

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

PTE-N Nr. 9

BMBF geförderte FuE zu
„Nukleare Sicherheitsforschung“

Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2014

Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung
PTKA-WTE

September 2014

PTE-Berichte

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

Die Fortschrittsberichtsreihen behandeln folgende Themenschwerpunkte:

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

Die Fortschrittsberichtsreihen sind online verfügbar:

www.ptka.kit.edu/wte/287.php

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 Forschungsstellen alphabetisch aufgelistet.

Alle bisherigen Fortschrittsberichte sind auf den Internetseiten des Projektträgers unter folgendem Link abrufbar:

<http://www.ptka.kit.edu/wte/287.php>

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen.....	1
1.1	<i>Sicherheitsforschung für Kernreaktoren</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung</i>	<i>5</i>
1.3	<i>Strahlenforschung</i>	<i>7</i>
2	Formalisierte Zwischenberichte	11
2.1	Sicherheitsforschung für Kernreaktoren	11
2.2	Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung.....	57
2.3	Strahlenforschung.....	97
3	Verzeichnis der Forschungsstellen	183

1 Verzeichnis der Fördervorhaben gemäß FuE-Themenbereichen

1.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

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	📖 12
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	📖 14
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	📖 16
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	📖 18
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	📖 20
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	📖 22
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	📖 24

- 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.** 26
- 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** 28
- 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)** 30
- 02 NUK 027A** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt A: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Nachwärmeabfuhr von Brennelementen in ausdampfenden Nasslagern **TU Dresden** 32
- 02 NUK 027B** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt B: Simulation von Strömung und Wärmetransport unter den Bedingungen eines Lagerbeckens **TU Dresden** 34
- 02 NUK 027C** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt C: Analyse und CFD-Modellentwicklung der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.** 36
- 02 NUK 027D** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegetriebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten **Hochschule Zittau/Görlitz** 38

- 02 NUK 027E** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt E: Ortsaufgelöste Temperatur- und Gasphasengeschwindigkeitsmessung zur Analyse der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen **TU Dresden**  40
- 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**  42
- 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.**  44
- 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**  46
- 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)**  48
- 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)**  50
- 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)**  52
- 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**  54

1.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung

02 NUK 013A	Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 58
02 NUK 019A	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A	Sondervermögen Großforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 60
02 NUK 019B	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 62
02 NUK 019C	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 64
02 NUK 019D	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 66
02 NUK 019E	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E	Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main	📖 68
02 NUK 019F	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn	📖 70
02 NUK 020A	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A	Sondervermögen Großforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 72
02 NUK 020B	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 74
02 NUK 020C	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	📖 76

02 NUK 020D	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg	📖 78
02 NUK 020E	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 80
02 NUK 021A	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 82
02 NUK 021B	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 84
02 NUK 021C	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C	Sondervermögen Großforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 86
02 NUK 021D	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	📖 88
02 NUK 021E	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	📖 90
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	📖 92
02 NUK 021G	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G	Leibniz Universität Hannover	📖 94

1.3 Strahlenforschung

- | | | | |
|--------------------|--|--|-------|
| 02 NUK 003A | Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; Teilprojekt: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese | Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg | 📖 98 |
| 02 NUK 005A | Verbundprojekt Bidosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbidosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität | Forschungszentrum Jülich GmbH | 📖 100 |
| 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) | 📖 102 |
| 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 | 📖 104 |
| 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 | 📖 106 |
| 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 | 📖 108 |
| 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 | 📖 110 |
| 02 NUK 015H | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H | Universität Bremen | 📖 112 |
| 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 | 📖 114 |
| 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 | 📖 116 |

- 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** 118
- 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** 120
- 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** 122
- 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** 124
- 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** 126
- 02 NUK 024A** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1 **Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter** 128
- 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** 130
- 02 NUK 024C** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3 **Klinikum der Universität München** 132
- 02 NUK 024D** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4 **Universitätsklinikum Essen** 134
- 02 NUK 024E** Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5 **Charité - Universitätsmedizin Berlin** 136

- 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**  138
- 02 NUK 025BX** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2 **Hochschule Albstadt-Sigmaringen**  140
- 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**  142
- 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**  144
- 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**  146
- 02 NUK 026C** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C **Universität Ulm**  148
- 02 NUK 026D** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D **Universitätsmedizin Rostock**  150
- 02 NUK 026E** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E **Universität Leipzig**  152
- 02 NUK 026F** Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F **Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München**  154
- 02 NUK 030A** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt A **Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Neuherberg**  156
- 02 NUK 030B** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B **Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**  158

02 NUK 030C	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuklid- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C	Friedrich-Schiller- Universität Jena	📖 160
02 NUK 030D	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuk- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D	Leibniz Universität Hannover	📖 162
02 NUK 030E	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuk- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E	TU München	📖 164
02 NUK 030F	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuk- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 166
02 NUK 030G	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuk- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G	Verein für Kernver- fahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V.	📖 168
02 NUK 030H	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuk- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H	Universität Bremen	📖 170
02 NUK 030I	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuk- liden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I	Hochschule Ravens- burg-Weingarten	📖 172
02 NUK 031A	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET- Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A	Universität der Bun- deswehr München	📖 174
02 NUK 031B	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET- Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B	Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München	📖 176
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	📖 178
02 NUK 031D	Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET- Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D	GSI Helmholtzzent- rum für Schwerio- nenforschung GmbH, Darmstadt	📖 180

2 Formalisierte Zwischenberichte

2.1 Sicherheitsforschung für Kernreaktoren

Zuwendungsempfänger: Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		Förderkennzeichen: 02 NUK 018A
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 649.368,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Kratzsch	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.3: Die konstruktive Ausarbeitung des Kleinversuchsstandes (KVS) wurde für die folgenden sieben Hauptkomponenten: Grundgestell mit Schaltkästen, Steuersystem, Quellenverfahrssystem, verfahrbare Stoffbarriere, Wasserbarrieren, Druckluftsystem, Messsystem fertiggestellt und in einem technischen Bericht dokumentiert. Für jede Teilkomponente wurde ein Leistungsverzeichnis erstellt, welches die Basis für die Angebotseinholung bildete. Für jede Komponente wurden Angebote eingeholt und die besten Angebote bestimmt und mit der Zustimmung des Projektträgers bei den ausgewählten Firmen bestellt. Es erfolgte bereits die Inbetriebnahme und Tests der gelieferten Teilkomponenten (Quellverfahrssystem und Steuersystem). So wurde das Leittechniksystem installiert und vorkonfiguriert und die Gammassensoren sowie die Linearmotoren erfolgreich einem Funktionstest unterzogen. Für die weiteren Komponenten sowie für den gesamten KVS wurde die Inbetriebnahmeversuche geplant.
- Für das im Simulationssystem „Dynstar“ programmtechnisch umgesetzte Modell für Strahlungstransportrechnungen und Simulationen von Gammastrahlungsverteilungen erfolgten eine Validierung sowie die Erstellung einer Dokumentation zur Funktionsweise.
- AP1.4: In ersten Untersuchungen konnte die generelle Einsatzfähigkeit der entwickelten Methoden zur Kernzustandsdiagnose nachgewiesen werden. Dazu wurden Simulationsmodelle für drei diversitäre und unabhängig arbeitende Methoden (1. Methode: Berechnung und Vergleich von Korrelationskoeffizienten von Gammastrahlungsvektoren, 2. Methode: Berechnung der Abweichung zwischen gemessenen und vorab berechneten Gammastrahlungsvektoren, 3. Methode: Soft Computing-Modelle (Multilayer Perzeptrons, Fuzzy-Systeme nach Takagi-Sugeno-Kang) zur Klassifikation von Gammastrahlungsvektoren) erstellt und hinsichtlich der Kriterien „Identifikationsgenauigkeit“ und „Robustheit“ analysiert. In Folge der Robustheitsanalysen zeigte sich, dass bei Ausfall von Sensoren die entwickelten Methoden zur Kernzustandsdiagnose unzureichende Ergebnisse liefern. Zur Kompensation von Sensorausfällen wurden Algorithmen entwickelt, die fehlerhafte Sensorsignale echtzeitfähig korrigieren.
- Für die Entwicklung weiterer diversitärer Methoden wurden innerhalb eines Forschungsaufenthaltes in Südafrika (Zeitraum: 06.01. – 25.02.2014) gemeinsam mit der North-West University in Potchefstroom Radiale Basisfunktionsnetzwerke (RBFN) untersucht und simulationsgestützt analysiert. RBFN ordnen sich in die Bereiche „Soft Computing“ bzw. „Künstliche Neuronale Netze“ ein und eignen sich durch ihre guten Klassifikationseigenschaften zum Einsatz für das zu entwickelnde Messverfahren. Während des Forschungsaufenthaltes wurden in einer ersten Zielsetzung die theoretischen Grundlagen zu RBFN erarbeitet. Darauf aufbauend wurde in der Programmiersprache R ein Simulationsmodell für RBFN erstellt. Die Analyse erfolgte mit Hilfe einer Datenbasis mit postulierten Gammastrahlungsverteilungen, wie diese im Falle eines Kernschmelzunfalls außerhalb eines Reaktordruckbehälters auftreten können. Durch den Nachweis der Einsatzfähigkeit von RBFN für das Messverfahren konnte der Forschungsaufenthalt erfolgreich abgeschlossen werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.3: Im weiteren Projektverlauf erfolgen der Aufbau des KVS, die Erstellung der Bedienoberfläche und die Implementierung des Kernzustandsdiagnosealgorithmus in die Versuchsstandbedienoberfläche. Ferner sind die Inbetriebnahmeversuche für den kompletten KVS durchzuführen und die weitere Versuchsdurchführung zu planen. Weiterhin ist eine Dokumentation zur Funktionsweise des KVS zu erstellen.
- AP1.4: Das Gesamtmodell sowie die darin enthaltenen Methoden zur Kernzustandsdiagnose sind mit Hilfe realitätsnaher Datenbasen (erzeugt mittels dem Kleinversuchsstandes sowie Monte-Carlo-Simulationen beim Projektpartner) hinsichtlich der Kriterien „Identifikationsgenauigkeit“ und „Robustheit“ weiter zu analysieren. Des Weiteren sollen weitere diversitäre Methoden zur Kernzustandsdiagnose ausgearbeitet und analysiert werden.
- Das Gesamtmodell sowie die Methoden zur Kernzustandsdiagnose sind nachfolgend im Versuchstand zu implementieren sowie deren Identifikationsgenauigkeit und Robustheit durch eine echtzeitliche Änderung von Gammastrahlungsverteilungen und aufschalten von Störgrößen auf den Versuchstand nachzuweisen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 018B
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 363.588,00 EUR	Projektleiter: 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

AP1.3: Die Berechnung des Gammastrahlungsfeldes durch aktivierte Reaktorkomponenten, welches als Grundlage für alle Sensitivitätsanalysen benötigt wird, wurde abgeschlossen. Weiter wurde für einen Satz von einfachen Modellzuständen, die einen Reaktor im schweren Störfall mit abfallendem Kühlmittelfüllstand und eine Kernschmelze mit Verlagerung von Kerninventar in das untere Plenum darstellen, die Quellverteilung im Kern bzw. im verlagerten Kernmaterial bestimmt und anschließend die Verteilungen des Gammaflusses außerhalb des RDB berechnet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.3: Berechnung der Gammastrahlungsfelder für einen Satz detaillierterer Reaktorzustände; Einbezug von zeitabhängigen Prozessen auf die Strahlungsfelder (z. B. Zerfall kurzlebiger Nuklide)
- AP1.4: Ableitung optimaler Detektorpositionen und –konfigurationen aus den gewonnenen Informationen über die Hintergrundstrahlung und die Gammastrahlung aus dem Kern

5. Berichte, Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge:

C. Brachem, J. Konheiser, U. Hampel: „Investigations on the Discrimination of Nuclear Reactor Core State Changes by the external Gamma Radiation Field”, 45. Jahrestagung Kerntechnik, Frankfurt, 2014.

C. Brachem, J. Konheiser, U. Hampel: „The Gamma Radiation emitted by a PWR Core under Severe Accident Conditions“, 22nd International Conference on Nuclear Engineering, Prag, 2014.

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		Förderkennzeichen: 02 NUK 022A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung inno- vativer Extinktionsphotometrie		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 31.12.2015		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 681.684,00 EUR		Projektleiter: 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: Zur Koordination (TPA-EA 1.3) des Projektes trafen sich die Projektpartner am 20. Februar 2014 zu einem eintägigen Projekttreffen in Freiburg. Hier wurden die bisherigen Fortschritte der einzelnen Projektpartner dargestellt, Absprachen für die Durchführung von Stresstests von Einzelkomponenten (TPA-EA 3.3) für die Feuchtesensoren getroffen und das weitere Vorgehen für den kommenden Berichtszeitraum abgestimmt.
- AP2: Der Kleinversuchsstand (TPA-EA 2.3) ist im Berichtszeitraum ausgeliefert worden. Die Auslegung der Behälterheizung ist abgeschlossen und konnte bestellt werden. Die bereits ausgelieferte Messtechnik wurde in das Messdatenerfassungssystem eingebunden. Angebote für die Behälterheizung wurden eingeholt. Eine Firma wurde in Abstimmung mit dem Projektträger beauftragt.
Mit ersten Abstimmungen und Vorbereitungen zur Nutzung der auch anderweitig genutzten REKO-4 Behälter (TPA-EA 2.4) wurde im Berichtszeitraum begonnen.
- AP3: Mit der Durchführung von Versuchen zum Einfluss von Störspektren bei der Aerosolmessung (TPA-EA 3.1) und Durchführung von Online-Tests des erweiterten FASP (TPA-EA 3.4) konnte im Berichtszeitraum begonnen werden. Erste Versuche mit SnO₂ und CsI wurden im Strömungskanal des Kleinversuchsstandes durchgeführt. Die Versuche sollen seitens des MathCCES dazu genutzt werden, die komplexen Brechungsindizes zu bestimmen.
Die Durchführung von Stresstests von Einzelkomponenten (TPA-EA 3.3) für die zu qualifizierenden Feuchtesensoren konnten noch nicht abgeschlossen werden, weil es Lieferschwierigkeiten bei einigen Komponenten für die Feuchtesensoren gab. Die Stresstests sind nun für Anfang des zweiten Halbjahres geplant.
Mit der Durchführung von Online-Tests des Steam-FASP (TPA-EA 3.5) konnte noch nicht begonnen werden, da das Steam-FASP sich noch in Freiburg befindet und dort aufgebaut wird. Für die Qualifizierungstests steht es daher noch nicht zur Verfügung.

4. Geplante Weiterarbeiten

Damit der Kleinversuchsstand in Betrieb genommen werden kann, muss der gestellte Bauantrag zur Aufstellung des Kleinversuchsstands genehmigt und der Hallenboden ertüchtigt werden. Erst dann können die weiteren Arbeiten im Kleinversuchsstand erfolgen. Dazu zählt auch der Aufbau der Heizung. Diese soll im kommenden Berichtszeitraum geliefert werden. In der Zwischenzeit werden weitere Versuche im Strömungsrohr (TPA-EA 3.1 und TPA-EA 3.4) durchgeführt. Gleichzeitig werden die einzelnen Anlagenteilsegmente aufgebaut und auf mögliche Rückwirkungen zwischen ihnen überprüft.
Für die zu qualifizierenden optischen Feuchtesensoren werden die Stresstests im kommenden Berichtszeitraum durchgeführt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Ein Beitrag über das Verbundprojekt wurde auf der Jahrestagung Kerntechnik 2014 veröffentlicht.

