ein weiterer Antrag auf Genehmigung entsprechender Tierexperimente gestellt. Das Tierversuchsvorhaben zur „Radiosensibilisierung durch Kombinationstherapie mit einem Radiosensitizer“ wurde im April 2013 genehmigt (Az.84-02.04.2013.A092). Im Rahmen der beschriebenen Experimente soll untersucht werden, ob sich durch die Kombinationstherapie mit einer *in vitro* als radiosensibilisierend identifizierten Substanz, das Tumorwachstum *in vivo* vermindern und die Radiosensitivität von HNSCC Tumorzellen mit unterschiedlicher Radiosensitivität *in vivo* steigern lassen. Hierzu starten die geplanten Experimente Ende Juli.

Das 1. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 23. April 2013 in Berlin (CUB) statt. Hieran haben für das AP5 Verena Jendrossek und Diana Klein teilgenommen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Charité – Universitätsmedizin Berlin, Charitéplatz 1, 10117 Berlin  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 024E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5 |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>375.564,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Im ersten Halbjahr 2013 wurde die Pipeline zur Generierung und Analyse der Daten ausgetestet. HMGU schickte dazu entsprechende Lysate, für die dann von CUB mit Hilfe der Luminox-Technologie ein Phosphorylierungsprofil erstellt wurde. Konkret wurden im Testlauf Proben von peripheren Lymphozyten aus dem Blut einer gesunden Person bestrahlt (Sham Kontrolle sowie jeweils 0 h, 0,5 h, 1 h, 2 h, 4 h und 16 h nach Bestrahlung mit 0.5 Gy) und mit einem Multiplex gemessen, das die Aktivität von 11 Analyten misst (die Signaltransduktionsmoleküle Akt, cJun, ERK2, GSK3a, HSP27, JNK, MEK, NFkB, MAPK, p70S6, STAT3). Der Versuch ist erfolgreich verlaufen, somit haben wir die Pipeline zur Datengenerierung validiert. Die meiste Dynamik wurde bei den Aktivitäten von Jun, MEK1, NFkB, P70S6 und STAT3 gesehen. Weitere konkrete Messungen der CUB sind in Vorbereitung und hängen derzeit noch von noch zu generierenden Zelllinien und Lysate der Konsortialpartner ab. Um die Datenauswertung vorzubereiten, wird derzeit ein Annotator entwickelt, mit dem die Samples/Perturbationen der in den 96er-Platten erhobenen Daten systematisch erfasst und so die Daten standardisiert auswertbar werden. Dieser Annotator ist in einer beta-Version fertiggestellt, und derzeit wird an einem Datenbankschema gearbeitet, um diese Daten kompatibel mit dem Warehousing der HMGU abzuspeichern und somit systematisch auswertbar zu machen. Hierbei orientieren wir uns an den Modulen von caGRID <http://www.cagrid.org/display/cagridhome/Home>, beispielsweise des Moduls caArray <https://cabig-stage.nci.nih.gov/community/tools/caArray>, die auch am HMGU zum Einsatz kommen.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Sobald die Transkriptomdaten oder Lysate der Zelllinien vorliegen, wird mit den jeweiligen Arbeitspaketen der Auswertung begonnen. Das Datawarehouseing wird soweit vorbereitet, dass die Datenerfassung und Auswertung direkt begonnen werden kann.

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

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,<br>Planckstr. 1, 64291 Darmstadt   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 025A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>361.107,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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

Im Berichtszeitraum wurde die Kultur der humanen embryonalen Stammzellen durch die Einführung einer Methode zur manuellen Passage umfassend verbessert und alle Mitarbeiter entsprechend geschult. Dies sichert und erhöht die Effizienz der Differenzierungsversuche im Forschungsvorhaben. Ebenfalls wurde eine Ergänzung zum bestehenden, bereits genehmigten Ethikantrag erarbeitet, die die Anwendung neuartiger Differenzierungsprotokolle für die kardiale, neurale und entodermale Differenzierung der hES-Zellen sowie weitergehende Untersuchungsmethoden wie die Analyse der mikroRNA Expression und epigenetische Untersuchungen erlaubt. Insbesondere die gerichtete kardiale Differenzierung mithilfe von Faktoren, die den kanonischen und nicht-kanonischen Wnt-Signalweg modulieren, ist zu erwähnen, mit der bis zu 90 % der ES-Zellen in Kardiomyozyten differenzieren. Darüber hinaus wurde die Erlaubnis zur Einfuhr zusätzlicher Stammzelllinien beantragt, die sich als besonders geeignet für die Differenzierung in die von uns angestrebten Zelltypen erwiesen haben.

Die Bestrahlung von humanen ES-Zellen mit Röntgenstrahlung bzw. Titaniumionen und eine anschließende Analyse nach 24 Stunden und 7 Tagen zeigte eine Erhöhung der mRNA Expression von Caudal Type Homeobox 2 (Cdx2), einem Faktor, der sowohl in der embryonalen Entwicklung des Intestinaltrakts als auch in der Bildung der Plazenta eine wichtige Rolle spielt. Diese Ergebnisse werden zurzeit weiter überprüft.

Im Hinblick auf eine funktionale Prüfung der aus hES-Zellen gewonnenen Derivate der kardialen Differenzierung wurden elektrophysiologische Messungen mit Hilfe von Microelectrode-Arrays (MEAs, in Kooperation mit der Hochschule Aschaffenburg, Prof. Dr. C. Thielemann, AP3) optimiert. Dazu wurden aus murinen ES-Zellen generierte Kardiomyozyten auf MEAs kultiviert. Diese konnten bis zu drei Wochen elektrophysiologisch vermessen werden. Somit ist eine wichtige Voraussetzung für die funktionale Testung der humanen ES-Zellderivate erreicht.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Im Fokus der nächsten Monate steht die gerichtete Differenzierung von hES-Zellen der Linie H9 in Kardiomyozyten durch Modulation des Wnt-Signalwegs. Des Weiteren wird eine Differenzierung in definitives Entoderm mit Hilfe des Differenzierungsfaktors Activin A angestrebt. Sollte eine Genehmigung weiterer Zelllinien zeitnah erfolgen, soll die Zelllinie HUES-3, als eine besonders für die kardiale Differenzierung geeignete Linie, etabliert werden. Ein Vergleich beider Zelllinien, H9 und HUES-3, erlaubt so, strahlenbedingte Effekte von zelllinienbedingten Effekten zu unterscheiden, eine für die weitere Bewertung und Publikation der Ergebnisse unerlässliche Voraussetzung.