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Hansastr. 27c, 80686 München		Förderkennzeichen: 02 NUK 022B
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 31.12.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 605.403,00 EUR	Projektleiter: 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

Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:

2014 soll das Konzept des Feuchtemesssystems umgesetzt und ein funktionsfähiges System aufgebaut werden. Die prinzipielle Eignung des Verfahrens soll unter realen Bedingungen in einem Autoklaventest nachgewiesen werden. Parallel dazu werden Messungen mit einem Demonstrator durchgeführt, um Erfahrungen mit dem System zu sammeln und einen robusten Auswertalgorithmus zu entwickeln.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Weiterentwicklung des bestehenden Streulichtphotometers:

Die Software des Streulichtphotometers wurde verbessert und an die bevorstehenden Versuchsreihen angepasst. Beispielsweise wurde zusätzlich eine Speicherung der Daten im Binärformat implementiert, um die Datenmengen im überschaubaren Bereich zu halten.

Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:

Im ersten Halbjahr 2014 wurden weitere Versuche mit dem Demonstrator durchgeführt. Hierfür wurde eine Messzelle konstruiert, um Messungen unter typischen Randbedingungen wie Drücke von 0 bis 6 bar sowie Temperaturen bis 150 °C durchzuführen. Die Auswertung der ersten Messungen sind vielversprechend, was Signalqualität und Messrate betrifft. Die Messzelle wurde um spezielle Ein- und Auslassventile erweitert, die ein möglichst geringes Totvolumen aufweisen. Dies ist notwendig, da nur der Innenraum der Zelle beheizbar ist, nicht jedoch die Zuleitungen zu den Ventilen. Um Effekte durch unerwünschte Kondensation von Wasser in den Zuleitungen zu minimieren, musste dieses Totvolumen ebenfalls minimiert werden. Es wurden noch keine qualitativen Auswertungen bezüglich der Feuchtemessung vorgenommen. Weitere Details sind dem Jahresbericht 2014 zu entnehmen.

Parallel dazu wurden die Arbeiten zum Aufbau eines Gesamtsystems vorangetrieben. Entsprechende Bauteile wie Gehäuse, Netzteile, Minicomputer, Mechaniken zur Befestigung der Einzelkomponenten innerhalb des Gehäuses und temperaturfeste Fasern wurden beschafft und zusammengebaut.

Es wurde ein passiver Messkopf konstruiert und hergestellt. Er besteht aus einer rückseitenverspiegelten Linse und zwei Faserkopplungen. Wegen der chemischen Beständigkeit gegenüber den verwendeten Aerosolen (CsOH, CsI, SnO₂) wurde er aus Edelstahl gefertigt. Bei ersten Messungen konnte festgestellt werden, dass der Kopf im justierten Zustand ohne Aerosol einen Transmissionsgrad von 0,5 hat.

Eine graphische Benutzeroberfläche wurde auf Basis von MATLAB erstellt. Sie hilft, automatisierte Tests durchzuführen und Messdaten aufzuzeichnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:

Im Juli 2014 wird das System im Autoklaven der Firma Becker Technologies unter realen Bedingungen getestet. Es wird überprüft, ob das System hohen Drücken, Temperaturen und den Aerosolen standhält.

Für die Auslieferung des Systems ist eine CE-Zertifizierung notwendig. Im Rahmen dieser Zertifizierung wird auch ein EMV-Test durchgeführt.

Durch weitere Messungen mit dem System sollen noch mehr Erfahrungen gesammelt werden und in die Entwicklung eines robusten Auswertalgorithmus einfließen.

Weiterhin wird die graphische Benutzeroberfläche weiterentwickelt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		Förderkennzeichen: 02 NUK 022C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt C: Entwicklung eines ef- fizienten Auswertalgorithmus zur Mie-Inversion		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 31.12.2015		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 280.116,00 EUR		Projektleiter: 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 angewendet 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

Zusätzlich zu den geplanten Arbeitspaketen wurde die Rekonstruktion der lichtwellenlängen-abhängigen Aerosolbrechungsindizes studiert. Dazu wurde das Lorentz-Oszillatormodell verwendet. Zunächst wurde nach Einführung geeigneter Variablen mittels nichtlinearer Ausgleichsrechnung eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den vorliegenden Brechungsindizes für Wasser festgestellt (AP2.4). Zusammen mit der Mie-Theorie und dem Beer-Lambertschen Gesetz wurde das Modell dafür herangezogen, eine nur noch von wenigen unbekannt Parametern abhängende Funktion zu definieren, die an die FASP-Messdaten angepasst werden soll. Das Lorentz-Oszillatormodell stellt somit eine Zusatzannahme zu der Mie-Theorie dar (AP2.3). Die auf diese Weise nun bestimmten Parameter sollen die Rekonstruktion der Brechungsindizes ergeben. Es wurden mit dem Oszillatormodell künstliche Messdaten erzeugt und mit deren Hilfe eine Sensitivitätsanalyse der Anpassungsfunktion in einer Umgebung der jeweils wahren zugrundeliegenden Parameter der Brechungsindexkurve durchgeführt (AP2.4), die eine lokale Eindeutigkeit der bestmöglichen Parameter ergab.

Weiterhin wurden FASP-Messungen simuliert (AP3.3) und die auftretenden Fehler in den Intensitätswerten am Ende der Versuchsmessstrecke sowohl mit gleichverteilten als auch mit Gauß-verteilten Fehlern modelliert (AP3.2).

Parallel zu diesen Arbeiten wurde die theoretische Untersuchung der Rekonstruktion der Partikelgrößenklassenverteilung fortgeführt. Aufbauend auf bekannte Existenzergebnisse wurde die Theorie der Tikhonovregularisierung unter linearen Nebenbedingungen um Eindeutigkeitskriterien erweitert, bei deren Erfüllung man das Diskrepanzprinzip für die Wahl des Regularisierungsparameters anwenden kann (AP2.2). Zusätzlich konnte als Grundlage einer neuartigen Parameterwahlstrategie die Monotonie des Ausgleichsresiduums unter stetig zunehmender gleichmäßiger Beschränkung der zweiten finiten Differenzen der gesuchten Lösung gezeigt werden. Die theoretischen Schwierigkeiten bei der Twomeyregularisierung, wie etwa die nicht garantierte Eindeutigkeit des Regularisierungsparameters und die stark anwachsende Kondition der Systemmatrix bei Überregularisierung, konnten auf diese Weise umgangen werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Es soll eine zuverlässige Strategie gefunden werden, um auch unter Messfehlereinfluss brauchbare Startparameter für das Lorentz-Oszillatormodell in der nichtlinearen Ausgleichsrechnung an die FASP-Messdaten zu bestimmen. Sobald dem MathCCES FASP-Messdaten übermittelt werden, soll eine benutzerfreundliche Bedienungssoftware für deren Auswertung im Hinblick auf die Brechungsindizes erstellt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

T. Kyrion, G.W. Alldredge, M. Frank: Choice of Regularization Parameters for Mie Inversion, Bericht.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 022D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 31.12.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 427.668,00 EUR	Projektleiter: 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 H₂O-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-Spektrometerkopfes.

Hiermit sollen in ersten Vergleichsmessungen an kleinskaligen Laborsystemen die unterschiedlichen technologischen Ansätze zur absoluten H₂O-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

Die Fertigung des Prototyps des Lasermesskopfes wurde abgeschlossen und die einzelnen Komponenten zusammengesetzt. In verschiedenen Vorversuchen wurden daraufhin die Transmissionsgüte der Glasfasern und die Abbildungseigenschaften der Spektrometeroptik hinsichtlich ihrer Stabilität untersucht. Eine zusätzlich integrierte Spülung der Faserenden und der Optik soll verhindern, dass sich Aerosole absetzen und somit ein Dauereinsatz sicherstellt. Nach weiteren Optimierungen ist der Lasermesskopf einsatzbereit für die ersten Autoklaven-Tests bei erhöhtem Druck, Temperatur und Partikelbelastung.

In aufwendigen Untersuchungen wurde die Dichtigkeit der Durchführungsflansche, der Thermoelementdurchführungen, der Spülgasdurchführungen und der kommerziell erworbenen Faserdurchführungen überprüft. Hierbei konnten die Multimode-Faserdurchführungen der Druckbeaufschlagung nicht Stand halten. Da in der verbleibenden Zeit bis zu dem Autoklaven-Versuch kein Ersatz vom ursprünglichen Hersteller beschafft werden konnte, wurde auf eine selbstentwickelte Lösung zurückgegriffen, der nach kurzer Optimierungsphase die Drucktests bestand. Untersuchungen der Dichtigkeit bei höheren Temperaturen (max. 200 °C) stehen noch aus. Durch das entwickelte Zwei-Kammer-Durchführungssystem wird zusätzlich sichergestellt, dass während der Autoklaven-Versuche keine Atmosphäre entweichen kann, falls eine Durchführung den Beanspruchungen nicht Stand hält.

Eine neu konstruierte Referenzmesszelle befindet sich zurzeit in der Inbetriebnahme. Hierbei werden in einem ersten Schritt der Strahlengang und die Dichtheit bei hohem Druck und hohen Temperaturen überprüft.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Juli 2014 werden die ersten Autoklaven-Versuche bei Becker Technologies stattfinden. Die Daten aus dem Autoklaven-Test werden ausgewertet und zur weiteren Verbesserung und Optimierung des Lasermesskopfes, der Durchführungen und des Versorgungssystems genutzt. In der neu konstruierten Referenzmesszelle soll die Liniendatenbestimmung verbessert werden, um die Unsicherheiten in der Bestimmung der Wasserdampfkonzentration weiter zu minimieren.

Im Frühjahr 2015 soll das Hygrometer im 1 m³-Behälter in Jülich zum Einsatz kommen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg		Förderkennzeichen: 02 NUK 023A
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2012 bis 31.05.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 781.530,00 EUR	Projektleiter: 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 Einflusses 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

Änderungen an den Versuchsanlagen:

DN200-Technikumsanlage

- Versuchsanlage DN200 fertiggestellt und in Betrieb genommen
- Änderung der Einlaufgeometrie gemäß Abstimmung im Projekttreffen durchgeführt
- Sicherungseinrichtungen gegen Schäden am Gebäude bei Beschädigung der Versuchsanlage ausgelegt und aufgebaut
- Gefährdungsbeurteilung erstellt und eingereicht

DN15-Vorversuchsanlage

- Änderung an der Einlaufgeometrie gemäß Abstimmung im Projekttreffen durchgeführt
- zusätzlichen Zwischenboden mit 4 variabel einsetzbaren Absauggeometrien konstruiert und gefertigt
 - Ansaugung mit scharfkantigem Übergang in die Rohrleitung
 - Ansaugung mit $r=0,5 d$ abgerundet auf $d_{\text{neu}}=2d_{\text{DN15}}=30 \text{ mm}$
 - Ansaugung mit Lochblende: Querschnittsfläche $A_{\text{neu}} = 1/2 A_{\text{DN15}}$
 - Ansaugung siebartig mit 28 Bohrungen $\varnothing 2 \text{ mm}$, $\Sigma A_{\text{nBohrungen}} = 1/2 A_{\text{DN15}}$

Durchgeführte experimentelle Arbeiten:

DN15: Bestimmung der Wirbeltypen und Luftkernlängen unter

- Variation der Froudezahlen
- Variation der Ansauggeometrien

Numerische Arbeiten:

- Erstellung von CFD-Gittern für verschiedene Ansaug- und Einlassgeometrien (DN15)
 - strukturierte Gitter mittels (ANSYS ICEM CFD)
 - unstrukturierte, Hexader-dominierte Gitter mittels (OpenFOAM SnappyHexMesh)
- Erste Berechnungen auf den Gittern zum Vergleich stationärer und instationärer Lösung mit den OpenFOAM Solvern icoFoam und simpleFoam

4. Geplante Weiterarbeiten

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

- DN15: Ermittlung der Tangentialgeschwindigkeit und Fluidgeschwindigkeit in Ablaufrichtung sowie der Strömungsstruktur mittels Highspeed-PIV
- DN200: Ermittlung der Luftkernlängen und Wirbeltypen an ausgesuchten Ansauggeometrien unter Variation der Froudezahlen
- DN200/DN15: Ermittlung des Gasgehaltes unter Variation der Froudezahl in der Saugleitung
- DN200/DN15: Ermittlung des Dralls in der Saugleitung mittels Dopplersonographie
- numerische Ermittlung der Strömungsstruktur im Vorlagebehälter mittels OpenFOAM

5. Berichte, Veröffentlichungen

Für eine gemeinsame Publikation werden derzeit numerische und experimentelle Daten ermittelt und gegenübergestellt.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 023B
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2012 bis 31.05.2016		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 513.320,00 EUR		Projektleiter: 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 Einflusses auf Kreiselpumpe und Armaturen. Dafür sollen theoretische Modelle entwickelt, experimentell an groß- und kleindimensionierten Anlagenkomponenten validiert und ggf. mit physikalisch begründeten Ansätzen (z. B. lokal unterschiedliche Turbulenzmodelle) an reale Prozesse angepasst werden. Neben technischen Zielen werden mit dem beantragten Projekt auch aktuelle gesellschaftspolitische Ziele verfolgt, da Nachwuchskräfte für den sicheren Betrieb kerntechnischer Anlagen ausgebildet werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP2: Es erfolgte die vollständige Fertigstellung und Inbetriebnahme der modularen Laborversuchsanlagen im HZDR Labor. Alle Komponenten der Anlagen wurden hinsichtlich ihrer Funktionstüchtigkeit überprüft und es erfolgte die Inbetriebsetzung der Anlagen. Alle für den Betrieb notwendigen Anlagenkennlinien wurden aufgenommen und die korrekte Betriebsfähigkeit der Anlagen wurde nachgewiesen.
- AP4: Die Entwicklung von speziellen Algorithmen zur Auswertung der tomographischen Untersuchungen wurde abgeschlossen. Hierbei waren neben der quantitativen Bestimmung von Gasgehalten in tomographischen Messdaten die Entwicklung von Algorithmen zur Datenerfassung und Auswertung für die winkelaufgelöste Tomographie von rotierenden Objekten ein Schwerpunkt.
- Die experimentellen Untersuchungen an der Kreiselpumpe im industriellen Maßstab wurden begonnen. Es wurden zunächst die, für die Auswertung notwendigen Referenzmessungen durchgeführt und ausgewertet. Anschließend wurden die Messserien mit den einzelnen tomographischen Messungen an der Pumpe begonnen. Dabei wurden die jeweiligen Versuchsbedingungen gemäß der erarbeiteten Testmatrizen eingestellt. Parallel dazu erfolgte die Rekonstruktion der Datensätze, so dass die ersten Datensätze für die weitere Aufbereitung und Auswertung zur Verfügung stehen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP4: Vorbereitung der Versuchsserien an der Armatur und Vorbereitung der röntgentomographischen Untersuchung an einer kleinskaligen Kreiselpumpe (Modellkreiselpumpe).
- AP6: Durchführung der experimentellen Untersuchungen anhand der erstellten Testmatrizen und Modellbildung anhand der Versuchsergebnisse.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg		Förderkennzeichen: 02 NUK 023C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt SAVE: Sicherheitsrelevante Analyse des Verhaltens von Armaturen, Kreiselpumpen und Einlaufgeometrien unter Berücksichtigung störfallbedingter Belastungen; Teilprojekt C: Analytische Untersuchungen der Wirbelbildung in Pumpeneinläufen		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2012 bis 31.05.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 443.808,00 EUR	Projektleiter: 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 Einflusses auf Kreiselpumpe und Armaturen. Dafür sollen theoretische Modelle entwickelt, experimentell an groß- und kleindimensionierten Anlagenkomponenten validiert und ggf. mit physikalisch begründeten Ansätzen (z. B. lokal unterschiedliche Turbulenzmodelle) an reale Prozesse angepasst werden. Neben technischen Zielen werden mit dem beantragten Projekt auch aktuelle gesellschaftspolitische Ziele verfolgt, da Nachwuchskräfte für den sicheren Betrieb kerntechnischer Anlagen ausgebildet werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeitspakete AP2 und AP7 bearbeitet.