Die Arbeiten zur genaueren Charakterisierung der H9-Zellen (Zellzyklusprogression, Apoptoserate, Induktion von Chromosomenaberrationen und die Expression von Pluripotenzmarkern) werden fortgeführt.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

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 (in press).  
 Materna, M, Characterization of the effects of radiation on cardiomyocytes by means of a measurement system based on microelectrode arrays (MEAs), Master-Thesis, University of Frankfurt (2013).  
 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 (in press).  
 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 (in press).  
 Zimmermann J., Schuhmacher B., Response of mESC to X-rays and differentiation of mESC. Praktikumsbericht, MTB08 Strahlenbiophysik, Technische Universität Darmstadt (2013).

|   |   |
|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Konstanz, Universitätsstr. 10, 78464 Konstanz  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 025B</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>170.268,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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**

AP2:

Wie im letzten Bericht beschrieben, ist System 3 (3-dimensionales Neurosphärenmodell aus hESC) als robusteres weiter verfolgt worden und erste Ergebnisse veröffentlicht worden (Hoelting et al., Arch Toxicol 87:721). Das System ist fähig, Genexpressions-Änderungen unter Einfluss von Chemikalien im nicht zelltoxischen Bereich zu erfassen und kann klar einen Unterschied zwischen dem Einfluß von Nanopartikeln und Quecksilber (einem bekannten Toxikant für die Gehirnentwicklung) messen. Weiterhin sind vielversprechende erste Vorversuche mit Kollegen in Dortmund durchgeführt worden, um mit scanning confocal microscopy einen Effekt von Nanopartikeln auf die Neurosphärenentwicklung zu visualisieren.

Seit dem letzten Zwischenbericht ist auch ein Student für das Projekt identifiziert worden und in die hESC-Kultur eingerabeitet worden. Des Weiteren ist ein Verlagern des Projektes an die Fachhochschule Albstadt-Sigmaringen in die Wege geleitet worden. Die Universität Konstanz hat dem Geld-Transfer zugestimmt, die Hochschule Albstadt-Sigmaringen hat die AZAP-Formulare unterschrieben, welche schon an den Projektträger weitergeleitet wurden und Frau Ritter hat einer Verlagerung von AP2 auch zugestimmt. Eine zusätzliche Genehmigung vom Robert Koch Institut ist nicht nötig, da ich diese bereits erhalten hatte und die Genehmigung an meine Person gebunden ist.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

AP2:

System 1 und 3 werden als kontinuierliches System zusammengefasst werden um den Einfluss von Strahlen auf die verschiedenen Stadien der Entwicklung besser zu charakterisieren. System 1 ist das Vorläuferstadium der für System 3 in Neurosphären angesetzten Zellen. Es bietet sich somit an, beide Systeme als ein kontinuierliches System zu untersuchen und somit alle Stadien der frühen fetalen Gehirnentwicklung direkt in einem Modell abzudecken. Dabei werden in System 1 zunächst die Pax6 positiven Neuroepithelialzellen generiert (d. h. die allerersten Gehirnstammzellen), die dann für System 3 in Suspension umgesetzt werden um Neurosphären zu bilden, in denen sich dann diese frühen Gehirnzellen weiter entwickeln können. Dabei wird das kontinuierliche System 1/3 im adherenten Stadium und im Neurosphärenstadium zu verschiedenen Zeitpunkten mit Röntgenstrahlen bestrahlt werden. Funktionsanalyse (z. B. ändern sich bei den bestrahlten NEP Zellen die Stammzeleigenschaften und können sie schlechter/besser Neurosphären bilden?), Genexpressionsanalysen und Mikroskopie (für Einwirkung auf die Zellpopulationen innerhalb der Neurosphären) werden anschließend ausgeführt.

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

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Hochschule für angewandte Wissenschaften – Fachhochschule<br>Aschaffenburg, Würzburger Str. 45, 63743 Aschaffenburg  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 025C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>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><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.08.2012 bis 31.01.2016   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>186.606,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr.-Ing. Thielemann    |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ein wesentliches Ziel des Projektes ist es, verlässliche Daten zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die frühe pränatale Entwicklung des Menschen zu liefern, um so zu einer realistischen Risikoabschätzung beizutragen. Insbesondere ist eine genauere Kenntnis der Strahlenwirkung auf die frühe Embryonalentwicklung (Präimplantationsperiode, beginnende Organbildung) dringend erforderlich, da die bisherige Risikoabschätzung mit großen Unsicherheiten behaftet ist und ausschließlich auf Tierexperimenten beruht. Als In-vitro-Modell sollen humane embryonale Stammzellen (hES-Zellen) verwendet werden.

Im *biomems* Labor von Frau Prof. Thielemann wurden in den letzten Jahren verschiedene 2D- und 3D-Zellkultursysteme aus primären Kardiomyozyten und Neuronen für toxikologische und strahlenbiologische Studien etabliert und die elektrophysiologischen Reaktion der Zellen mit einer nicht-invasiven Technik (Mikroelektrodenarray) analysiert. Die Analyse der Strahlenreaktion von Kardiomyozyten bildete hierbei den Schwerpunkt, da auf diesem Gebiet bereits umfangreiche Vorversuche in Zusammenarbeit mit der GSI durchgeführt wurden. Diese Methode soll auch im beantragten Forschungsvorhaben eingesetzt werden.

Um die elektrophysiologische Reaktion der Zellen kurz vor bzw. nach einer Strahlenexposition messen zu können, soll für die Dauer der Projektlaufzeit an der GSI ein Messsystem zur Aufnahme und Analyse der Daten aufgebaut werden. Weiterhin wird die Technik zu Kultivierung von humanen Kardiomyozyten und Neuronen auf MEA in Zusammenarbeit mit den anderen Projektteilnehmern etabliert. Es ist geplant, die Funktionalität von Neuronen und Kardiomyozyten, die aus unbestrahlten bzw. bestrahlten pluripotenten hES-Zellen differenziert wurden, näher zu charakterisieren. Im Vergleich dazu sollen bereits differenzierte Zellen bestrahlt und analysiert werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundvorhaben beinhaltet die folgenden Arbeitspakete (Teilprojekte):

- AP1: Untersuchung der Wirkung von Röntgen- und Ionenstrahlen auf pluripotente und differenzierte hES-Zellen (GSI Helmholtzzentrum, Dr. S. Ritter)
- AP2: Bewertung des Einflusses dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die neuronale Entwicklung (Universität Konstanz, Dr. S. Kadereit).
- AP3: Elektrophysiologische Untersuchung kardialer und neuraler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. Dr. C. Thielemann).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wie bereits im Zwischenbericht des Jahres 2012 beschrieben, wurden die ersten Versuche mit primären Neuronen aus der Ratte durchgeführt. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass sich bereits innerhalb der ersten fünf Kultivierungstage ein neuronales Netzwerk ausbildet, dessen elektrische Aktivität in Form von Spikes und Bursts mithilfe der Technik des Mikroelektrodenarrays (MEA) nachgewiesen werden konnte. Dieser Versuch wurde in den vergangenen Monaten wiederholt und die Ergebnisse konnten dabei verifiziert werden. Vereinzelt Spikes konnten bereits nach wenigen Kultivierungstagen detektiert werden. Die ersten Bursts hingegen traten innerhalb der zweiten Kultivierungswoche auf. Nach der Charakterisierung dieses Systems wurden die ersten Zellkulturen auf MEA Chips einer Exposition mit Röntgenstrahlen ausgesetzt. Bei den hierbei verwendeten Strahlendosen handelt es sich um 0,5 Gy, 1 Gy und 2 Gy. Die Auswertung dieses Versuches wird derzeit durchgeführt.

Neben den primären Neuronen aus der Ratte, sollte des Weiteren ein Protokoll für die Präparation und Kultivierung hippokampaler Neurone eines Hühnerembryos (*Gallus gallus*) etabliert werden. Bereits bei den ersten Vorversuchen zeigten sich jedoch Probleme bei der Kultivierung, die insbesondere das Adhäsionsverhalten der neuronalen Zellen auf der mit PDL (Poly-D-Lysin) und Laminin beschichteten Oberfläche des MEA-Chips betreffen. Durch eine Optimierung des Protokolls konnten diese Probleme jedoch nicht behoben werden. Innerhalb der ersten zwei bis drei Kultivierungstage ist eine Ausbildung des neuronalen Netzwerks aus morphologischer Sicht zu erkennen, elektrophysiologisch konnte allerdings keine Aktivität nachgewiesen werden. Die mögliche Kultivierungsdauer betrug maximal fünf Tage. Es hat sich herausgestellt, dass dieses System für die geplanten Versuche nicht geeignet ist.

Des Weiteren wurde damit begonnen, Protokolle für Antikörperfärbungen gegen spezifische neuronale Marker wie beispielsweise MAP-2, zu etablieren.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Es ist geplant, weitere Kulturen primärer Rattenneuronen auf MEA Chips einer Exposition mit Röntgenstrahlung auszusetzen und die elektrophysiologischen Signale dieser bestrahlten Zellen zu untersuchen. Um mögliche strahleninduzierte Effekte detektieren zu können, sollen zusätzlich zu den elektrophysiologischen auch histochemische Nachweise eingesetzt werden. Neben den primären Rattenneuronen, sollen in den nächsten Monaten Versuche mit den von *Cellular Dynamics* kommerziell erhältlichen, humanen iPS Neuronen durchgeführt werden. Dabei handelt es sich um Neurone, die aus induzierten humanen, pluripotenten Stammzellen generiert werden. Nach erfolgreicher Kultivierung dieser Zellen auf MEA Chips und der Charakterisierung ihrer elektrophysiologischen Signale, sollen diese Zellen ebenfalls einer Exposition mit Röntgenstrahlung ausgesetzt werden.

Sowohl die primären Rattenneurone, als auch die humanen iPS Neurone sollen in den nächsten Strahlzeiten an der GSI mit schweren Ionen bestrahlt werden.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg                                       |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 026A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2013 bis 31.12.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.059.340,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Organodosis, und zum anderen zur Unterstützung der personalisierten Auswahl einer Brustkrebstherapie oder einer Herzuntersuchung.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Für die Risikomodelle von 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**

Die Arbeitspakete AP4 (ab Monat 7) und AP5 (ab Monat 25) hatten im Berichtszeitraum noch nicht begonnen. Es wurden dennoch einige Voruntersuchungen durchgeführt. Insbesondere betraf dies die Risikomodelle von strahleninduziertem Brustkrebs und Darm. Neben einer Literaturübersicht wurden verschiedene deskriptive ERR und EAR Modelle identifiziert. Es finden zurzeit Überlegungen bezüglich mechanistischer Modelle für Brustkrebs und Darm statt, die eine gute Beschreibung epidemiologischer Daten liefern sollen und gleichzeitig biologisch plausibel sind.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die besten Modelle für Brustkrebs und Darm sollen ausgewählt werden. Für die Abschätzung der Unsicherheiten sollen sowohl die statistischen Unsicherheiten (Parameterfehler der einzelnen Modelle sowie Korrelationsmatrix) als auch die Modellunsicherheiten berücksichtigt werden. Letzteres verlangt eine Gewichtung der Modelle mit der Methode der Multi-Model-Inference. Die Untersuchungen sollen auf andere Krebsarten ausgedehnt werden.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz,<br>Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 026B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2013 bis 31.12.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>795.048,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>Prof. Dr. Blettner           |   |

## 1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das PASSOS (Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin) Projekt, das die potentielle kardiale Langzeittoxizität nach adjuvanter Strahlentherapie des Mammakarzinoms untersucht, soll in Baden-Württemberg und Bayern im Rahmen des BRENDA Netzwerkes erhoben werden. 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. Das BRENDA Netzwerk besteht aus 17 zertifizierten Brustkrebszentren in denen eine Kohorte mit ca. 13.300 Brustkrebspatientinnen zusammengetragen wurde. Es liegen exakte Daten zu Patienten-, Tumor-, Therapie- und Outcome-bezogene Variablen vor.

Zusätzlich zur BRENDA Abfrage sollen nun die für PASSOS noch notwendigen Daten an der BRENDA Kohorte erhoben werden.

## 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Die 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. In Ulm werden ausschließlich Patientinnen aus dem BRENDA Kollektiv eingeschlossen. Einschlusskriterien sind Patientinnen, die zwischen 1992 und 2008 eingeschlossen wurden und M0 sind.

Phasen der PASSOS-Herzstudie am Standort Ulm sind:

- Durchführung eines Mortalitäts-Follow up (Todesursachenrecherche) für PASSOS und BRENDA.
- Befragung zur kardialen Morbidität und zu individuellen kardiovaskulären Risikofaktoren.
- Dosimetrie: Bestimmung der Herzdosis (Organdosis) nach Strahlentherapie für eine Stichprobe, Extrapolation für die gesamte Kohorte und Dosis-Wirkungs-Analyse.
- Statistische Analyse und Publikationen.



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

Am Standort Ulm wurde nach Abschluss der Planungsphase des PASSOS Projektes nun das Datenschutzkonzept etabliert. Da PASSOS an das BRENDA Studienkonzept gebunden ist, stellt der Datenschutz eine besondere Herausforderung dar. 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 BRENDA gemeinsam mit der Erhebung der PASSOS Daten dezentral an der jeweiligen Partnerklinik zu erheben und zu erfassen. Diese Daten dürfen erst in der Folge in anonymisierter Form an die Studienleitung nach Ulm für BRENDA bzw. Mainz für PASSOS versandt werden. Das aktuelle Datenschutzkonzept wird von der Datenschutzbeauftragten der Universitätsklinik Ulm geprüft und im Anschluss an die Datenschutzbeauftragten des Landes Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz weitergeleitet.

Die Logistik zum Follow-up bzw. zur Datenerhebung für PASSOS wird zentral von Ulm aus organisiert werden. Hierzu wurden die Dokumentarinnen speziell geschult. Die Datenerhebung wird am Standort Ulm starten, um gewährleisten zu können dass ausreichende Unterstützung durch die aus BRENDA erfahrenen Dokumentarinnen gewährleistet wird.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Am 07. August wird am Standort Ulm ein BRENDA Netzwerktreffen mit den partizipierenden Kliniken stattfinden. Im Rahmen dieses BRENDA Studientreffens wird auch der Start der PASSOS Dokumentation mit den Partnerkliniken koordiniert werden.