AP2: Der Aufbau der Versuchsanlagen ist inzwischen weitgehend abgeschlossen, so dass während des Projekttreffens am 07.04.2014 unter aktiver Mitwirkung der TÜV NORD SysTec weitere Details bzgl. der Durchführung und messtechnischen Auswertung der geplanten Experimente besprochen werden konnten. Für alle drei Messbereiche (Ansaugbecken, Pumpe und Armatur) wurden u. a. die für die Versuche relevanten Parameter identifiziert und die Messgrößen festgelegt. Wichtige Parameter für die Wirbelausbildung im Ansaugbecken sind beispielsweise die radiale Reynoldszahl bzw. der Ansaugvolumenstrom, die Wasserüberdeckung sowie die Zulauf- und Einlaufgeometrie. Zudem sollen neben der Messung des Geschwindigkeitsfeldes mittels PIV-Messungen u. a. der Wirbeltyp und ggf. die Länge des Luftkernschlauchs gemessen werden. Außerdem wurde sich während des Projekttreffens auf die Geometrie der Zulaufrohre im Becken geeinigt. Um eine Rückwirkung auf die Wirbel im Zentrum des Beckens weitgehend zu verhindern, sollen diese auf die Behälterwand

gerichtet werden. Die Zirkulation lässt sich nach derzeitiger Planung über den Winkel der Rohre zur Vertikalen oder Blenden regulieren.

Des Weiteren hat die TUHH ein skaliertes Modell der Versuchsanlage im Labormaßstab gebaut. Dieses Modell wird für Vorversuche genutzt. Unter anderem soll der Einfluss verschiedener Pumpeneinlaufgeometrien auf die Oberflächenwirbel getestet werden. Die Erfahrungen aus diesen Vorversuchen werden dann im Anschluss für die Versuche im eigentlichen Testbehälter verwendet. Die TÜV NORD SysTec steht im Hinblick auf die Laborversuche im kontinuierlichen Austausch mit der TUHH.

- AP7: Mit dem von der TÜV NORD SysTec entwickelten Löser für rotationssymmetrische Potenzialströmungen wurden am Beispiel des Jain-Versuchs zwei unterschiedliche Einlaufgeometrien (scharfkantiger und abgerundeter Stutzen) untersucht. Da in beiden Fällen nahezu dieselbe Strömung berechnet wurde, wurde von der TÜV NORD SysTec auf dem Projekttreffen nochmals das Interesse betont, den Einfluss verschiedener Einlaufgeometrien experimentell zu untersuchen.

Des Weiteren wurden erste einphasige CFD-Simulationen der Laboranlage von der TÜV NORD SysTec durchgeführt. Unter anderem wurde anhand einer Gitterstudie untersucht, mit welcher Feinheit der Wirbelkern aufgelöst werden muss. Mit einer Auflösung von 0,2 mm im Kernbereich wurden nahezu gitterunabhängige CFD-Ergebnisse erzielt. Außerdem wurde das bei der TÜV NORD SysTec entwickelte, kombinierte Verfahren zur Berechnung der Luftkernlänge eines Oberflächenwirbels auf den Laborversuch übertragen und angewendet. Auch bzgl. der CFD-Simulationen steht die TÜV NORD SysTec mit der TUHH in engem Kontakt.

Um das kombinierte Verfahren, das ein analytisches Wirbelmodell mit CFD-Analysen kombiniert, weiterzuentwickeln, wurden drei alternative Wirbelmodelle, die Modelle von Sullivan, Lewellen und Granger, implementiert bzw. analysiert. Im Ergebnis kam heraus, dass alle drei Modelle von Annahmen ausgehen, die bei den im Rahmen von SAVE geplanten Versuchen nicht erfüllt sind. So basieren zwei Modelle auf der Annahme, dass die Tangentialgeschwindigkeiten die radialen Geschwindigkeiten deutlich dominieren, was bei den SAVE-Versuchen nicht der Fall ist. Insofern wurde beschlossen, ein eigenes, den Versuchen angepasstes Wirbelmodell zu entwickeln.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die TÜV NORD SysTec wird die Ausarbeitung und Auswertung der Experimente auch in Zukunft unterstützen. Als nächstes stehen in dieser Hinsicht die Auswertung der Vorversuche mit der Laboranlage und die Auswahl einer Einlaufgeometrie für die große Versuchsanlage an. Diesbezüglich wird es Anfang August eine Telefonkonferenz zwischen der TÜV NORD SysTec und der TUHH geben.

- AP7: Die CFD-Simulationen der kleinen Laboranlage werden fortgesetzt. Zurzeit werden die Versuche mit den unterschiedlichen Einlaufgeometrien simuliert. Außerdem sollen die bei den Versuchen gemessenen Luftkernlängen mit dem kombinierten Verfahren nachgerechnet werden. Ein besonderes Augenmerk wird auf der Fragestellung liegen, ob zweiphasige CFD-Simulationen notwendig sind oder einphasige Analysen für die geplanten Zwecke genügen. Die dafür erforderlichen zweiphasigen CFD-Analysen der Laboranlage sollen daher in nächster Zeit durchgeführt werden. Die bei den Simulationen im kleinen Maßstab gewonnenen Erkenntnisse, z. B. über Vernetzungsstrategien oder die erforderliche Gitterfeinheit, sollen dann im Anschluss auf die eigentliche Versuchsgeometrie im Originalmaßstab übertragen werden.

Des Weiteren wird bei der TÜV NORD SysTec derzeit eine Studie durchgeführt, bei der unterschiedliche Methoden untersucht werden, Wirbel in einer Strömung zu identifizieren. Der Hintergrund dafür ist, dass die Anwendung des kombinierten Verfahrens erfordert, die Kernregion der Oberflächenwirbel zu lokalisieren.

Darüber hinaus soll mit der Entwicklung eines eigenen Wirbelmodells begonnen werden, das für Strömungen mit starker Ansaugung geeignet ist und bessere Ergebnisse für die radiale und axiale Geschwindigkeitskomponente liefert als das Burgers-Rott-Modell, das bisher im kombinierten Verfahren zum Einsatz kommt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: KSB Aktiengesellschaft, Johann-Klein-Str. 9, 67227 Frankenthal (Pfalz)		Förderkennzeichen: 02 NUK 023D
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2012 bis 31.05.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 2.751.350,00 EUR	Projektleiter: 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 Einflusses 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 Versuchsträger in vier verschiedenen Größenordnungen (Nennweiten) von typischen Armaturen für nukleare Kraftwerke zur Untersuchung von unterschiedlichen Belastungsarten auf Schieber, Ventile und Rückschlagarmaturen entwickelt.

Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit von Armaturen werden folgende Belastungstests durchgeführt:

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

- Schmutzpartikeltest
- Seismische Belastung (statisch auf einem Rütteltest)

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitspaket 5: Experimentelle Untersuchungen an Armaturen

- Derzeit befinden sich alle sechs Armaturen, die für den Prüfstand vorgesehen sind, in der Fertigung. Für die erste Armatur sind bereits alle Komponenten gefertigt und geprüft, sodass mit der Montage begonnen werden kann.
- Die kleinste Armatur mit der Nennweite DN 25 hat die Zyklus- und Thermoshocktests erfolgreich bestanden. Beim durchgeführten Rohrbruchtest kam es zu plastischen Verformungen in der Führungshülse, wonach die Armatur nicht mehr zu demontieren war. Dieser Test muss nach einer konstruktiven Modifizierung wiederholt werden. Die geänderten Komponenten sind in Fertigung. Der Erdbebentest ist für Ende Juli/Anfang August eingeplant.
- Alle wesentlichen Schritte zur Vorbereitung der Testaufbauten sind veranlasst.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nachstehend sind die nächsten Schritte zusammengefasst:

- Definition und Umsetzung von Maßnahmen zur Beschleunigung der Herstellungsprozesse zur Reduzierung des zeitlichen Verzugs bei der Fertigstellung der Versuchsträger.
- Fertigstellung und Prüfung aller Armaturentypen
- Analyse der Möglichkeiten zur zeitlichen Beschleunigung der Versuche mit den Prüfstandbetreibern
- Installation der Versuchsträger auf dem Prüfständen und Beginn der Tests

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 027A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt A: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Nachwärmeabfuhr von Brennelementen in ausdampfenden Nasslagern		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2013 bis 30.09.2017		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 574.986,00 EUR		Projektleiter: Prof. Dr. Hurtado

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

(AP0) In der Literatur zum Thema „Spaltabstände in Kompaktlagern von Siedewasserbrennelementen“ sind keine konkreten Angaben verfügbar, da diese anlagenspezifisch sind und von den Betreibern nicht veröffentlicht wurden.

Die Literaturrecherche zur axialen Leistungsverteilung von Brennstäben ergab zwei charakteristische Verläufe. Insgesamt weist die Leistungsverteilung einen nahezu kosinusförmigen Verlauf

auf, mit einer Leistungserhöhung entweder im oberen oder im unteren Bereich. Diese Verläufe sind abhängig vom Abbrand und der Position des Brennstabes im Brennelement.

(AP1) Eine Abstimmung über die Auslegungsparameter der Versuchsanlage erfolgte gemeinsam mit allen Projektpartnern am 28.01.2014 bei TUD-WKET. Diskutiert wurden folgende Themen und entsprechende Festlegungen getroffen:

- Der Aufbau des Brennelementes (Stabbündels): Das Stabbündel wird symmetrisch aus 10x10 elektrisch beheizten Stäben (Heizpatronen) aufgebaut. Im Zentrum ist ein Wasserkanal angeordnet, der die zentralen 2 x 2 Heizpatronen ersetzt.
Die Spaltweite zwischen dem Stabbündel und den Rand- und Eckelementen wird auf 5 mm - 50 mm festgelegt.
- Die Spezifika der Heizpatronen: Die beheizte Länge der Stäbe beträgt 3600 mm. Dabei handelt es sich um eine leicht verkürzte Ausführung (standardmäßig ca. 3760 mm), da die Strömungsphänomene insbesondere im oberen Bereich (~ 1000 mm) für den weiteren axialen Oberflächentemperaturverlauf des Stabes entscheidend sind. Die Heizpatronen weisen eine axiale Leistungsverteilung mit einer Erhöhung im oberen Bereich auf. Um eine radiale Leistungsregulierung zu erzielen, werden die Heizpatronen in Leistungsgruppen mit Transformatoren zusammengeschlossen.
- Der Einfluss der Abstandhalter: Der Druckverlust, hervorgerufen durch die Abstandhalter, ist infolge minimaler Fluidgeschwindigkeiten ($< 0,15$ mm) vernachlässigbar (ADELA-II-Ergebnisse).
- Die Temperaturmessung: Es wird überwiegend die Staboberflächentemperatur gemessen, da eine Auswertung der ADELA-II-Ergebnisse, aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten, nur minimale Temperaturunterschiede zwischen angrenzenden Fluid- und Oberflächentemperaturmessstellen von < 2 K ergab.

Im Anschluss erfolgte die Erarbeitung der spezifischen Anforderungen und Randbedingungen für die Komponenten „Abstandhalter“ und „Heizelemente“. Es wurden konstruktive Vorschläge für die Gestaltung der Abstandhalter und der Leistungsprofilierung der Heizelemente erarbeitet und beim Treffen am 31.03.2014 den Projektpartnern vorgestellt.

Daraufhin erfolgte der Beginn der Konstruktionsplanung der Versuchsanlage. Zunächst wurde ein CAD-Modell erstellt, welches die Komponenten „Bündel“, „Randelemente“, „Eckelemente“ und „Kanal“ beinhaltet. Überlegungen, wie die Forderung nach variablen Spaltabständen und der Modularität der gesamten Anlage konstruktiv realisiert werden können, bildeten einen wichtigen Arbeitspunkt.

(AP2/AP3) Hier erfolgt keine Beteiligung von TUD-WKET.

(AP4) Die Bearbeitung wurde noch nicht begonnen (geplanter Zeitraum 11/2014- 07/2017).

4. Geplante Weiterarbeiten

- Bestimmung der Randbedingungen an der Bilanzgrenze Oberkante BE-LB (mit HSZG)
- Erstellung der Fertigungszeichnungen aus dem CAD-Modell, Überarbeitung nach Rücksprache mit der Fertigung
- Auftragsvergabe der Komponenten für die Versuchsanlage
- Beschaffung der Heizelemente sowie der Mess- und Steuerungstechnik
- Beginn der Errichtung der Versuchsanlage
- Folgetreffen aller Projektpartner bei HSZG im September 2014

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 027B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt B: Simulation von Strömung und Wärmetransport unter den Bedingungen eines Lagerbeckens		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2013 bis 30.09.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 348.852,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Fröhlich	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Arbeitspaket BED1 wurde im Austausch mit der HS Zittau-Görlitz fortgeführt. Bei einem separaten Termin am 04. Februar 2014 an der HS Zittau-Görlitz wurden mögliche Aufbauten, Modellgase und geplanter Experimente im Rahmen von SINABEL diskutiert.

Erste durchzuführende Referenzmessungen des EE mit unterschiedlichen Komponenten in der Messstrecke wurden vereinbart, um die Effekte einzelner Komponenten des EE separieren zu können und mit der numerischen Simulation zu vergleichen.

Die Mitwirkung an der Auslegung des IE (INT1) wurde fortgesetzt. Am 28. Januar 2014 wurden am WKET einzelne Aspekte des Aufbaus für SINABEL festgelegt. Im Zusammenhang mit dem neuen geplanten Aufbau entstand die Fragestellung des Einflusses generisch geformter Abstandhalter auf die Strömung und den Wärmeübergang im Vergleich zu kommerziell eingesetzten Bauformen.

Im Rahmen des Arbeitspaketes BED2 und INT2 wurden Studien zum Einfluss der Form der Abstandhalter (AH) im Bereich kleiner Reynolds-Zahlen beim Ausdampfen begonnen. Ziel ist es, die Umströmung und den Wärmeübergang der bisher eingesetzten Abstandhalter der ADELAII und der HS Zittau-Görlitz mit vereinfachten Bauformen zu vergleichen, welche im Rahmen von SINABEL eingesetzt werden. Von besonderem Interesse ist auch die Länge des Nachlaufes, einerseits wegen der Auswirkung auf den lokalen Wärmetransport, andererseits um für den Einsatz der Messtechnik durch TUD-ASP geeignete Positionen zu definieren.

In Vorbereitung auf die anstehenden numerischen Simulationen des EE (BED2) und des IE (INT2) werden in vereinfachten Konfigurationen die Wärmestrahlung zwischen den BS und BE untersucht. Kombiniert wird dies mit der axialen und radialen Wärmeleitung im BS/BE. Ziel ist die Quantifizierung der Anteile der einzelnen Transportmechanismen am Gesamtwärmetransport als Beitrag für die angestrebte Modulentwicklung (MOD1, MOD2).

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Modellentwicklung der AH wird zügig vorangetrieben (BED2) und mit ersten experimentellen Ergebnissen der HS Zittau-Görlitz validiert. Ergebnisse der Simulation dienen ebenfalls dem Teilprojekt des Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (07NUK027C) als Validierungsdaten für die Modellierung des BE als poröser Körper.

Das Paket INT1 wird in Zusammenarbeit mit den übrigen Teilprojekten weiterhin unterstützt. Mit der Fortführung der begonnenen Analyse von Einzeleffekten mittels vereinfachter Modelle wird weiter an einem aufwandsoptimalen Modell für die Simulation des Integralexperiments gearbeitet. Zusätzlich steht die Quantifizierung des Einflusses der eingebrachten Messtechnik auf Strömung und Wärmeübergang im Fokus, um die erzielten Messwerte zu bewerten und wenn nötig zu korrigieren.

Für das Projekt konnten mehrere studentische Hilfskräfte gewonnen werden. Sie leisten Beiträge zur Analyse der Wärmestrahlung in der untersuchten Konfiguration sowie zum Einfluss des BE-Kopfes auf die Strömung und Wärmeübergang im BE. Eine weitere Belegarbeit zur Untersuchung des Einflusses grundlegender physikalischer Mechanismen in der vorliegenden Konfiguration beginnt im Herbst 2014.

Parallel zu den Simulationen wird die Systematisierung der Ergebnisse aus Experiment und Berechnung durch geeignete Korrelationen auf Basis von Ähnlichkeitskennzahlen als Beitrag zur Modulentwicklung für die Integralcodes weiter verfolgt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.; Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 027C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Codes; Teilprojekt C: Analyse und CFD-Modellentwicklung der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2013 bis 30.09.2017		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 348.892,00 EUR		Projektleiter: Dr. Krepper

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

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

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

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

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

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau		Förderkennzeichen: 02 NUK 027D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegetriebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2013 bis 30.09.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 434.394,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Kästner	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in 4 Arbeitspunkte. Der Arbeitspunkt AP1 beinhaltet die Auslegung, Errichtung und Inbetriebnahme der Integralversuchsanlage sowie die Durchführung und Bewertung der Experimente.

Die Aufgaben der HSZG besitzen unterstützenden Charakter zur Errichtung der 1:1 Integralversuchsanlage an der TUD-WKET. Hierbei werden basierend auf den erworbenen Kenntnissen aus dem Arbeitspunkt AP0 die experimentellen Randbedingungen bestimmt und die Mitwirkung bei Aufstellung der Versuchsmatrix aus den kleinskaligen Experimenten an der HSZG gewährleistet.

Außerdem soll in dieser Phase die Unterstützung bei der Auswahl von spezieller Messtechnik aus den im AP0 gewonnenen Erkenntnissen gewährleistet werden. Zum Schluss sollen die Ergebnisse von Integralexperimenten zur Ableitung von Anforderungen an Einzeleffektexperimente zur Parameterbestimmung für die Modellierung von Einzelphänomenen analysiert werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Basierend auf den erworbenen Kenntnissen aus dem Arbeitspunkt AP0 und aus der Anforderungsliste, die im Rahmen der zyklischen Projekttreffen entstanden ist, wurde ein Versuchskonzept für das Teilprojekt D (AP2) erstellt, wobei verschiedene Varianten zum Versuchsaufbau ausgewählt wurden (Versuchstand DVABG, „Dichtegetriebene Vertikale Austausch-Bewegungen von Gasen“). Die Bestimmung der thermohydraulischen Auslegungsparameter für Modellgase erfolgte auf Basis von Ähnlichkeitsuntersuchungen zur Übertragbarkeit der Bedingungen bei Heißdampfentwicklung im DWR-BE-Dummy auf die Modellgase. Das Ähnlichkeitsprinzip soll auch bei der Modellierung der dichtegetriebenen Austauschbewegung von Gasen in der Stabgeometrie durch verschiedene Kriterien (Dichte, Viskosität) berücksichtigt werden. Insbesondere die Reynoldszahl stellt die Basis zur Auswahl des Modellgases zur Nachbildung der vertikalen Austauschbewegung dar. Im Rahmen des Versuchskonzeptes erfolgte die Planung der notwendigen Zusatzausrüstung am BE-Dummy. Im Versuchskonzept sind gut geeignete Messgeräte dargestellt. Die schwere Zugänglichkeit in den Zwischenräumen der Brennstäbe erschwert das Einsetzen der gewöhnlichen Messtechniken. Aus diesem Grund wird mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) die Entwicklung neuer Messverfahren angestrebt.

Im Berichtszeitraum wurden Vorversuche mit einem horizontalen Strömungskanal durchgeführt. Die Zielstellung der Vorversuche lag in der Bestimmung von Druckverlustbeiwerten (Zeta-Werte) über einzelne Abschnitte (Fuß, Abstandhalter, Kopf) des vorhandenen verkürzten DWR-BE-Dummy als auch über den gesamten BE-Dummy als Grundlage für die CFX-Modellierung der Projektpartner. Die Vorversuche wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten einer Luftdurchströmung (0 bis 6,71 m³/s) durchgeführt. Als Ergebnisse liegen Volumenstrom-Differenzdruckdiagramme für den gesamten DWR-BE-Dummy und für Einzelabschnitte vor.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Auswertung der durchgeführten Vorversuche wird abgeschlossen. Auf Basis des Versuchskonzeptes des Versuchstandes DVABG zu vertikalen Untersuchungen erfolgt die Erarbeitung von Fertigungszeichnungen, Materialbeschaffung, Fertigung, Umbauten und Installation von Versorgungs- und Messtechnik für den vorhandenen 16x16 DWR-BE-Dummy. Die ausgewählten Messinstrumente werden erprobt, wobei die erworbenen Kenntnisse aus dem Vorversuch berücksichtigt werden, um die experimentellen Randbedingungen der Versuchsdurchführung zielführend zu definieren.

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

In diesem Jahr fanden im Rahmen des Projektes drei Arbeitstreffen statt:

Arbeitstreffen am 28.01.2014 an der TU-Dresden, zur Bestimmung der Randbedingungen für den Versuchstand ALADIN

Arbeitstreffen am 04.02.2014 an der Hochschule Zittau/Görlitz, zur Besichtigung der DWR-BE-Dummy

Arbeitstreffen am 31.03.2014 im Helmholtzzentrum Dresden-Rossendorf, zur Präsentation des Arbeitsstandes der Projektpartner.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 027E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt E: Ortsaufgelöste Temperatur- und Gasphasengeschwindigkeitsmessung zur Analyse der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2013 bis 30.09.2017		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 316.464,00 EUR		Projektleiter: Prof. Dr. Hampel

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Im Verbundprojekt besteht Zusammenarbeit mit folgenden Einrichtungen:

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Analyse ADELA-Experimente für spezielle Messtechnik, Literaturstudium

AP2: Selektion / Erprobung von Messverfahren

AP3: Entwicklung und Aufbau der Instrumentierung

AP4: Erprobung und Kalibrierung spezieller Instrumentierung an eigenem Strömungsversuchsstand

AP5: Unsicherheitsanalysen

AP6: Einsatz der Strömungsmessverfahren am Integralexperiment, Datenanalysen

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Aus internen Treffen mit den Projektpartnern ist hervorgegangen, dass die Schlüsselanforderungen an die Instrumentierung in der Integration in den Integralversuchsstand sowie dem Einhalten der Einsatzgrenzen besteht. Bedingt durch die Anforderung, den Einbau flanschlos zu gestalten, ist ein Zugang zu den Unterkanälen der Brennelement-Nachbildung nur von der Oberseite möglich.
Die minimale erwartete und damit zu messende Gasgeschwindigkeit ist $v_{min} = 0,01 \text{ m/s}$, welche eine Größenordnung unter der Auflösungsgrenze kommerzieller, auf dem Prinzip der thermischen Anemometrie basierenden Sonden liegt. Ursache und Ansatz zur Umgehung dieses Problems ist die Sensorüberhitzung ($\Delta\theta = 150 - 200\text{K}$ für Gase) und der daraus resultierende Einfluss der natürlichen Konvektion.
- AP2: Ein Alternativkonzept beruht auf der Bestimmung der relativen Sinkgeschwindigkeit von Partikeln. Dazu wird die Zeitdauer sinkender Partikel beim Durchlaufen eines Laserschnitts ermittelt und auf die Gasgeschwindigkeit zurückgerechnet. Die Dimension der Partikel ist so zu wählen, dass sie für den erforderlichen Geschwindigkeitsbereich nicht aus dem Brennelement ausgetragen werden.
- AP3: Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden PT100-Sensoren in verschiedenen Geometrien und Ausführungen verwendet (Dünnschicht-Sensoren und zylindrische Glas- sowie Keramik-Sensoren). Im Fokus standen dabei die Kennlinienbestimmung für niedrigere Sensorüberhitzungen und die Beständigkeit in überhitzter Wasserdampf-atmosphäre.
Beim Gittersensor-Multiplexing-Prinzip liegt an allen Parallel-Pfaden (Empfängerelektroden) das gleiche elektrische Potential an. Da beim CTA-Modus allerdings der Spannungsabfall über jeden Sensor, d. h. jeden Parallelpfad, individuell eingestellt und bestimmt wird, wurde ein Konzept zur Steuerung entwickelt. Eine Schaltung für ein Einkanal-Experiment befindet sich zum Zeitpunkt der Berichterstattung im Aufbau. Ein weiteres Elektronik-Konzept basiert auf der Bestimmung von Zeitkonstanten beim Aufheizen bzw. Abkühlen des Sensors (Heiz- und Messspannung). Die Zeitkonstanten sind dabei von der Gasgeschwindigkeit abhängig.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Experimentelle Konzeptstudie zum Alternativ-Konzept.
- AP3: Im nächsten Schritt werden die elektronischen Schaltungsvarianten an Einkanal-Experimenten validiert und auf deren Grundlage die Entwicklung für mehrkanalige Messungen ausgeweitet.
Aus den gegebenen konstruktiven Einschränkungen seitens des Integralversuchsstandes wird ein Sensorträger für den Gittersensor konzipiert.
Von ausgewählten Sensoren werden Kennlinien erstellt und deren Beständigkeit in überhitzter Wasserdampf-atmosphäre untersucht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		Förderkennzeichen: 02 NUK 028A
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.034.532,00 EUR		Projektleiter: 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

Im Rahmen des Verbundprojektes sind in den AP1, AP2, AP3, AP5 und AP6 Arbeiten im 1. Halbjahr 2014 durchgeführt worden. Im Berichtszeitraum haben zum AP1 die folgenden Arbeiten stattgefunden:

- Projekttreffen in Karlsruhe am 31.3.-1.4.2013
- Veröffentlichung auf der Jahrestagung Kerntechnik 2014

Der Unterauftragnehmer GRS hat im AP2, AP4, AP6 folgende Arbeiten durchgeführt:

UA-AP1: Entwicklung SWR-Modell für das untere Plenum

Die aktuell freigegebene Version von ATHLET-CD beinhaltet bereits die kontinuierliche Verlagerung der Schmelze ins untere Plenum, eindimensionale Nodalisierung (axiale Richtung) sowie die Modellierung der Steuerstabführungsrohre mit Thermofluid- und Wärmeleitobjekten. Bei der Modellierung des unteren Plenums von SWR wurde das Re-

chengebiet für das untere Plenum in zylindrischen Koordinaten aus dem Verlagerungsmodell übernommen und eine allgemeine Schnittstelle für das neue Modul LHEAD eingebaut, so dass die Konsistenz mit FEBE-Teilschritten sichergestellt ist. Der Wärmeübergang Schmelze-Fluid basiert auf Korrelationen aus AIDA. Fluiddynamische Gleichungen in den Kontrollvolumina/Leitungen für die Zonen, die mit Schmelze gefüllt sind, werden abgeschaltet. Darüber hinaus wurde eine Schnittstelle zu Wärmeleitobjekten implementiert. Aktuell wird ein 2D-Gleichungssystem für das Schmelze/Kruste-Gebiet eingebaut.

UA-AP2.1: Datensatzbereitstellung

Ausgehend von den bereits durchgeführten Arbeiten zur Erstellung des generischen ATHLET KONVOI-Datensatzes und dabei auftretenden numerischen Instabilitäten wurde auf einem Arbeitstreffen mit GRS, HZDR und IKE festgelegt, dass als Ausgangsbasis nicht das bisherige Sample, sondern das aktuelle ATHLET DWR-Sample zu verwenden, das bereits eine Vielzahl der thermohydraulischen Systeme beinhaltet. Der Basisdatensatz inkl. der Modelle für den Kern wurde seitens der GRS erstellt und HZDR sowie IKE zur weiteren Bearbeitung übergeben, die Implementierung einiger thermohydraulischer Detailmodelle dauert noch an und wird zeitnah abgeschlossen. Der generische COCOSYS KONVOI-Datensatz für die Containmentanalysen wurde fertiggestellt, getestet und RWTH-LRST übergeben. Die primärseitige Einspeisung ins Containment während eines 50 cm²-Lecks im Cold-/Hot-Leg wurde in einer gekoppelten ATHLET-CD/COCOSYS Simulation berechnet, analysiert und an RWTH-LRST in Tabellenform übergeben. Bis zur vollständigen Übergabe der Einspeisedaten mussten zunächst einige wegen der sehr hohen Temperaturen an der Leckstelle zu klärenden grundsätzlichen Fragen identifiziert und behoben werden. Aufgrund dessen dauerten die Analysen und Interpretationen der Ergebnisse, die umfangreich und zeitintensiv waren, an und führten somit zu einer Verzögerung der Übergabe zum ursprünglich geplanten Abgabezeitpunkt.

UA-AP2.2: Programmunterstützung

Im Rahmen der Programmunterstützung der Anwender wurden im März 2013 ein ATHLET-CD Anwenderseminar durchgeführt, an dem 6 externe Teilnehmer aus WASA-BOSS sowie 5 Experten der GRS teilgenommen haben. In dem Anwenderseminar wurde die Modellierung in einzelnen Modulen von ATHLET-CD dargestellt. Des Weiteren haben die Anwender die Ergebnisse ihrer Arbeiten vorgestellt, Fragen/Probleme dargestellt und mit den anwesenden Experten diskutiert.

Darüber hinaus wurden die Anwender bei der Erstellung ihrer spezifischen Datensätze und insbesondere bei der Implementierung des Moduls AIDA sowie bei programmspezifischen Fragestellungen unterstützt.

Seitens des LRST durchgeführten Arbeiten:

AP3: Für die Weiterentwicklung des schon existierenden Gebäudekondensators ist die Einarbeitung in potentielle Kopplungsstrategien von CoPool an COCOSYS durchgeführt worden. Die grundsätzliche Kopplungsstrategie ist dabei festgelegt worden: COCOSYS wird als ‚Master‘, CoPool als ‚Slave‘ fungieren. Kopplungen können explizit oder implizit realisiert werden, welche Variante mehr Vorteile für die COCOSYS-CoPool-Kopplung hat, wird derzeit noch analysiert. Des Weiteren wurde mit den Arbeiten am Quellcode des COMO-Modells begonnen.

AP4: Die UaSA für den 20 Zonendatensatz wurde durch Berücksichtigung der chemischen Iod-Reaktionen und die Differenzierung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingabeparameter von der Dreiecksverteilung zu Verteilungen, die durch Experten auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes bestimmt wurden, durchgeführt und mit den Analysen begonnen.

AP6: Auswahl AM-Maßnahmen

Für den Meilensteinbericht M41, der von IKE verfasst wurde, wurde vom LRST ein Textbeitrag geleistet und ein Review (jeweils von GRS und LRST) durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Die Fertigstellung der Entwicklung eines SWR-Modells für das untere Plenum ist vom Unterauftragnehmer GRS für den nächsten Berichtszeitraum geplant.