Die Dokumentation des BRENDA Follow-up wird gemeinsam mit der PASSOS Dokumentation koordiniert. Hiermit wird geplant ab September 2013 gestartet, in der Annahme dass das Datenschutzkonzept in der aktuellen Version akzeptiert wird. Als Follow-up Zeitraum für die Projekte BRENDA und PASSOS muss ein Zeitraum von 9-12 Monaten veranschlagt werden um die knapp 13.300 Patientinnen zu befragen. Nach Dokumentation der Daten erfolgt der Transfer der PASSOS Daten in anonymisierter Form in das Studienzentrum Mainz.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Ulm, Helmholtzstr. 16, 89081 Ulm  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 026C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2013 bis 31.12.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>283.332,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Für die Aktualisierung und Ergänzung der BRENDA Daten und den Datenaustausch zwischen Mainz und Ulm sind örtliche Ethikgutachten sowie die Zustimmung der Landesdatenschutzbeauftragten einzuholen. Da patientenbezogene Daten die behandelnde Klinik nicht verlassen dürfen, werden die Daten nur anonymisiert bzw. pseudonymisiert zwischen den Kliniken ausgetauscht werden. Das für den Standort Ulm entwickelte Datenschutzkonzept wird aktuell von der Datenschutzbeauftragten der Universitätsklinik Ulm geprüft und im Anschluss an die Datenschutzbeauftragten des Landes Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz weitergeleitet.

Das Follow-up bzw. die Datenerhebung für PASSOS werden zentral von Ulm aus organisiert. Hierzu wurden die durch PASSOS finanzierten Dokumentarinnen speziell geschult. Die Datenerhebung wird am Standort Ulm starten, um die Unterstützung durch die aus BRENDA erfahrenen Dokumentarinnen zu nutzen.

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. Aus der BRENDA-Datenbank wurden daher zunächst zwanzig Pilot-Fälle randomisiert um in den zugehörigen Behandlungsplänen die Herzen möglichst detailliert nachzukonturieren. Dreizehn Fälle konnten korrekt zugeordnet und die Therapiepläne aufgerufen werden. Für alle drei-dimensional differenzierbaren Herzstrukturen und das Gesamtorgan werden derzeit Dosis-Volumen-Histogramme zur Charakterisierung der Strahlenbelastung erstellt. Abweichungen zwischen den im Untersuchungszeitraum in Ulm und Mainz verwendeten Planungs-Programmen (unterschiedliche Algorithmen zur Dosisbestimmung: Pencilbeam vs. AAA) wurden an zehn weiteren Datensätzen überprüft. Bei einer Gesamtdosis von 50 Gray im Zielvolumen liegen die Differenzen sowohl für hoch als auch gering exponierte Herzanteile bei wenigen Zehntel Gray.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Die PASSOS-Dokumentation wird mit dem BRENDA Follow-up koordiniert. Hiermit wird geplant ab September 2013 zu beginnen, in der Annahme dass das Datenschutzkonzept in der aktuellen Version akzeptiert wird. Als Follow-up Zeitraum für die Projekte BRENDA und PASSOS muss ein Zeitraum von 9-12 Monaten veranschlagt werden um die knapp 13.300 Patientinnen zu befragen. Nach Dokumentation der Daten erfolgt der Transfer der PASSOS Daten in anonymisierter Form in das Studienzentrum Mainz.

Aufgrund der Erfahrungen mit den Pilot-Datensätzen soll zwischen den Partnern Ulm und Mainz vereinbart werden, welche Herzstrukturen für die gesamte Dosimetrie-Kohorte analysiert werden. Zur Vergleichbarkeit der Daten (Pencil-Beam gegenüber AAA) muss evtl. ein Korrekturfaktor bestimmt werden.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universitätsmedizin Rostock, Schillingallee 35, 18057 Rostock   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 026D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2013 bis 31.12.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>372.000,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Dosisetrags 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

- I: Festlegung der einzuzeichnenden Risikostrukturen sowie Standardisierung der Konturierung (UROS, LEIPZIG)  
Lunge rechts/ links, Rückenmark, Oesophagus, Schilddrüse, ipsilateraler Plexus brachialis, contralaterale Brustdrüse, Herz (Vorhof rechts/ links, Ventrikel rechts/ links, AMT – anterior myocardial territory), axilläre Lymphknoten Level I-III, Planungsvolumen, Boostvolumen
- II: Festlegung der Berechnungsgrundlage für die Dosisverteilung aller betrachteten Teletherapieoptionen:
- Verwendung Collapsed-Cone-Algorithmus
  - Rechnungen auf 3-mm Schichtabstands CTs
- Betrachtung der verschiedenen Bestrahlungstechniken vor endgültiger Festlegung:
- 3D-konformale Tangentechnik mit Aufsättigungsfeldern
  - sequentieller und simultan integrierter Boost
  - IMRT mit Tangentenanteil
  - sequentieller Boost durch interstitielle AL- Brachytherapie
- Untersuchung des Ablaufs und der Planung von Brachytherapiebehandlungen auf Vergleichbarkeit mit Teletherapiebehandlungen für die Patientendatenbank
- III: Festlegung der Sektionen der Patientendatenbank:  
Identifizier, persönliche Daten, klinische Daten, Behandlungsart und Lagerung, Dosisinformationen

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- I: - Klinische Datenerhebung: Festlegung der prospektiv zu erhebenden Parameter und kardiovaskulären Risikofaktoren und prospektive Datenerhebung für die Patientendatenbank
- Prospektive Konturierung der Risikostrukturen und Zielvolumina aller Strukturen im Planungs-CT für EBRT und o. g. erweiterten CT der Brachytherapie
- II: - Untersuchung verschiedener Planvorlagen und Parametermengen für die Erstellung von vergleichbaren IMRT-Planungen für die Patientendatenbank
- Erstellen von verschiedenen Planvorlagen und Verlinkung der Dosisinformation mit der Patientendatenbank
  - Rekonstruktion eines zweiten Planungs-CTs für alle Patienten der Brachytherapie, das den größten Teil der festgelegten Risiko- und Zielvolumina umfasst
- III: - Erstellen einer Patientendatenbank in Dateiform und Aufnahme aller potentiellen Patienten und benötigter Daten aus dem laufenden klinischen Betrieb
- Prospektive Erhebung der klinischen Daten

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 026E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2013 bis 31.12.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>317.424,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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:

- Festlegung der einzuzeichnenden Risikostrukturen sowie Standardisierung der Konturierung (Abstimmung mit UROS): Lunge rechts/ links, Rückenmark, Oesophagus, Schilddrüse, ipsilateraler Plexus brachialis, contralaterale Brustdrüse, Herz (Vorhof rechts/ links, Ventrikel rechts/ links, AMT – anterior myocardial territory), axilläre Lymphknoten Level I-III, Planungsvolumen, Boostvolumen

II:

- Collapsed Cone Algorithmus wird als Standardberechnungsalgorithmus definiert, ebenso der Maximalabstand der zugrunde liegenden CT-Serien mit 3 mm festgelegt (Abstimmung UROS).
- Erste dosimetrische Untersuchungen in einfacher Geometrie zur Genauigkeit der Dosisberechnung außerhalb des Strahlenfeldes sind durchgeführt worden.
- Ein Phantom ist fertig gestellt, in dem verfeinerte Messungen in einer patientennahen Geometrie mit verschiedenen Detektoren sowohl für die perkutanen Techniken als auch für die Brachytherapie ausgeführt werden können.
- Die zu untersuchenden Bestrahlungstechniken sind prinzipiell definiert (Abstimmung UROS):
  - 3D-konformale Tangentechnik mit Aufsättigungsfeldern
  - sequentieller und simultan integrierter Boost
  - IMRT mit Tangentenanteil
  - sequentieller Boost durch interstitielle AL- Brachytherapie

III.:

- Grundstruktur der Datenbank ist definiert (Abstimmung UROS)

### 4. Geplante Weiterarbeiten

I.:

- Festlegung der prospektiv zu erhebenden Dosis-Volumen-Parameter und geeigneter Strukturen für deren Erfassung in der Patientendatenbank
- Konturierung der Risikostrukturen und Zielvolumina im Planungs-CT für EBRT und für die Brachytherapie

II.:

- Messungen der Dosisverteilungen im Nutzstrahlenfeld und im erweiterten Streustrahlungsbereich zur Erfassung der Rechengenauigkeit der eingesetzten Planungssysteme (EBRT und Brachytherapie)
- Ggf. Anpassung der Beam-Modelle im Planungssystem zur Verbesserung der Genauigkeit
- Monte-Carlo-Modellierung der Dosisberechnung für die Brachytherapie
- Untersuchung verschiedener Planvorlagen und Parametermengen für die Erstellung von vergleichbaren IMRT-Planungen für die Patientendatenbank
- Untersuchungen zur Registrierung des Planungs-CT für die Brachytherapie mit dem für die EBRT zur einheitlichen Definition von Risiko- und Zielvolumina

III.:

- Prospektive Erhebung der klinischen Daten und Erfassung in Patientendatenbank

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München,<br>Ismaninger Str. 22, 81675 München  |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 026F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.01.2013 bis 31.12.2016  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.01.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>329.328,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Das Untersuchungsverfahren für Ganzkörper-PET-MR-Aufnahmen mit dem radioaktiven Tracer  $^{18}\text{F}$ -FDG zur Bestimmung der Myokardvitalität wurde definiert. Das technische Verfahren wurde mit Phantommessungen getestet. Ganzkörper-Dosimetriedaten von bislang einem Patienten wurden akquiriert und die Segmentierung der Organe durchgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im 2. Halbjahr 2013 werden weitere Ganzkörper-PET-MR Untersuchungen durchgeführt, Organ-Zeitaktivitätskurven ermittelt und biokinetische Modelle an die Daten adaptiert.

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

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030A</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt A                                   |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>1.582.482,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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: Es wurde eine weitere Kooperation mit AP1.5 für Messungen von Schnee- und Schmelzwasserproben mit Beschleuniger-Massenspektrometrie vereinbart. Das Projekt wurde im Rahmen des Helmholtz WasserZentrum vorgestellt und dort eingegliedert, wodurch sich weitere Möglichkeiten für externe Kooperationen im Themenfeld Schadstofftransport in aquatischen Ökosystemen eröffnet haben.
- AP1.3: Das analytische Verfahren, das für die Pu-Messung in Schneeproben verwendet werden soll, wurde mit AP1.5 abgesprochen.
- AP2.5+AP3.1: Die Akquirierung der Post-Docs wurde begonnen.
- AP4.2: Es werden potentielle Kontaminationsereignisse von für die Trinkwasserversorgung genutzten Wasserressourcen definiert und die Transportpfade von Radionukliden in der Trinkwasserversorgung identifiziert. Daraus werden relevante Parameter und Szenarien zur Modellierung identifiziert und aus der bestehenden Literatur gesammelt. Aus diesen Daten soll eine Risikobewertung für den Fall eines Eintrages von Radionukliden in Oberflächengewässer entwickelt werden.
- AP5: Im Rahmen des Projektes kann heuer die Teilnahme von fünf Nachwuchswissenschaftler/ innen an der WE-Heraeus Physics School on "Ionizing Radiation and Protection of Man" vom 11.-23.08.2013 bezuschusst werden. Auf dem Kick-off-Meeting wurde zur Anmeldung aufgerufen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Die Akquirierung zur Stellenbesetzung wird weiter vorangetrieben. Die Arbeitspakete werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans abgearbeitet. Beim Kick-off-Meeting des Verbundes am 21. Juni 2013 in Neuherberg wurden Möglichkeiten für Zusammenarbeiten der Verbundpartner konkretisiert.

Eine Homepage für das Verbundprojekt wird ab Mitte August 2013 unter <http://www.transaqua.helmholtz-muenchen.de> erreichbar sein. Sie beinhaltet eine Vorstellung des Verbundes und der Teilprojekte und wird in Zukunft fortlaufend mit News, Terminen sowie neuen Publikationen aktualisiert.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B  |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung  |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017   | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>164.749,00 EUR  | <b>Projektleiter:</b><br>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 es noch nicht gelungen ist einen geeigneten Kandidaten für die Bearbeitung des Projektes zu finden, gibt es im Berichtszeitraum keine durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- Die Suche nach einem geeigneten Projektbearbeiter wird fortgesetzt.
- 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><br>Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena                                |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030C</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>398.304,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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. Radionuklideinträgen 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:

(a) 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 Urangehalte ( $> 10 \mu\text{g/L}$ ).

(b) Tiefenwasser-führende Rhyolithe (z. B. Kreuznacher Rhyolith, Saar/Nahe-Gebiet). Sie enthalten neben Uran auch Radium und sind für Radon-Emanation bekannt.

(c) 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**

Es wurde begonnen, wissenschaftliches Personal für die Forschungsarbeiten zu sichten. Damit die Arbeiten zügig beginnen können, wurden im Rahmen von Projektmodulen und Masterarbeiten erste Themen vergeben, die die Fragestellung des Projektes unterstützen. Dabei werden von Beginn an die drei Standorte, Bad Kreuznach, das Bergwerk Morassina und eine Bohrung im Mittleren Buntsandstein untersucht.

Die Vorplanungen für die Beprobung des Standortes „Bad Kreuznach“ (siehe unten) haben bereits begonnen. Diese umfassen die Einarbeitung in die vorhandenen Literatur sowie die Kontaktaufnahme mit den Verantwortlichen in Bad Kreuznach bei der Gesellschaft für „Gesundheit und Tourismus für Bad Kreuznach GmbH“.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Beginnend im September 2013 sollen zunächst die Standorte „Bad Kreuznach“ und „Morassina“ in Projektmodulen/Masterarbeiten bearbeitet werden.

Bad Kreuznach: Nach einer umfangreichen Literaturrecherche zur Geologie, Hydrogeologie und zum stofflichen Inventar des Grundwasserleiters und des Grundwassers (insbesondere bezogen auf Radionuklide und ihre natürlichen Analoga) erfolgt die Probenahme des Wassers und des interagierenden Gesteins. Das Wasser wird physikochemisch und hydrochemisch auf Th, U und die Seltenen Erden Elemente hin untersucht sowie ein erstes mikrobiologisches „screening“ durchgeführt. Für die Seltenen Erden Elemente wird ein bereits vorhandenes Anreicherungsverfahren an den Standort adaptiert. Das Wirtsgestein wird geochemisch (Elutionsversuche und Totalgehalte) auf die genannten Radionuklide hin untersucht und mineralogisch charakterisiert.