AP3: Planungsgemäß werden im kommenden Berichtszeitraum die Arbeiten am Quellcode des COMO-Modells fortgesetzt und die Korrekturen der gefundenen numerischen Schwachstellen im Code weitergeführt. Daran anschließend erfolgen die Vorbereitung und der Beginn der Arbeiten am Quellcode. Zudem wird die Detailabstimmung der Kopplungsstrategie mit dem COCOSYS-Entwickler GRS abgestimmt.

AP4: Für den folgenden Berichtszeitraum ist geplant, den Einfluss der gewählten unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der unsicheren Eingabeparameter auf die Ergebnisse der bereits durchgeführten 20 Zonendatensatz UaSA auszuwerten, d. h. der Einfluss der Dreiecksverteilung auf das Ergebnis wird mit den ‚state-of-the-Art‘ Verteilung verglichen. Im nächsten Schritt soll für den im Juni 2014 von der GRS übergebene 80 Zonendatensatz eine vollständige UaSA durchgeführt werden und mit der UaSA des 20 Zonendatensatzes verglichen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Am 06. - 08. Mai 2014 wurde das Verbundprojekt auf der Jahrestagung Kerntechnik 2014 in Frankfurt vorgestellt und ein Konferenzpaper unter dem Titel „Advancement and Application of Severe Accident Codes – Evaluation and Optimization of Accident Management Measures–“, veröffentlicht.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 028B
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 203.674,00 EUR		Projektleiter: 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

Im Berichtszeitraum hat sich HZDR an der Erstellung des Berichts M41 beteiligt. Hierzu wurde eine Übersicht zum Unfallablauf beim Station Blackout (SBO) für DWR und SWR Anlagen erstellt, es wurden präventive und mitigative Notfallmaßnahmen für die geplanten Simulationsrechnungen zusammengestellt und es wurden ATHLET Simulationen zum Basiszenarium eines 50 cm² Lecks durchgeführt. Der Ereignisablauf und die wesentlichen Phänomene wurden analysiert und im Detail beschrieben.

Der Entwicklungsstand des ATHLET-CD Modells für einen generischen KONVOI Reaktor wurde auf einem Statusmeeting am 13.02.2014 in Garching diskutiert. Hierbei wurde die Liste der notwendigen Updates noch mal konkretisiert. Basierend auf einem ATHLET Beispieldatensatz der GRS hat HZDR Testrechnungen für ein kleines Leck (SBLOCA) durchgeführt. Hierfür wurden Modellverbesserungen und -erweiterungen implementiert (u. a. für die Notkühlsysteme und das sekundärseitige Abfahren beim kleinen Leck sowie mit einem GCSM-Block für die Ergebnisauswertung). Der verbesserte Datensatz wurde der GRS für die Weiterentwicklung entsprechend der Festlegungen auf dem Treffen am 13.02.2014 zur Verfügung gestellt. Mit dem erweiterten ATHLET Modell wurde eine Parameterstudie bezüglich Lecklage, Verfügbarkeit von Störfallmaßnahmen und ausgewählter Modelloptionen für ein 50 cm² Leck durchgeführt. Auf dem ATHLET-CD Nutzertreffen am 5./6.03.2014 in Garching und auf dem Projektmeeting am 31.03./01.04.2014 in Karlsruhe wurden die Ergebnisse der SBLOCA Simulationen vorgestellt. Die Ergebnisse der Parameterstudie wurden in einem projektinternen Arbeitsbericht dokumentiert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Mit einem vorläufigen ATHLET-CD Datensatz, welcher die von der GRS im Berichtszeitraum bereitgestellten Updates bezüglich der Kernzerstörungsmodule enthält, wurden erste Testrechnungen zum kalt- und heißseitigen 50 cm² Leck mit und ohne sekundärseitiges Abfahren durchgeführt. Mit der Auswertung der Ergebnisse und einem Vergleich zu den ATHLET Simulationen wurde begonnen.

Des Weiteren wurde im HZDR in Abstimmung mit den Projektpartnern eine SharePoint-Website für das Verbundprojekt eingerichtet.

4. Geplante Weiterarbeiten

In den nächsten 6 Monaten sind folgende Arbeiten geplant:

- Nach Übernahme des von der GRS erweiterten KONVOI Datensatzes werden die Modellexerweiterungen im Detail geprüft und es werden Testrechnungen durchgeführt.
- Auf Basis der ATHLET Parameterstudie wird anhand ausgewählter Szenarien ein Vergleich mit ATHLET-CD Simulationen für das 50 cm² Leck durchgeführt.
- Es werden Störfallablaufanalysen für SBLOCA und SBO Szenarien durchgeführt. Hierbei werden erste Simulationen mit Implementierung von Notfallmaßnahmen durchgeführt.
- Es wird der Bericht zum Meilenstein M32 erarbeitet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

G. Pohlner, A. Trometer, M. Buck, F. Schäfer, P. Tusheva, T. Hollands, V. Di Marcello, U. Imke, V. Sanchez, X. Cheng, F. Kretschmar, P. Dietrich, R. Gehr, 2014: Störfallmaßnahmen zur Milderung der Folgen von Reaktorunfällen mit schweren Kernschäden. Mai 2014 (Bericht zum Meilenstein M41)

F. Schäfer, P. Tusheva, Y. Kozmenkov, S. Kliem, 2014: Technical Note. LOCA50 – Sensitivity simulations with ATHLET Mod 3.0 Cycle A. 03.04.2014 (projektinterner Bericht).

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart		Förderkennzeichen: 02 NUK 028C
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 300.276,00 EUR	Projektleiter: 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 Siedewasserreaktorcomponenten sowie der Gebäudekühlung weitergehend zu erüchtigen, um somit die Leistungsfähigkeit von Schwerststörfallcodes weiter zu erhöhen und zum anderen, Notfallmaßnahmen anhand von Reaktorrechnungen zu bewerten und zu optimieren. Ziel des Teilvorhabens ist es, Störfallmaßnahmen zu untersuchen, die dazu beitragen können, das Fortschreiten schwerer Unfälle mit Kernschmelzen aufzuhalten oder zumindest deren Folgen abzumildern. Hierzu werden systematische Untersuchungen zum Unfallablauf mit dem Störfallcode ATHLET-CD sowie mit spezialisierten 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: Die Weiterentwicklung des von der GRS zu liefernden ATHLET-CD Referenzeingabedatensatz für DWR wurde gemeinsam von HZDR, IKE und GRS organisiert. Hierzu fand ein Treffen am 13. Februar bei der GRS in Garching statt. Mehrere von der GRS gelieferte Versionen des Datensatzes wurden überprüft und für die vom IKE vorgesehenen Analysen angepasst. Der bisherige IKE-Datensatz wurde weiter gepflegt, da dieser bis zur endgültigen Verfügbarkeit des Referenzdatensatzes weiter genutzt wird.
- AP1.2: Der von der GRS für eine generische Anlage des Typs SWR-72 verfügbar gemachte ATHLET-Eingabedatensatz wurde um die Kernzerstörungsmodellierung (CD-Teil) erweitert und ist damit für die im Projekt vorgesehenen Störfallszenarien einsetzbar.
- AP1.4: Mit dem DWR-Eingabedatensatz für ATHLET-CD (siehe AP1.1) wurden Rechnungen zu 3 verschiedenen Störfallszenarien durchgeführt: 200 cm² Leck im heißem Strang und Ausfall der aktiven Notkühlssysteme, Station Blackout und Abriss einer Hauptkühlmittelleitung (großes Leck) mit Ausfall der aktiven Notkühlssysteme. Dabei wurde auch das AIDA-Modul (unteres Plenum) eingesetzt und die Rechnungen bis zum Behälterversagen fortgesetzt. Mit dem SWR-Eingabedatensatz wurden Rechnungen zum Szenario Station Blackout (Ausfall aller aktiven Systeme außer Druckentlastung) durchgeführt. Diese Simulationen konnten aufgrund numerischer Probleme noch nicht bis zum Behälterversagen fortgesetzt werden.
- AP3.1: Für DWR-Konvoi wurde als mögliche AM-Maßnahmen Wassereinspeisung über verschiedene Systeme (Hochdruck, Niederdruck, Volumenregelsystem, mobile Pumpe) berücksichtigt. Für SWR-72 wurde als AM-Maßnahmen Wassereinspeisung über Hochdruck- und Niederdrucksysteme realisiert.
- AP3.2: Für die Szenarien „mittleres Leck“ und „großes Leck“ in DWR-Konvoi wurden Simulationen zur Bestimmung der Wirksamkeit später Wassereinspeisung bei unterschiedlichem Kernschadenzustand durchgeführt. Hierbei wurden Einspeiserate, -ort und Zeitpunkt variiert. Am wirkungsvollsten erwies sich Einspeisung mit hoher Rate (Niederdrucksystem) über den kalten Strang. Bei weit fortgeschrittener Kernzerstörung (> 40 t geschmolzene Masse) konnte aufgrund von Blockaden keine komplette Kühlbarkeit des Kerns hergestellt werden.
- AP4: Mit den Rechenprogrammen JEMI und MEWA des IKE wurden erste Rechnungen zur Schüttbettbildung und -kühlung im Steuerstabsantriebsraum von SWR durchgeführt.
- AP6.1: Der Meilensteinbericht „Störfallmaßnahmen zur Milderung der Folgen schwerer Reaktorunfälle mit Kernschmelzen“ wurde erstellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.4: Rechnungen zu den Störfallszenarien mittleres und großes Leck sowie Station Blackout für DWR und Station Blackout für SWR-72 ohne Berücksichtigung von AM-Maßnahmen.
- AP3.2: Durchführung weiterer Simulationsrechnungen für DWR und SWR zur Bestimmung der Wirksamkeit von Notfallmaßnahmen mit später Wassereinspeisung in den RDB.
- AP3.3: Rechnungen zu Schmelze-Verhalten und -Rückhaltung im unteren Plenum.
- AP4: Untersuchungen zur Schüttbettbildung und -kühlung im Steuerstabsantriebsraum von SWR.
- AP6.2: Beitrag zum Bericht (Zwischenergebnisse zu Störfalluntersuchungen) zu Meilenstein M42.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- G. Pohlner et al.: Störfallmaßnahmen zur Milderung der Folgen von Reaktorunfällen mit schweren Kernschäden. Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart, Bericht IKE 2-163, Mai 2014.
- A. Trometer: Investigation on Cooling Possibilities of a Degraded Core in a Loss-of-Coolant-Accident-Scenario for a German PWR with ATHLET-CD. 46th Annual Meeting on Nuclear Technology, 5 - 7 May 2015, Berlin, Germany.
- S.Beck, A. Trometer, H.-J. Allelein, M. Buck: Advancement and Application of Severe Accident Codes – Evaluation and Optimization of Accident Management Measures. 46th Annual Meeting on Nuclear Technology, 5 - 7 May 2015, Berlin, Germany.

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		Förderkennzeichen: 02 NUK 028D
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 236.964,00 EUR	Projektleiter: 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 Wärmeübertragungsprozesse außerhalb des Containments beschreiben. Insbesondere werden die Wärmeübertragungsvorgänge von Naturkonvektion von Luft, Wärmestrahlung und Verdampfung des Wasserfilms berücksichtigt.
- Erweiterung des COCOSYS-Programms durch Implementierung neu entwickelter Modelle.
- Validierung und Anwendung des erweiterten COCOSYS Programms anhand der in AP2 bereitgestellten Daten sowie vorhandener experimenteller Daten aus der Literatur und den internationalen Projektpartnern.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum sind folgende Arbeiten durchgeführt:

- Der Einfluss der Schubspannung auf der Oberfläche des Wasserfilms wurde in das neue Modell eingebaut. Dadurch kann die Gegenströmung von Luft im Modell berücksichtigt werden.
- Das verbesserte Modell wurde anhand der Versuchsdaten aus SJTU und aus Literaturen teilweise validiert.
- Das generische Containment wurde erweitert, indem das PCCS System eingebaut wurde.
- Ausarbeitung einer Eingabedatei des COCOSYS Programms für das erweiterte generische Containment.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Verbesserung des Wasserfilmmodells unter Berücksichtigung des Hystere-Verhaltens.
- Validierung des Modells anhand weiterer Versuchsdaten.
- Vorläufige Analyse des modifizierten generischen Containments mit dem COCOSYS Programm mit dem verbesserten Wasserfilmmodell.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Huang X, Cheng X.: Modification and Application of Water Film Model for a German Containment Code System (COCOSYS), 45th Annual Meeting on Nuclear technology, 6-8 May, 2014, Frankfurt

Huang X, Cheng X.: Simulation of PWR's Passive Containment Cooling with an Advanced Water Film Model, 2014. International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2014), April 6-9, 2014, Charlotte, North Carolina

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 028E
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 368.530,00 EUR	Projektleiter: Dr. Miassoedov	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

Simulation des Unfalls in Fukushima mit MELCOR:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Die im Bericht für den Zeitraum 01.07.2013-31.12.2013 im Punkt „geplante Weiterarbeiten“ aufgeführten Punkte wurden planmäßig weitergeführt. Es wurden mit MELCOR sowohl LIVE-Experimente mit Wasser als auch mit Salz als Simulationsmedium für verschiedene Nodalisierungen des unteren Plenums nachgerechnet. Dabei gezeigt werden, dass sich die Temperaturen der Nachrechnungen der Salzversuche mit feiner werdender Nodalisierung den experimentell ermittelten Temperaturen näherten. Allerdings konnten erwartungsgemäß die Wärmeströme aus der Schmelze in die verschiedenen Richtungen bzw. Strukturen nicht richtig bestimmt werden, da MELCOR kein Wärmetransport-Modell für fließende Medien hat.

Weiterhin wurde in Zusammenarbeit mit KTH Stockholm mit der Implementierung des dort entwickelten PECM (Phase-Change Effective Convectivity Model) begonnen. Hierzu wurde das Modell zunächst in die Software openFOAM implementiert, um im nächsten Schritt über die am KIT entwickelte Kopplungsschnittstelle „DINAMO“ an MELCOR gekoppelt zu werden.

AP2: Die Arbeiten des KIT-IKET für dieses Arbeitspaket begannen im März 2014. Es wurde auf der Grundlage eines verfügbaren Peach-Bottom Datensatzes für MELCOR 1.8.1 begonnen, einen Input für MELCOR 1.8.6 zu erstellen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Im nächsten Schritt soll die Kopplung des PECM an MELCOR realisiert werden.

AP2: Die Input-Erstellung für MELCOR 1.8.6 auf der Grundlage des Peach-Bottom-Datensatzes für MELCOR 1.8.1 wird fortgesetzt. Danach werden die Daten für das KKW Fukushima spezifiziert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 028F
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 395.320,00 EUR	Projektleiter: Dr. Sanchez Espinoza	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Qualifizierung von ATHLET-CD für Siedewasserreaktoren

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

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

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

AP2: Möglichkeiten der Kühlung eines geschädigten Kerns durch Einspeisung in den Reaktordruckbehälter

Ausgehend von einem ATHLET-Modell eines Siedewasserreaktors werden Modellanpassungen zur Nachbildung des Kerns mit ATHLET-CD-Komponenten anstatt von ATHLET-Komponenten vorgenommen. Der Inputdatensatz ist für die Analyse des Kernverhaltens, wenn ein freigelegter und aufgeheizter Kern mit kaltem Wasser wieder geflutet wird (Phänomene wie beim Kühlmittelverluststörfall) so zu erweitern, dass die Reaktorschutzaktionen zur Aktivierung der Sicherheitssysteme und die Si-

cherheitssysteme selbst im Datensatz berücksichtigt werden (AP2.1). Störfallsequenzen, die zu Kernschadenszuständen führen, wenn keine Wiederinbetriebnahme oder Reparatur eines Sicherheitssystems bzw. keine Störfallmanagement-Maßnahmen eingeleitet werden, sind mit ATHLET-CD zu simulieren. Dabei ist die Aufmerksamkeit auf die Untersuchung der Kühlbarkeit des teilgeschädigten Kerns durch die Kaltwasser-Einspeisung in den RDB zu richten und deren Konsequenzen für die Integrität des Reaktordruckbehälters und des Sicherheitsbehälter systematisch und umfassend zu diskutieren (AP2.2).