Morassina: In einem Projektmodul wird die Bodenphase im Bereich des Schaubergwerkes „Morassina“ geochemisch charakterisiert. In einem zweiten Projektmodul werden die im Bergwerk austretenden Sickerwässer physikochemisch und hydrochemisch untersucht. Beide Arbeiten werden zunächst in Literaturstudien das vorhandene Wissen zum Radionuklidinventar zusammentragen und zusammenhängend diskutieren.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover                                    |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>317.916,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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

AP2: Ein Vorgespräch mit Mitarbeitern der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zur Beprobung unterschiedlicher Grundwasserstockwerke im Trinkwassergewinnungsgebiet Fuhrberger Feld bei Hannover hat stattgefunden.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

- Ab Oktober soll 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 begonnen werden.
- Die Entnahme von Grundwasserproben wird organisiert und die ersten Proben gewonnen, die für die Etablierung der Analyse- und Messverfahren benötigt werden.
- Etablierung der Analyseverfahren.

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München                                     |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030E</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>140.292,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Schneeeproben 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 Molekülionen 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 Schneeeproben durchgeführt.

Geeignete Schneeeproben 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. Gegenwärtig wird nach einem geeigneten Doktoranden für dieses Projekt gesucht. Es gab weiterhin am 21.06.2013 ein Kick-Off Treffen der Verbundpartner „TransAqua“. Hierbei ergaben sich Möglichkeiten für zusätzliche Vernetzungen mit anderen Partnern.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Entsprechend des Antrages sind die Weiterarbeiten geplant.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. v., Bautzner Landstr.<br>400, 01328 Dresden             |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030F</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>596.288,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 vier „kontaminierte Wässer“ angesiedelt ist. Das Institut für Ressourcenökologie des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf bearbeitet innerhalb des Teilprojekts 4 das Arbeitspaket „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.

Innerhalb der Kooperationspartner (Förderkennzeichen 02NUK030)

Helmholtz Zentrum München, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Friedrich-Schiller-Universität Jena, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (LUH), Hochschule Ravensburg-Weingarten, Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.

Universität Bremen, Technische Universität München

### 2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- Anziehen von Reinkulturen
- Durchführung von Bioakkumulationsexperimenten
- REM Untersuchungen
- TEM Untersuchungen
- Untersuchungen mit der zeitaufgelöste Laser Fluoreszenz Spektroskopie (TRLFS)
- 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 wurden noch keine Arbeiten durchgeführt, da dieses Arbeitspaket erst zum 1. August 2013 beginnen wird.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Das Projekt wird mit dem Anziehen von Reinkulturen beginnen. Hierbei wird es sich um Mikroorganismen handeln, die in Urangruben nachgewiesen wurden. Anschließend wird mit der Durchführung von Bioakkumulationsexperimenten begonnen.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. v.,<br>Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030G</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G         |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>326.236,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Alphaschleisses 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**

Für die Einstellung eines Doktoranden ist die Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters ausgeschrieben worden. Die Besetzung der Stelle soll bis September/Okttober 2013 erfolgen.

- 1) Aus der Literaturrecherche liegen erste Erkenntnisse zum Alpharückstoß vor.
- 2) Aufgrund der ersten Ergebnisse des Literaturstudiums sind Ideen zur Beschaffung eines Autoklavensystems vertieft und entsprechende Kontakte zu Herstellerfirmen geknüpft worden.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

- 1) Die Literaturrecherche wird zur Vertiefung des hydrogeologischen, kernphysikalischen und radiochemischen Verständnisses der Vorgänge in Gesteinssystemen aus Aquifer und Fluid fortgesetzt.
- 2) Aus verschiedenen Angeboten und weiteren Erkenntnissen des Literaturstudiums ist der Aufbau einer Druckzelle bzw. die Anschaffung eines Autoklaven abzuleiten. Aufbau und erste Tests sind vom Doktoranden durchzuführen.

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

Im Rahmen des Kick-Off-Meetings am 21.06.2013 in Neuherberg (HMGU) ist die Grundidee des Forschungsvorhabens in einem Kurzvortrag präsentiert worden.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universtität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen   |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030H</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>391.716,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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. Juni bis 30. Juni 2013 wurden noch keine Arbeiten durchgeführt, da die Doktorandenstelle noch nicht besetzt werden konnte.

AP4.1: Im Zeitraum vom 1. Juni bis 30. Juni 2013 wurden noch keine Arbeiten durchgeführt, da die Stelle erst ab 1. Juli 2013 besetzt werden konnte.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

Folgende Arbeiten sind für den nächsten Berichtszeitraum geplant:

AP1.1: Besetzung der Stelle

Einarbeitung und Literaturrecherche

AP4.1: Einarbeitung und Literaturrecherche

Sammlung und Bewertung der benötigten Daten für die Erstellung der Speziationsmodelle

### 5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Hochschule Ravensburg-Weingarten, Doggenriedstraße,<br>88250 Weingarten                         |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 030I</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>139.260,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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 Vorse, 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.

Erste Gespräche zur Kooperation mit anderen Teilprojekten dieses Verbundes fanden beim Kick-Off-Meeting am 21.6. beim Helmholtz Zentrum München statt.

## 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-Konkurrenzen  $\text{K}^+$  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**

Am 7. Mai wurden erstmals Wasser- und Schwebstoffproben aus dem Vorsee entnommen. Einer nahegelegenen Wiese wurden Bodenproben entnommen. Die Analyse der Aktivitätskonzentrationen ist im Gange.

Die Ionen-Chromatographie wurde auf die benötigten  $K^+$ - und  $NH_4^+$ -Konzentrationen kalibriert. Ein Gerät zur Bestimmung des TOC (Total Organic Carbon) wurde ebenfalls kalibriert. Erste Messergebnisse liegen vor.

Weitere Probennahmen sind in Vorbereitung.

Für das Vorhaben benötigte Materialien wurden bestellt.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Wie im Projektantrag vorgesehen, sollen im kommenden Halbjahr das Cs-Inventar und seine Tiefenverteilung im Boden, das Cs in Wasser und Schwebstoffen, in Fischen und in Wasserpflanzen untersucht werden.

Weiterhin soll mit der Modell - Recherche begonnen werden.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg<br>39, 85579 Neubiberg                                |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 031A</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>851.064,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Die Arbeiten im Berichtszeitraum beschränkten sich auf organisatorische und administrative Tätigkeiten zur Implementierung des Projekts.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Zunächst sollen Zellüberlebensexperimente am fokussierten Ionenstrahl etabliert werden (AP1). Hierzu sind die Bestrahlungsraten an SNAKE zu erhöhen. Die Teilchenrate im Submikrometer Strahlfokus soll mittels einer jüngst installierten Hoch-Strom-Quelle auf etwa  $10^6$  Protonen pro Sekunde erhöht werden. Die Verarbeitung dieser Teilchenraten erfordert die Optimierung der Zähl- und Steuerelektronik. Durch die Entwicklung spezieller Zellwachstumsbehälter soll die Fläche, welche für das Zellwachstum zugänglich ist, mechanisch limitiert werden, um so die Zellanzahl auf der zu bestrahlenden Fläche zu erhöhen und gleichzeitig sicherzustellen, dass keine Zellen außerhalb des Bestrahlungsbereichs wachsen können.

Zur Vermessung des zur Bestrahlung verwendeten fokussierten Strahls (AP2) sollen fluoreszierende Kernspurdetektoren verwendet werden, welche mit einem am Institut vorhandenen konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops ausgelesen werden. Zuerst soll die Auslese der Detektoren etabliert und das Ansprechverhalten auf einzelne Protonen charakterisiert werden.