AP3: Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Die Simulationen für die Experimente CORA-16 und CORA-17 mit ATHLET-CD wurden abgeschlossen und der entsprechende Bericht vorgelegt.
- ATHLET-CD zeigt im Allgemeinen eine gute Beschreibung beider Experimente bezüglich des Temperaturverhaltens und der Materialverlagerung auf.
- Die größte Abweichung besteht bei der Wasserstoffproduktion, die während der Flutphase in CORA-17 und während der Abkühlphase in CORA-16 unterschätzt wird.
- Eine der Ursachen dafür ist die fehlende geeignete Modellierung der Oxidation des Absorbiermaterials B4C. Durch zusätzliche numerische Analysen wurde dieser Effekt bestätigt und quantifiziert.
- Ein ATHLET Eingabedatensatz für einen typischen deutschen Siedewasserreaktor wurde zur Verwendung mit ATHLET-CD modifiziert und ergänzt: Kernmodellierung für Brennstäbe, Regelstäbe und Brennelementkästen, Hüllrohroxidation und Wasserstofftransport.
- Mit dem neuen Datensatz wurde der stationäre Zustand der Anlage berechnet und ein Auslegungstörfall mit einem mittleren Leck in der Speisewasserleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters simuliert.
- Auf der Grundlage einer vorliegenden probabilistischen Sicherheitsanalyse wurde eine Ereigniskette zur Simulation eines auslegungsüberschreitenden Unfalls mit einem kleinen Leck in der Frischdampfleitung in den Datensatz integriert. Dabei wird angenommen, dass die vorhandenen Sicherheitssysteme versagen. Damit kommt es zur Kernfreilegung und verschiedene Flutszenarien können getestet werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Untersuchung verschiedener Maßnahmen zur Flutung des aufgeheizten, trockenen und teilzerstörten Reaktorkerns.
- Erarbeitung einer Optimierungsstrategie für die zum Einsatz kommenden Maßnahmen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

Zuwendungsempfänger: Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum		Förderkennzeichen: 02 NUK 028G
Vorhabensbezeichnung: 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)		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2013 bis 29.02.2016		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 321.384,00 EUR		Projektleiter: Prof. Dr. Koch

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die Arbeiten zur Harmonisierung und Aufbereitung der Datenlage zum Unfall in Fukushima-Daiichi wurden dokumentiert. Ein Technischer Fachbericht wurde zum Meilenstein M31 erstellt und zur Kommentierung an die Teilnehmer des Verbundvorhabens verteilt. Anmerkungen zum Berichtsentwurf wurden vom Projektpartner IKE gegeben.
- AP2: Ein ATHLET-CD-Datensatz einer SWR-69-Anlagenmodellierung wurde für Plausibilitätsrechnungen zum Unfallablauf in Block 3 vorbereitet. Dazu wurden die verfügbaren Daten hinsichtlich der Aktivierung der Sicherheitssysteme sowie deren Einspeiseraten im Datensatz hinterlegt. Mit Blick auf die Anlagengeometrie wurde der Datensatz noch nicht angepasst. Das Anlagenverhalten in Block 3 wurde während der ersten Phasen des Unfalls bis hin zur Kernaufheizung und -zerstörung (bis ca. 50 h nach dem Erdbeben) simuliert. Die Simulationsergebnisse wurden mit den verfügbaren Messdaten verglichen und zeigen eine plausible Abbildung des thermohydraulischen Anlagenverhaltens. Weiterhin erscheinen diese ersten Plausibilitätsrechnungen auch gegenüber den in der Literatur veröffentlichten Rechnungen mit MELCOR sowie MAAP mit Blick auf den Umfang der Kernzerstörung sowie der Wasserstoffherzeugung physikalisch sinnvoll.
- AP4: Anhand von Analysen der Verlagerungsmodellierung sowie nach Diskussionen mit den Codeentwicklern wird eine Implementierung der Impulsbilanz in das Candling-Modell mit Blick auf die Erweiterung der Modellbasis für diese Art von LP-Code im Kernbereich als von untergeordneter Bedeutung erachtet. Dagegen fehlen derzeit Modelle zur Beschreibung der Schmelzeverlagerung ins untere Plenum, die besonders für Anlagenrechnungen von entscheidender Bedeutung sind. Daher wurde ein Ansatz zur Abbildung des Einflusses der Kerntrageplatte auf die Verlagerung erarbeitet. Dabei soll der Wärmeaustausch mit der Kerntrageplatte unter Berücksichtigung des Erstarrungsverhaltens der Schmelze modelliert werden. Dieser Modellansatz soll dabei eine mögliche Rückhaltung und Ansammlung der Schmelze auf der Kerntrageplatte simulieren, falls sich lokale Blockaden bilden. Dieses Verhalten kann durch eine Reduzierung der freien Querschnittsfläche abgebildet und der effektive Schmelzemassenstrom in das untere Plenum bestimmt werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Parallel zu den Arbeiten in TPG-AP2 werden nach Bedarf gezielt weitere, für die Simulation relevante Daten hinsichtlich des Anlagedesigns recherchiert.
- AP2: Der Einfluss der Anlagenmodellierung, der Einspeiseraten sowie ausgewählter Modellparameter auf das simulierte Anlagenverhalten wird anhand von Sensitivitätsanalysen geprüft. Erste Anpassungen des Datensatzes auf die BWR4-Auslegung werden erarbeitet.
- AP4: Das Modell zur Abbildung der Kerntrageplatte soll in FORTRAN programmiert werden, um es anschließend in ATHLET-CD zu implementieren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

2.2 Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 013A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2009 bis 31.12.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 736.590,00 EUR	Projektleiter: 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}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}U und ^{235}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 Gammastärkefunktion 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}U Spaltkammern, Qualitätskontrolle dünner U-Schichten durch α -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}U Spaltkammer; Vergleichsmessungen der Nachweiswahrscheinlichkeit mit der $^{235}, ^{238}\text{U}$ Spaltkammern bei PTB und nELBE, Aufbau der ^{242}Pu Spaltkammer und Messung der neutroneninduzierten Spaltung, Systematik der γ -Stärkefunktion und Implementation in Teilchentransportsimulationen und Kernreaktions-Codes.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden die ^{242}Pu Schichten am Institut für Kernchemie der Univ. Mainz hergestellt und in die Spaltkammer eingebaut. Vom 19.05.-28.05. wurden die Spaltkammern ($^{235}\text{U} + ^{242}\text{Pu}$) an der PTB Braunschweig mit 15 MeV Neutronen kalibriert. Insbesondere für die ^{235}U Kammer soll daraus die Flächendichte der Uranatome bestimmt werden. Vom 16.06.-22.06. wurde dann mit beiden Spaltkammern die erste Flugzeitmessung an der neuen nELBE Photoneutronenquelle durchgeführt. Die ^{242}Pu Spaltkammer zeigt hervorragende Energiespektren der Spaltfragmente, was auf eine sehr gute Qualität der ^{242}Pu Schichten schließen lässt. Insgesamt sind 42.7 mg Pu bei einer typischen Flächendichte von $125 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ enthalten. Die Zeitauflösung der Spaltkammer wurde an nELBE zu 1.7 ns FWHM bestimmt. Zurzeit werden diese Experimente von Toni Kögler ausgewertet.

Vom 24.03.-31.03. wurde der totale Neutronenquerschnitt von ^{238}U an nELBE gemessen. Diese Daten, ebenso wie die im Oktober des Vorjahres gemessene Neutronentransmission von ^{197}Au , $^{\text{nat}}\text{W}$ und $^{\text{nat}}\text{Fe}$ befinden sich in der Auswertung. Der Versuchsaufbau wurde mit einem neuen TDC optimiert, so dass mit Totzeitkorrekturen kleiner als 5 % gemessen werden konnte.

Vom 31.03.-07.04. wurde die Winkelverteilung der Gammastrahlen aus der inelastischen Streuung an Zirkon gemessen. Dazu wurden auf einem Winkeltisch 4 HPGe Detektoren und 5 LaBr_3 Szintillatoren eingesetzt.

Die Veröffentlichung über inelastische Neutronenstreuung an ^{56}Fe ist bei Nuclear Physics A erschienen. Roland Beyer hat seine Dissertation eingereicht.

Ralf Massarczyk hat seine Ergebnisse über die Dipolstärkeverteilung in Kernen in Phys. Rev. Letters publiziert und seine Dissertation eingereicht.

Das TRAKULA Projekt wurde beim 45. Arbeitstreffen Kernphysik in Schleching im Thema „Nuclear Physics and Nuclear Energy“ durch Arnd Junghans, Ralf Nolte, Peter Reiter und Ronald Schwengner vorgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Fertigstellung der Analyse der Experimentdaten, insbesondere der Spaltkammerexperimente mit ^{235}U und ^{242}Pu .

5. Berichte, Veröffentlichungen

Beyer, R. et al.: Inelastic scattering of fast neutrons from excited states in ^{56}Fe , Nuclear Physics A 927 (2014) 41–52

Massarczyk, R. et al.: Nuclear Deformation and Neutron Excess as Competing Effects for Dipole Strength in the Pygmy Region, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 072501

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 019A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.01.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 572.947,00 EUR	Projektleiter: Dr. Schäfer	

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:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

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

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

AP A: *Status:* Die hochauflösende AFM Messungen an Calcit-Einkristallen in Gegenwart von NaNO_3 oder KNO_3 in Zusammenarbeit mit der EPFL Lausanne sind abgeschlossen und zusammen mit den Daten zu Eu(III) TRLFS Messungen mit NaNO_3 an Calcitpulver publiziert. Weiterhin wurden Mitfällungssynthesen von Eu(III)- Calcit mit NaCl , NaF und NaBr als Hintergrundelektrolyten zur systematischen Untersuchung des Einflusses von Halogenidionen (TRLFS) und quantitative analytische Untersuchungen zur Eu/Gd-Aufnahme von Calcit als Funktion der Zeit mit NaClO_4 als Hintergrundelektrolyten durchgeführt. Grenzflächensensitive Röntgenbeugung (CTR) an Calcitkristallen zur Untersuchung des oberflächenverändernden Einflusses von NaNO_3 liefern ein detailliertes Bild der Oberflächenprozesse bei Sorption von Yttrium in An- und Abwesenheit von NaNO_3 . Der Einbau dreiwertigen Europiums in Calcit durch Oberflächenre-

kristallisation unter Gleichgewichtsbedingungen wurde über 2,5 Jahre Reaktionszeit mit Hilfe der TRLFS nachgewiesen.

AP B: *Status*: Keine neuen Aktivitäten.

AP C: *Status*: Wohl definierte Kristalle verschiedener Zusammensetzung der (Pb,Sr,Ba)SO₄ Mischkristallserie wurden bei verschiedenen Temperaturen (<100 °C) durch die Technik der langsamen Präzipitation hergestellt. Die so synthetisierten Kristalle haben eine Größe von 0.5 bis 1.5 mm (als Funktion von Temperatur und Zusammensetzung) und scheinen bezüglich der Zusammensetzung homogen zu sein. Ziel der Studie ist es, mittels dieser Methode den Gleichgewichts-Verteilungskoeffizient zu bestimmen. Auf Basis der Ergebnisse des (Pb,Sr,Ba)SO₄-H₂O Modellsystems wird ein kinetisches Modell zur Keimbildung und dem Wachstumsverhalten ternärer Solid Solutions entwickelt. Weitere Aktivitäten fokussieren auf der Effektivität von Ettringit Ca₆Al₂O₆(SO₄)₃·~26H₂O als potentielle Sekundärphase zur Rückhaltung von Se(VI) und hier speziell der Dehydrationskinetik bei verschiedenen Temperaturen und dem Einfluss der SeO₃²⁻ Einbaus auf die polymorphe Rekristallisation von CaCO₃. Hier zeigt sich, dass Se(IV) die Präzipitation von Vaterit fördert und die Transformation in Calcit verhindert. Im ersten Schritt bildet sich ein sehr schwach kristalliner Vaterit, der bis zu 16 mol % Se(IV) in die Struktur einbauen kann. Die Arbeiten zur Se(-II) Sorption an C-S-H Phasen wurden auf Se(IV) mit verschiedene Ca/Si Verhältnissen ausgeweitet und an AFm-CO₃ und AFm-OH-CO₃ Phasen unter reduzierende Bedingungen fortgeführt und mit Se(-II) Sorption an TiO₂ verglichen. In diesem Zusammenhang wurden auch EXAFS Messungen zur Se(IV) und Se(-II) Sorption hier nun unter Variation der Se Beladung (Konzentration) an verschiedenen Zement Phasen unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen durchgeführt und diese Daten werden zurzeit ausgewertet.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP A:

- Site-selektive TRLFS-Messungen an Calcitproben dotiert mit Eu/Cm (Rekristallisations-/ Mitfällungsexperimente) mit Halogeniden als Hintergrundelektrolyt.
- Quantitativ analytische Untersuchungen zur Ln(III)-Aufnahme von Calcit über verschiedene Zeiträume mit NaNO₃ als Hintergrundelektrolyten.
- AFM-Messungen bei atomarer Auflösung zur Gewinnung quantitativer Informationen zur Wasserstruktur auf der Calcit-Lösungs-Grenzfläche (unterstützt durch molekulare Modellierungen).

AP B:

- Die Arbeiten zu An(IV)- Calcit wurden zugunsten vertiefter Arbeiten im An(III)- Calcit System eingestellt. Thermodynamische Testrechnungen ergaben einen nicht zu erwartenden Einbau von An(IV).

AP C:

- Se(-II) Sorptionsisothermen an C-S-H Phasen mit verschiedenen Ca/Si Verhältnissen, an AFm-CO₃ und AFm-OH-CO₃ Phasen.
- Synthese und Charakterisierung von AFm-Phasen mit verschiedenen Se(IV) – CO₃ Verhältnissen sowie AFm Phasen mit verschiedenen Se(-II) – CO₃ Verhältnissen.
- Langzeit Batch-Sorptionsexperimente mit Se(IV): Effekt von wechselnden Redoxbedingungen und Durchführung der 3^{ten} EXAFS Messzeit.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Peer-reviewed publiziert:

Fernández-González, Lozano, Jiménez (2014) “The role of Se(IV) in the CaCO₃ Polymorphism.” Goldschmidt Abstracts, p. 687.

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

Fischer, Kurganskaya, Schäfer, Lüttge (2014) “Variability of crystal surface reactivity: What do we know?” Appl. Geochem. 43, 132.

Heberling, Eng, Denecke, Lützenkirchen, Geckeis, (2014) „Electrolyte layering at the calcite(104)-water interface indicated by Rb+- and Se(VI) K-edge resonant interface diffraction.” Physical Chemistry Chemical Physics 16, 12782-12792.

Heberling, Vinograd, Polly, Gale, Heck, Rothe, Bosbach, Geckeis, Winkler, (2014) “A thermodynamic adsorption/entrapment model for selenium(IV) coprecipitation with calcite”. Geochimica et Cosmochimica Acta, 134, 16-38.

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		Förderkennzeichen: 02 NUK 019B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.01.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 263.424,00 EUR	Projektleiter: 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 2014 wurden erste detaillierte Strukturuntersuchungen der synthetisierten Eisensulfide und Eisenoxide an der Synchrotronquelle ANKA des KIT durchgeführt sowie die spezifische Oberfläche durch die BET-Messung bestimmt.

Der Einbau von Selen in Pyrit wurde mit der Wertigkeit von Selen(0) bestimmt, was auf eine Reduktion des Selens während des Einbaus schließen lässt. Dieses Ergebnis führt zu einem strukturellen Unterschied zum gebundenen Schwefel(-I) in der Pyritstruktur. Die morphologischen Eigenschaften der synthetisierten Pyrite und Selen-dotierten Pyrite zeigen Gemeinsamkeiten mit synthetisierten Pyriten aus der Literatur, welche sich durch Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop andeuteten und durch Messungen der spezifischen Oberfläche weiter bestätigen.

Im Falle der Eisenoxide weisen die Untersuchungen an der Synchrotronquelle ANKA auf Unterschiede im Sorptionsverhalten zwischen der Selen-Adsorption und -Kopräzipitation hin. Während die Adsorption von Se(IV) an Hämatit keine Veränderung der Selen-Wertigkeit bewirkt, deuten die Messergebnisse der Selen-Kopräzipitation darauf hin, dass die Bildung von Hämatit den Valenzzustand von Se(IV) teilweise verändert und der Bedingungsmechanismus des Selens nicht ausschließlich auf Adsorptionsprozesse zurückzuführen ist. Letzteres konnte ebenfalls durch die Resultate von Adsorptionsstudien bestätigt werden.

Der aktuelle Stand der Arbeiten wurde den Projektpartnern während des „ImmoRad-Meetings“ im Mai 2014 in Oviedo präsentiert und weiteres Vorgehen diskutiert. Des Weiteren wurden die Themen im Juni auf der Goldschmidt-Konferenz in Sacramento (USA) einem internationalen Fachpublikum vorgestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan. In der zweiten Hälfte des Halbjahres 2014 werden Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung und der Bindungsverhältnisse der Mineraloberflächen durchgeführt, die mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie an Instituten von ImmoRad-Projektpartnern stattfinden und Aufschluss über den Oxidationszustand von Selen an der Mineraloberfläche und die allgemeine Stabilität der Eisenminerale geben. Weiterhin sollen die Strukturuntersuchungen der synthetisierten Präparate an einer Synchrotronquelle fortgeführt werden, um den Bindungsmechanismus des Selens im Detail zu charakterisieren und um die hydrochemisch behandelten Proben auf ihre Stabilität hin zu untersuchen.

Im Oktober ist die Vorstellung der Themen auf dem Workshop „Selen2014“ in Karlsruhe geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

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

BÖRSIG, N., NEUMANN, T. (2014): Selenium Fixation by Adsorption and Co-precipitation during the Formation of Hematite (Presentation). Goldschmidt Conference 2014

POTSCHE, S., NEUMANN, T. (2014): Incorporation of Dissolved Selenium during Fast Precipitation of Pyrite: Efficiency and Morphological Features (Presentation). Goldschmidt Conference 2014

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich		Förderkennzeichen: 02 NUK 019C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.01.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 243.568,00 EUR	Projektleiter: 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 Ca^{2+} Ionen durch Na^+ und Eu^{3+} in Carbonat, als auch in Phosphatverbindungen.
- Synthese, Charakterisierung und thermodynamische Beschreibung von phosphat- und silikathaltigen Mischkristallreihen mit tetravalenten Actiniden und dem homologen tetravalenten Element Zr.
- Synthese, Charakterisierung und thermodynamische Beschreibung von Sr/Ba/Ra-Sulfat Mischkristallreihen.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Literaturstudie zu den angesprochenen Mischkristallreihen
 AP2: Synthese der Mischkristallreihen
 AP3, 4, 5: Charakterisierung, Strukturaufklärung und kalorimetrische Messungen
 AP6: Modellierungen
 AP7: Ergebnisdokumentation

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: U(IV)/Th(IV)-Phosphate dotiert mit Nd^{3+} konnten erstmals synthetisiert werden. Ra-Sorptionsexperimente mit Ba-Sr- SO_4 Mischkristallen laufen und erste Ergebnisse wurden beim ImmoRad Meeting in Oviedo vorgestellt.
- AP3, 4, 5: Die mit Nd^{3+} dotierten U(IV)/Th(IV)-Phosphate wurden strukturell charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, dass Nd^{3+} im Kristallgitter eindeutig eine An^{4+} Position belegt. Als Grundlage für Zr-(IV)-haltige LDHs wurden MgAl-LDH Verbindungen kalorimetrisch untersucht. Aus diesen Messdaten wurde die Standard Bildungsenthalpie sowie die absolute Bildungsentropie bestimmt.
- AP6: Für die synthetisierten Mischkristalle werden fortlaufend geochemische Modellierungen (GEMS) durchgeführt um den Mechanismus des strukturellen Einbaus aufzustellen.
- AP7: Noch nicht begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Arbeiten sind abgeschlossen.
- AP2: Analog den mit Nd^{3+} dotierten U(IV)/Th(IV)-Phosphate sind entsprechende Synthesen der Arsenate geplant. Fortführung der Ra-Sorptionsexperimente mit Ba-Sr- SO_4 Mischkristallen und Auswertung der experimentellen Ergebnisse.
- AP3, 4, 5: Kalorimetrische Messungen von Zr(IV)-haltige LDH Verbindungen sind geplant. Auswertungen dieser Daten führen zur Bestimmung der molaren Standard Bildungsenthalpie und der absoluten molaren Bildungsentropie des vorliegenden Mischkristallsystems.
- AP6: Fortlaufende geochemische Modellierungen synthetisierter Verbindungen (GEMS) sind geplant.
- AP7: Noch nicht begonnen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 019D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.01.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 400.943,00 EUR	Projektleiter: 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)-Sorptionenkomplexe und Festphasen zu bestimmen. Zwei entsprechende Proben, die seit Anfang 2010 equilibriert werden, ermöglichen auch Zeitskalen jenseits von 2 Jahren.
- B) *Reduktive Reaktion von Np(V)* mit Mackinawit (FeS) und Magnetit. Die Reaktionsprodukte werden mit Np(IV)/Fe(II)/S(-II) und Np(IV)/Fe(II)/Fe(III)/O(-II) Kopräzipitaten verglichen. Durch die Reaktion mit Mackinawit kann auch die bisher vorwiegend bei tieferen Redoxstufen beobachtete Sulfidkoordination von Np(IV) verifiziert werden. Untersuchung der möglichen Inkorporation von Np(IV) durch die Fe(II)-Carbonate Siderit oder Chukanovit, sowohl im Langzeit-Sorptionsexperiment (2 Jahre) als auch an Actinid/Fe(II)/Karbonat Kopräzipitaten. Wie oben werden die Struktur und Oxidationsstufe der mit der Festphase assoziierten Np-Spezies spektroskopisch (XAFS, eventuell auch XPS) untersucht, und die Lösungsbedingungen (Eh, pH, gelöste Ionen) werden sorgfältig erfasst, um Stabilitätskonstanten der Sorptionskomplexe und Festphasen zu bestimmen.
- C) Das IRE wird die von *PSI-LEG hergestellten „solid solutions“* zwischen Se(IV/VI) und LDH und Tc(VII) und LDH sowie die von KIT-IMG hergestellten „solid solutions“ zwischen Se und Eisensulfiden mittels der eigenen XAFS-Beamline ROBL auf Oxidationsstufen und Nahordnung untersuchen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bearbeitung des Programmpaketes B-3 (Np-Siderit-System, Np-Magnetit-System + Np-Mackinawit-System):

Synthese und Charakterisierung (Zetapotenzialmessung) des Mackinawits. Die vollständige Bestimmung der zeit-, konzentrations- und pH-abhängigen Retention von Np(V) in Gegenwart von allen drei Mineralen ist abgeschlossen. Bestimmung der Np-Retentionskoeffizienten ($\log R_d$ in $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$) mittels Flüssigszinilationsmessungen. Messung der Fe-Gehalt der Lösungsüberstände mittels ICP-MS, um Aussagen über die Stabilität der Mineralphasen zu treffen.

Siderit-System: Die XAFS-Messungen zeigten eine vollständige Reduktion von Np(V) zu Np(IV), und die Ausfällung als NpO_2 -Nanopartikel, deren Größe mit zunehmender Alterung zunimmt. Die Messungen der Kopräzipitate zeigte ein nicht zu erwartendes Ergebnis und muss nun noch mal genauer diskutiert und betrachtet werden.

Magnetit-System: Die XAFS-Messungen zeigten eine deutliche pH-Abhängigkeit der mit der Festphase assoziierten Np-Spezies, was auch durch die deutliche pH-Abhängigkeit der Np-Retentionskoeffizienten zu erwarten war. Generell zeigt sich ein dreistufiger Sorption- und Reduktionsprozess. Bei niedrigen pH-Werten sorbiert zunächst das Np(V) als innerhärischer Komplex. Das Np(V) wird anschließend durch die Gegenwart von Fe(II) zu Np(IV) reduziert und es erfolgt eine strukturelle Umlagerung des Np auf der Mineraloberfläche zu einem tridentaten Np(IV) Sorptionkomplexes in Analogie zum Pu-Magnetit-System. In Abhängigkeit von der Zeit und bei hohen pH-Werten bildet sich dann wieder NpO_2 .

Mackinawit-System: Es wurde eine deutliche pH-Abhängigkeit der Np-Retention beobachtet: mit steigendem pH-Wert steigt der $\log R_d$ von 2,5 im sauren pH-Wertbereich, über Werte von 3,5 im mittleren pH-Wertbereich bis hin zu Werten von 5,5 bei einem pH-Wert von 12. Bis auf den basischen pH-Wertbereich ist die Retention nahezu unabhängig von der Versuchsdauer.

Bearbeitung des Programmpaketes C:

Se-LDH-XAS-Messungen für PSI-LES wurden am 19.-22.02.2014 erfolgreich durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Programmpaket A:

- Erarbeitung einer Publikation der Pu-Magnetit-Kopräzipitationsdaten

Programmpaket B:

- Erarbeitung einer Publikation der Np-Siderite- bzw. Np-Magnetit-Daten
- Np-Mackinawit: Vervollständigung der EXAFS-Experimente

Programmpaket C:

- Auswertung der Se-LDH-EXAFS-Messungen vom 19.-22.02.2014

5. Berichte, Veröffentlichungen

Interaction of plutonium with magnetite under anoxic conditions: Reduction, surface complexation, and structural incorporation; Scheinost A.C., Kirsch R., Dumas T., Rossberg A., Fellhauer A., Gaona X., Altmaier M.; eingeladener Vortrag bei 248th ACS National Meeting, 10.-14.08.2014, San Francisco, USA

Retention of selenium by cementitious materials under reducing radioactive waste repository conditions; Rojo, H.; Tits, J.; Scheinost, A. C.; Wieland, E.; Poster bei Goldschmidt 2014, 08.-13.06.2014, Sacramento, USA

Interaction of plutonium and neptunium with magnetite under anoxic conditions: Reduction, surface complexation, and structural incorporation; Scheinost, A. C.; Dumas, T.; Steudtner, R.; Fellhauer, D.; Gaona, X.; Altmaier, M.; Eingeladener Vortrag Actinide XAS 2014, 20.-22.05.2014, Schloss Boettstein, Switzerland

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main		Förderkennzeichen: 02 NUK 019E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.01.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 243.372,00 EUR	Projektleiter: 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

Zum Themenbereich B (Vierwertige Actinide) wurden die Untersuchungen an den im FZJ-IEK6 synthetisierten Orthosilikatphasen ($M\text{SiO}_4$, $M = \text{U, Th, Zr}$) fortgeführt. Wir haben die pulverförmigen Proben der von FZJ IEK-6 / HZDR hergestellten Mischkristallreihe $(\text{Th,Zr})\text{SiO}_4$ erhalten. Es wurde mit Ramanspektroskopie bei Raumbedingungen begonnen. Eine Publikation über die druckinduzierte strukturelle Phasentransformation von USiO_4 wurde eingereicht und befindet sich derzeit in Begutachtung. Diese Publikation entspricht den Meilensteinen I und III. Die Erreichung des weiteren Meilensteins zur Mikrokalorimetrie an uranhaltigen Phasen setzt das Vorhandensein reiner Proben dieser Substanzen voraus. Dies ist bei den gegenwärtigen Synthesen nicht der Fall. Die geplanten Experimente am Synchrotron (PETRA III, Hamburg) zur thermischen Stabilität und Umwandlung von Studtite in Metastudtite konnten aufgrund techni-

scher Probleme nicht wie geplant durchgeführt werden. Stattdessen wurden Experimente am FZJ IEK-6 durchgeführt und auf der Jahrestagung der DGK vorgestellt.

Zum Themenbereich C (Radium und Spaltprodukte) wurde mit den Experimenten an den Proben der Projektpartner begonnen. Aus der Kooperation mit dem FZJ-IEK6 wurden vier LDH Phasen (Fe, Ni, Co-haltig sowie ohne zusätzliches Kation) mikrokalorimetrisch untersucht. Zur genauen Bestimmung des Einflusses der Kationen sind Experimente an weiteren Proben nötig.

Vom KIT-IMG wurden pulverförmige Proben von Pyrit (FeS_2), Hämatit (Fe_2O_3), Magnetit (Fe_3O_4) und Goethit (FeOOH) in reiner und selendotierter Form erhalten. Aus den ramanspektroskopischen Untersuchungen lässt sich kein Einfluss der Dotierung mit Selen erkennen. Die Untersuchungen mit Mikrokalorimetrie sind noch nicht abgeschlossen. Im Falle des Pyrit könnte es sein, dass ein Einfluss der Dotierung mit Selen erkennbar ist, aber die Messungen müssen wiederholt werden. Die Messungen von Hämatit müssen ebenfalls wiederholt werden, da die Proben offenbar in großem Maße (> 5 Gewichts-%) Wasser adsorbiert. Im Falle des Magnetits müssen ebenfalls weitere Untersuchungen durchgeführt werden, da der in der Literatur beschriebene Verway Übergang offensichtlich stark Korngrößenabhängig ist.

Die Modellrechnungen des Systems $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$ und $(\text{Ba,Pb})\text{SO}_4$ mit der „double defect“ Methode wurden abgeschlossen, eine Publikation ist in Vorbereitung. Diese Modellrechnungen wurden auf die ternären Systeme $(\text{Ba,Sr,Ra})\text{SO}_4$ und $(\text{Ba,Pb,Ra})\text{SO}_4$ ausgeweitet. Weiterhin werden DFT Rechnungen zu diesem Themenkomplex durchgeführt. Kristalle der Endglieder BaSO_4 , SrSO_4 und PbSO_4 wurden mit Mikrokalorimetrie untersucht, eine Veröffentlichung dazu befindet sich in Vorbereitung. Es wurden Proben der Mischkristallreihe $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$ synthetisiert. Die mikrokalorimetrischen Untersuchungen haben gezeigt, dass keine Exzesswärmekapazität in diesem System auftritt.