In voraussichtlich zwei Strahlzeiten (August und voraussichtlich November) sollen strahlenbiologische Experimente mit dem fokussierten Protonenstrahl durchgeführt (AP4) sowie die Entwicklungen zur Steigerung der Bestrahlungsraten getestet (AP1) und Daten für die Charakterisierung der Kernspurdetektoren gewonnen werden (AP2).

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München,<br>Ismaninger Str. 22, 81675 München              |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 031B</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>333.636,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Die Arbeiten im Berichtszeitraum beschränkten sich auf organisatorische und administrative Tätigkeiten zur Implementierung des Projekts im Forschungszentrum.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Da bei der Mikrobestrahlung mit Teilchen nur geringe Zellzahlen bestrahlt werden können, muss der klassische Zellüberlebenstest modifiziert werden. Mit diesem modifizierten Testformat soll auch bei geringen Zellzahlen eine hohe statistische Signifikanz erreicht werden. Zur Bestimmung der RBW werden in einem ersten Schritt Chromosomenaberrationen, DNA Reparatur und das Zellüberleben untersucht.

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

Keine.

|  |  |   |
|--|--|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg |  | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 031C</b>       |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt C                   |  |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |  |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  |  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>238.179,00 EUR   |  | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Die Arbeiten im Berichtszeitraum beschränkten sich auf organisatorische und administrative Tätigkeiten zur Implementierung des Projekts im Forschungszentrum.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Zunächst soll die Bestrahlungsgeometrie im biophysikalischen Simulationsprogrammpaket PARTRAC den experimentellen Setup entsprechend angepasst werden, wie es den Messungen an der Ionenmikrostrahlanlage SNAKE am Münchener Tandembeschleuniger (Schmid et al. 2012 Phys. Med. Biol. 57, 5889-5907) zu Grunde lag.

Für diese Bestrahlungsbedingungen und die Referenzbestrahlungen mit Röntgenphotonen und sollen umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt und das derzeit zur Verfügung stehende Spektrum an biologischen Endpunkten, insbesondere DSB, DNA Fragmente in verschiedenen Längenbereichen, DNA Reparaturkinetiken und Ausbeuten and Chromosomenaberrationen unterschiedlichen Typs, hinsichtlich der relativen biologischen Wirksamkeit der jeweiligen Strahlenqualität analysiert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen werden. Das Ergebnis dieses Vergleichs soll zu einer kritischen Überprüfung und Optimierung der Modellansätze führen.

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

Keine.

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH,<br>Planckstr. 1, 64291 Darmstadt                            |   | <b>Förderkennzeichen:</b><br><b>02 NUK 031D</b> |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D |   |   |
| <b>Zuordnung zum FuE-Programm:</b><br>Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung   |   |   |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b><br>01.06.2013 bis 31.05.2017  | <b>Berichtszeitraum:</b><br>01.06.2013 bis 30.06.2013 |   |
| <b>Gesamtkosten des Vorhabens:</b><br>264.450,00 EUR   | <b>Projektleiter:</b><br>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**

Als Vorarbeit wurden in der Arbeitsgruppe geleistete Arbeiten auf ihrer Relevanz hinsichtlich des Forschungsgegenstandes des LET Verbunds gesichtet. Dabei erreichten vor allem erste Anwendungen des LEM an Zellüberlebensmessungen am Darmstädter Microbeam Aufmerksamkeit. Die in dem Zusammenhang benutzten analytischen Methoden und gewonnenen Erfahrungen stellen bereits erste Werkzeuge dar, auf die hinsichtlich des aktuellen Vorhabens aufgebaut werden kann.

Weiterhin wurde der Programmcode des LEM, der über Jahre generisch gewachsen war und einige redundant gewordene Programmteile enthielt, bereinigt und für die Implementierung weiterer Aspekte, in etwa der angedachten Strahlgeometrie, aufbereitet.

### **4. Geplante Weiterarbeiten**

Im Diskurs mit den experimentell orientierten Kollegen sollen die geplanten physikalischen und biologischen Randbedingungen zukünftiger Experimente an SNAKE erörtert werden. Darauf basierend soll eine Priorisierung der durchzuführenden Implementierungen erarbeitet werden, die sich am voraussichtlichen zeitlichen Verlauf der experimentellen Weiterentwicklungen orientiert. Mit der Integration neuer Aspekte in den Programmcode kann anschließend, gemäß Zeitplan des Gesamtvorhabens, begonnen werden.

In Absprache mit AP6 soll zudem erörtert werden, welche Maßnahmen nötig sind, um mit den verwendeten radiobiologischen Modellen möglichst parallel an den aufgeworfenen Fragestellungen arbeiten zu können. Gleichermäßen soll mit AP6 eine Strategie entwickelt werden, bestimmte Aspekte der Modelle systematisch zu vergleichen. Dies kann zunächst unabhängig von experimentellen Daten geschehen und kann daher unverzüglich aufgegriffen werden.

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



Keine.





### 3 Verzeichnis der ausführenden Forschungsstellen

|   |  |       |
|---|--|-------|
| 02 NUK 010G   | <b>ANSYS Germany GmbH, Birkenweg 14a, 64295 Darmstadt</b>  | 📖 28  |
| Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: CFD-Modellentwicklung und Validierung für die 3-dimensionale Simulation von Siedevorgängen in Brennelementen von DWR |  |       |
| 02 NUK 016CX  | <b>BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung GmbH, Achterstr. 30, 28359 Bremen</b>  | 📖 182 |
| Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt C  |  |       |
| 02 NUK 024A   | <b>Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter</b>   | 📖 200 |
| Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1  |  |       |
| 02 NUK 024E   | <b>Charité - Universitätsmedizin Berlin, Hindenburgdamm 30, 14195 Berlin</b>   | 📖 208 |
| Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5  |  |       |
| 02 NUK 003A   | <b>Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg</b>  | 📖 146 |
| Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese   |  |       |
| 02 NUK 003D   | <b>Elbe Kliniken Stade-Buxtehude gGmbH, Bremervörder Str. 111, 21682 Stade</b>   | 📖 152 |
| Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Epigenetische Veränderungen, Schadensinduktion, Prozessierung und Reparatur  |  |       |
| 02 NUK 005A   | <b>Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich</b>  | 📖 154 |
| Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität  |  |       |
| 02 NUK 015E   | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E   | 📖 170 |
| 02 NUK 019C   | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C | 📖 102 |
| 02 NUK 020E   | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E   | 📖 118 |
| 02 NUK 021A   | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A             | 📖 120 |



**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V.,  
Hansastr. 27 c, 80686 München**

- 02 NUK 011A Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt A  34
- 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  50





**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  198
- 02 NUK 020C Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C  114


**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  166
- 02 NUK 030C Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C  232

**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  138
- 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  186
- 02 NUK 025A Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1  210
- 02 NUK 031D Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D  252

**Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400,  
01328 Dresden**


- 02 NUK 010A Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Entwicklung von CFD-Modellen für Wandsieden und Aufbau eines Bündeltests mit hochauflösender, schneller Röntgentomographie  16












- 02 NUK 013A** Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse  84
- 02 NUK 014B** Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente  94
- 02 NUK 015F** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt F  172
- 02 NUK 019D** Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D  104
- 02 NUK 021B** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B  122
- 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  58
- 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  66
- 02 NUK 030F** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F  238

**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  164
- 02 NUK 024B** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2  202
- 02 NUK 026A** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A  216
- 02 NUK 030A** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C  228
- 02 NUK 031C** Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A  250


**Hochschule für angewandte Wissenschaften – Fachhochschule Aschaffenburg, Würzburger Str. 45, 63743 Aschaffenburg**


- 02 NUK 025C** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 3  214

- |  |   |
|--|---|
| <b>Hochschule Ravensburg-Weingarten, Doggenriedstr., 88250 Weingarten</b>  |   |
| 02 NUK 030I  | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I  244  |
| <b>Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau</b>  |   |
| 02 NUK 010C  | Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung von Siedevorgängen mit optischen Verfahren und Parameterbestimmung für CFD-Rechnungen an kleinskaligen Versuchsständen  20  |
| 02 NUK 018A  | Verbundprojekt NIZUK: Nichtinvasive Zustandsüberwachung von Kernreaktoren zur Detektion von Füllstandänderungen und der Deformation des Kerns; Teilprojekt A: Einsatz von Soft Computing-Methoden für die Kernzustandsdiagnose  44                             |
| <b>IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf</b> |   |
| 02 NUK 003C  | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Mitochondriale Schäden  150   |
| <b>Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main</b>   |   |
| 02 NUK 017F  | Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt F  196                          |
| 02 NUK 019E  | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E  106  |
| 02 NUK 021F  | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F  130  |
| <b>Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Saarstr. 21, 55122 Mainz</b>  |   |
| 02 NUK 013E  | Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Herstellung und Nutzung von Aktinidentargets  90  |
| <b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe</b>   |   |
| 02 NUK 019B  | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B  100  |
| 02 NUK 020B  | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B  112  |
| 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  70 |




- |  |  |
|--|--|
| <b>Klinikum der Universität München, Lindwurmstr. 2a, 80333 München</b>                                |  |
| 02 NUK 016B  | Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt B  180   |
| 02 NUK 024C  | Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3  204   |
| <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  226   |
| 02 NUK 031B  | Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B  248   |
| <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  62 |
| <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  168   |
| 02 NUK 021G  | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G  132   |
| 02 NUK 030D  | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D  234   |
| <b>Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig</b>                |  |
| 02 NUK 033   | TCAP-Neutronenflussstandard und Untersuchungen zur Messung inelastischer Neutronenstreuquerschnitte  134  |
| <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  126   |
| 02 NUK 021E  | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E  128   |
| 02 NUK 022A  | Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie  48   |


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  52


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  64

**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  108


**Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum**

02 NUK 010D Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Übertragung der CFD-Wandsiedemodelle zur Anwendung in Lumped Parameter-Codes zur Beurteilung der RDB-Außenkühlung  22


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)  76


**Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg**


02 NUK 012D Verbundprojekt Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Prozessen zur Abtrennung langlebiger Radionuklide (Partitioning); TP: Spektroskopische Untersuchungen zur Stabilität und Koordination von Aktinidkomplexen mit ausgewählten Extraktionsliganden  82


02 NUK 020D Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D  116





**Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen**

02 NUK 010F Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Validierung von Unterkanal- und CFD-programmen anhand von Brennstab-Bündelversuchen  26








02 NUK 015A Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A  162

02 NUK 019A Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A  98



02 NUK 020A Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A  110












- 02 NUK 021C** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C  124
- 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  72
- 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  74
- 02 NUK 030B** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B  230













|  |
|--|
| <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  142
- 02 NUK 016D** Verbundprojekt ISIMEP – Intrinsische Strahlenempfindlichkeit: Identifikation, Mechanismen und Epidemiologie; Teilprojekt D  184
- 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  188
- 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  190
- 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  192
- 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  194
- 02 NUK 022D** Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer  54

|  |
|--|
| <b>Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden</b> |
|--|

- 02 NUK 002F** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt: Ausbreitungspfade von Radionukliden in Luft, Wasser, Boden; TP: Wechselwirkung von Uran(VI) mit Biofilmen  144
- 02 NUK 010B** Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Turbulenz und Blasendynamik  18

- 02 NUK 010H** Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Experimentelle Untersuchung des Einflusses reaktorspezifischer Kühlmittelzusätze auf Siedevorgänge  30
- 02 NUK 010I** Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Darstellung von Siedevorgängen mittels PIV und Optischer-Kohärenz-Tomographie  32
- 02 NUK 013B** Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden  86
- 02 NUK 014A** Verbundprojekt Partitioning II: Multifunktionelle Komplexbildner mit N, O, S-Donorfunktionen für d- und f-Elemente  92
- 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  46
- Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg**
- 02 NUK 011D** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt D  40
- 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  56
- Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München**
- 02 NUK 007E** Verbundprojekt Individuelle Strahlenempfindlichkeit und genomische Instabilität: Einfluss von Rb1 Gen-Variationen auf die Ausbildung akuter Nebenwirkungen und auf das Auftreten bösartiger Strahlenspätchäden nach den bei einer konventionellen Strahlentherapie angewendeten Gamma-Dosen  160
- 02 NUK 010E** Verbundprojekt Modellierung, Simulation und Experimente zu Siedevorgängen in Druckwasserreaktoren; TP: Einfluss von Turbulenz und Sekundärströmungen auf das unterkühlte Strömungssieden in reaktortypischen Konfigurationen  24
- 02 NUK 011E** Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt E  42
- 02 NUK 030E** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E  236

- |  |   |
|--|---|
| <b>TÜV NORD SysTec GmbH &amp; Co. KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg</b>             |   |
| 02 NUK 011B  | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt B  36  |
| 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  60 |
| <b>TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Westendstr. 199, 80686 München</b>                  |   |
| 02 NUK 011C  | Verbundprojekt CIWA: Untersuchungen zu Kondensationsschlägen in Rohrleitungssystemen - Condensation Induced Water Hammer; Teilprojekt C  38  |
| <b>Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen</b>                              |   |
| 02 NUK 015H  | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H  176  |
| 02 NUK 030H  | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H  242  |
| <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  78  |
| 02 NUK 031A  | Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A  246  |
| <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  140  |
| 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  156         |
| <b>Universität Konstanz, Universitätsstr. 10, 78464 Konstanz</b>                       |   |
| 02 NUK 025B  | Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2  212   |
| <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  96   |
| 02 NUK 026E  | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E  224  |

- |             |   |     |
|-------------|---|-----|
|             | <b>Universität Rostock, Ulmenstr. 69, 18057 Rostock</b>   |     |
| 02 NUK 005D | Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und der Analyse individueller Strahlenempfindlichkeit   | 158 |
|             | <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 | 68  |
|             | <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  | 220 |
|             | <b>Universität zu Köln, Albertus-Magnus-Platz, 50931 Köln</b>   |     |
| 02 NUK 013D | Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Gamma-Imaging mit hochsegmentierten Germaniumdetektoren  | 88  |
|             | <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  | 206 |
|             | <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  | 148 |
|             | <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  | 178 |
| 02 NUK 026B | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B  | 218 |
|             | <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  | 222 |
|             | <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  | 174 |
| 02 NUK 030G | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G  | 240 |