Die Arbeit in der Kooperation mit dem KIT-INE zur Präparation orientierter Calcit Platten, mit einigen einige cm^2 großen (104) Flächen wurde begonnen und teilweise abgeschlossen. Die im letzten Berichtszeitraum akzeptierte Publikation von Heberling et al. zur Kopräzipitation von Se(IV) und Calcit ist nun veröffentlicht (siehe Pkt. 5). Herr Bauer hat einen Beitrag zur 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning verfasst.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten werden wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Die Untersuchungen der Mischkristallreihe $(\text{Th,Zr})\text{SiO}_4$ sowie der LDH Phasen in Zusammenarbeit mit dem FZJ IEK-6 werden fortgeführt. Die mikrokalorimetrischen Messungen der Se-dotierte Eisenoxid bzw. Eisensulfid Phasen aus der Kooperation mit dem KIT-IMG werden abgeschlossen. Aus der Kooperation mit UO-DG erwarten wir im Laufe des nächsten Berichtszeitraums Proben der Mischkristallreihe $(\text{Ba,Sr,Pb})\text{SO}_4$, die mit dem Mikrokalorimeter untersucht werden sollen. Die Zusammenarbeit mit PSI bezüglich der dort hergestellten LDH Phasen kann voraussichtlich Ende des Jahres begonnen werden. Die Modellrechnungen der ternären Systeme $(\text{Ba,Sr,Ra})\text{SO}_4$ und $(\text{Ba,Pb,Ra})\text{SO}_4$ sollen abgeschlossen und die Ergebnisse publiziert werden. Die Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessungen der $(\text{Ba,Sr})\text{SO}_4$ Mischkristallreihe sowie der Endglieder BaSO_4 , SrSO_4 und PbSO_4 sollen im nächsten Berichtszeitraum publiziert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

J.D. Bauer et al.: High-pressure phase transformation of coffinite, USiO_4 , eingereicht bei *Journal of Physical Chemistry C*

F. Heberling et al.: A thermodynamic adsorption/entrapment model for selenium(IV) coprecipitation with calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 134(1), 16-38 (2014)

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

J.D. Bauer et al.: Materials properties at high pressure in the diamond anvil cell. 8th *European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning as well as Supramolecular, Intermolecular, Interaggregate Chemistry*, Bonn, Juli 2014

J.D. Bauer et al.: The crystal structures of synthetic coffinite, USiO_4 , and uranothorite, $\text{U}_x\text{Th}_{1-x}\text{SiO}_4$, analyzed by powder diffraction. *DESY Photon Science Annual Report 2013*

Zuwendungsempfänger: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Regina-Pacis-Weg 3, 53113 Bonn		Förderkennzeichen: 02 NUK 019F
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2013 bis 31.03.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 284.148,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Geisler-Wierwille	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- (A): Vollständige Synthese mit komplexeren Zusammensetzungen kurz vor Abschluss.
- (B): Batchexperimente mit ISG Glas (Glas 2) laufend. Ferner werden Erkenntnisse aus den vorherigen Experimenten zum Lösungsverhalten bei Rissbildung (aus Arbeitspaket F) auf das ISG übertragen, indem ebenfalls Würfel mit künstlichen Rissen hergestellt wurden und in Batchexperimenten alteriert werden (laufend).
Erstmalig wurde ein Raman - In-situ-Echtzeitexperiment zum Alterationsverhalten erfolgreich mit ternärem Borosilikatglas ($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$) durchgeführt. Die experimentellen Beobachtungen stimmen dabei sehr gut mit dem propagierten Lösung-Fällungsmodell überein (z. B. Entwicklung einer wasserreichen Zone an der Reaktionsfront).
- (C-D): Werden im Anschluss an Batchexperimente (B) durchgeführt.
- (E): Befindet sich in der Durchführung. Vorläufige Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Auflösungsverhaltens vom ternären Borosilikatglas mit der (stöchiometrischen) Sättigung der Alterationslösung.
- (F): Es wurden weitere Alterationsexperimente mit Würfeln in kleinvolumigen Batchreaktoren zum Vergleich mit den bisherigen (untersättigten) Experimenten durchgeführt und befinden sich nun in der Analyse.
- (G): Ein Gitterboxmodell wurde basierend auf einem Lösungsfällungsprozess implementiert und der Phasenraum der Musterbildung kartiert. Zusätzlich gibt es erste Ansätze zum Einbinden des geochemischen Codes PHREEQC.

4. Geplante Weiterarbeiten

- (A): Präparation von komplexen Gläsern (Würfel/Pulver).
- (B): Fortsetzung und Weiterführung bisheriger Batchexperimente (mit weiteren Gläsern); In-situ-Echtzeitexperimente bei basischen Bedingungen, gefolgt von Durchführungen mit komplexeren Gläsern.
- (C-D): Im Anschluss an (A/B).
- (E): Fortsetzung der laufenden Durchflussexperimente, Lösungsanalyse, Charakterisierung der abgelösten Glasoberflächen und eventueller Alterationsprodukte.
- (F): Analysephase und Auswertung.
- (G): In Weiterentwicklung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag zum In-situ-Experiment: Lenting C., Dohmen L. and Geisler T. (2014): Silicate glass corrosion mechanism revisited. Abstracts of the 1st Joint Meeting of the German Society of Glass Technology (DGG) and the Glass & Optical Materials Division Annual Meeting (ACerS GOMD) in Aachen, 2014.

Entsprechende Postervorstellung auf dem DMG-Sektionstreffen (Geochemie-Petrologie) (27./28. Juni) in Hannover. Lenting. C. and Geisler T. (2014): A real-time, in situ Raman spectroscopic study on borosilicate glass corrosion. DMG-Sektionstreffen Geochemie-Petrologie, Hannover, 2014.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 020A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 550.191,00 EUR	Projektleiter: Dr. Geist	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

Arbeitspaket D: Nachwuchsförderung

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitspaket A:

Im vergangenen Berichtszeitraum wurden Fortschritte bei der Synthese des vollständig ^{15}N -markierten Pyridinrings zur Synthese von ^{15}N -isotopenmarkiertem $n\text{Pr}$ -BTP und C5-BPP erzielt.

Arbeitspaket B:

Im vergangenen Berichtszeitraum wurden ^{15}N -markierte C5-BPP Komplexe mit dreiwertigen Kationen der gesamten Lanthanidenreihe synthetisiert und NMR-spektroskopisch charakterisiert. Besonders in Komplexen stark paramagnetischer Metallionen ermöglicht die ^{15}N -Isotopenmarkierung der Liganden, Signale der koordinierenden Stickstoffatome wie z. B. in $\text{Tb}(\text{C5-BPP})_3(\text{OTf})_3$ aufzufinden. Die systematische Auswertung der erhaltenen Daten, besonders im Vergleich zu den komplementären $n\text{Pr}$ -BTP-Daten, wurde in diesem Berichtszeitraum begonnen.

Die Arbeiten an den diamagnetischen und schwach paramagnetischen Komplexen des C5-BBP wurden fortgesetzt.

iPr-BTP verfügt über eine schnellere Komplexbildungskinetik und bildet stabilere Lanthaniden- und Actinidenkomplexe als *nPr*-BTP. Es wurden bereits NMR-Spektren von diamagnetischen und paramagnetischen Lanthanidenkomplexen des ²⁴³Am(III)-Komplexes gemessen. Eine vorläufige Auswertung zeigt, dass die an *nPr*-BTP und C5-BBP-Komplexen gefundenen Hochfeldverschiebungen ebenfalls auftreten.

Arbeitspaket D:

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Dr. Louise Natrajan an der Universität Manchester und dem KIT-INE wurde der „First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry“ in Manchester organisiert und durchgeführt. In Kurzvorträgen und einer Postersession präsentierten die über 40 Jungwissenschaftler des f-Kom-Projekts und der englischen Kollegen von NNL, UC London und den verschiedenen Arbeitsgruppen der Uni Manchester ihre Arbeiten.

Es wurde bereits zum fünften Mal die ThUL School in Actinide Chemistry (Karlsruhe, 02.-06.06.2014) vom KIT-INE organisiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Arbeitspaket A:

Die Arbeiten zur Etablierung einer Syntheseroute zur Darstellung vollständig ¹⁵N-isotopenmarkierter Liganden wird fortgesetzt.

Arbeitspaket B:

Die Datenlage der *nPr*-BTP- und C5-BBP-Komplexe mit dreiwertigen Lanthaniden und Actiniden soll im kommenden Berichtszeitraum weiter vervollständigt werden. Die Erweiterung der Actinidenkomplexe auf ²³⁹Pu-Komplexe von *nPr*-BTP und C5-BBP ist weiterhin geplant und soll im kommenden Berichtszeitraum durchgeführt werden.

Untersuchungen zu einer möglichen Übertragbarkeit der für Lanthaniden beschriebenen Methoden zur Quantifizierung von paramagnetischen Einflüssen werden fortgesetzt.

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

Arbeitspaket D:

Der Termin für den „Second Joint Student Workshop on f-Element Chemistry“ in Karlsruhe steht bereits fest. Der Workshop wird im Akademiehôtel Karlsruhe im Zeitraum 09.-11.06.2015 stattfinden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Publikationen:

Autillo, M., et al., Phys Chem Chem Phys 2014, 16, 8608–8614.

Vorträge:

Adam, C. et al., Cost Action Meeting, Erlangen, 27.06.2014.

Adam, C. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Bauer, N. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Beele, B. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Bremer, A. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Geist, A., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014 (Plenary, invited).

Geist, A., ThUL School in Actinide Chemistry, Karlsruhe, 02.–06.06.2014.

Kaden, P. et al., Formalisierte Institutsbegehung, KIT, 23.01.2014.

Kaden, P. et al., ThUL School in Actinide Chemistry, Karlsruhe, 02.–06.06.2014.

Langford Paden M.H. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Woodall, S., et al. First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Poster:

Adam, C. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Adam, C. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Adam, C. et al., ThUL School in Actinide Chemistry, Karlsruhe, 02.–06.06.2014.

Adam, C. et al., ThUL School in Actinide Chemistry, Karlsruhe, 02.–06.06.2014.

Wagner, C. et al., First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 28.–30.04.2014.

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe		Förderkennzeichen: 02 NUK 020B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 838.422,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Roesky	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

- Optimierung der Liganden (N-, O- und S-Donor-Liganden) anhand der bis dahin erhaltenen Erkenntnisse

Die Untersuchungen erfolgten in den Bereichen:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wie sich in diesen Untersuchungen ergeben hat, weist der Ligand 6-Tetrazol-5-yl-2,2'-bipyridin (HN4bipy) eine gute Selektivität auf, jedoch beschränkt die geringe Löslichkeit von HN4bipy in aliphatischen Kohlenwasserstoffen die Nutzung des Liganden in der Extraktion maßgeblich. Um die Löslichkeit des Ligandensystems zu erhöhen, wurden t-Butylgruppen am Bipyridin-Rückgrat eingeführt und der modifizierte Ligand Tetrazol-5-yl-4,4'-di-t-butyl-2,2'-bipyridin (tBu-HN4bipy) in Form seines Hydrochlorids erhalten. Das Hydrochlorid besitzt keine idealen Extraktionseigenschaften. Zurzeit werden alternative Syntheserouten zur Darstellung des Neutralliganden untersucht. Dies und weitere Experimente hinsichtlich des Koordinationsverhaltens des neuen Ligandensystems sind in Arbeit.

Ein weiteres Projekt umfasst die Darstellung S-N-Donor Liganden mit phosphorhaltigem Ligandrückgrat. Nach Optimierung der Synthesebedingungen konnte der Ligand Bis(6-methylen-2,2'-bipyridyl)phenylthiophosphan (PSbipy) in reiner Form hergestellt und vollständig charakterisiert werden. Die entsprechenden Lanthanoid-Verbindungen konnten bisher nicht realisiert werden, und die Synthese dieser Verbindungen ist Gegenstand der

aktuellen Forschung (WP2). Zusätzlich soll das Ligandensystem am N-Donorgerüst weiter funktionalisiert werden (pyrazolylfunktionalisiertes Thiophosphan). Bisher konnte die entsprechende Phosphan-Zwischenstufe erfolgreich dargestellt werden, der nächste Syntheseschritt umfasst die Umsetzung mit Schwefel zum gewünschten Bis(pyrazolyl-bipyridyl)phenylthiophosphan (PSpyrpy).

Die Studien zur Auswirkung von nicht-koordinierten N-Donor-Funktionalitäten im Komplex auf die Koordinationseigenschaften wurden durch die Synthese neuer tripodaler Liganden mit stickstoffreichen Heterozyklen fortgeführt. Hierbei konnte der bereits untersuchte N-Donorligand $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{py}\}_3]$ erfolgreich mit 2-Imidazol, 5-Methylpyrazol und 1,2,4-Triazol derivatisiert werden. Der Komplex wurde NMR-spektroskopisch vollständig charakterisiert (WP2). Die mittels Einkristallröntgenstrukturanalyse erhaltene Kristallstruktur weist im Vergleich zum entsprechenden Lanthan(III)-Komplex des 5-Imidazol-substituierten Liganden ähnliche Bindungslängen auf. Demnach scheint die Position des zusätzlichen N-Donors im Heterozyklus (α/β -Position) keinen großen Einfluss auf die Koordinationseigenschaften im Festkörper auszuüben. NMR-spektroskopisch kann jedoch ein Unterschied in der Koordinationsstärke zwischen den Yttrium(III)-Komplexen des Stammsystems bzw. des 5-Imidazol-substituierten Liganden festgestellt werden. Zur Verifizierung der vorliegenden Koordination in Lösung wurden Tieftemperatur ^{19}F -NMR-Messungen durchgeführt. Der erhaltene Yttrium(III)-Komplex liegt in Lösung als Solvenz-separiertes Ionenpaar vor. Im letzten Halbjahr konnte auch eine Festkörperstruktur eines Samarium(III)-Komplexes mit dem Pyrazin-substituierten Liganden erhalten werden.

Erste Protonierungsreaktionen eines Übergangsmetallkomplexes mit dem Pyrazinliganden wurden durchgeführt und NMR spektroskopisch analysiert.

Aufgrund der schlechten Kristallisationseigenschaften der verschiedenen Lanthanid-Komplexe wurden alle bisher synthetisierten Ligandensysteme mit Eisen(II)-Salzen umgesetzt und kristallisiert. Die Festkörperstrukturen der Liganden mit Fünfringheterozyklen weisen eine nahezu trigonal prismatische Umgebung des Eisens auf (high-spin Komplexe), während das Eisen im Falle der Liganden mit Sechsringheterozyklen eine verzerrt oktaedrische Koordinationsumgebung zeigt (low-spin Komplexe).

Zur Untersuchung von Extraktionsliganden, die neben den N-Donor- auch S-Donorfunktionalitäten aufweisen, wird in diesem Projekt im AK Breher eine Kombination aus dem bereits bekannten N-Donorliganden Trispyrazolylmethan (tpm) und einer Thio- bzw. Dithiophosphinsäure angestrebt (WP 1). Die Darstellung der gewünschten Dithiophosphinsäure über das entsprechende Phosphan bzw. den entsprechenden Trimethylsilylthioether sind Gegenstand aktueller Forschung.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Darstellung des Nautralliganden tBu-HN4bipy.
- Extraktionsexperimente in Kooperation mit Campus-Nord.
- Ligandensynthese: Triazolylpyridinsysteme.
- Phosphorsulfide: Abschluss der Synthesearbeiten zum Ligandensystem PSpypyrpy; Darstellung der entsprechenden Lanthanoidkomplexe
- Untersuchung des Komplexyungsverhaltens von PSbipy und PSpypyrpy mittels TRLFS.
- Derivatisierung des Stammsystems $[\text{SP}\{\text{N}(\text{CH}_3)\text{NC}(\text{H})\text{py}\}_3]$ mit weiteren stickstoffreichen Aldehyden; Untersuchung der Komplexyungseigenschaften in Bezug auf Lanthanidtriflate.
- Fortführung Synthese der Dithiophosphinsäurederivate $\text{Tpm}^{\text{P}(\text{S})(\text{SH})\text{R}}$; Darstellung der ersten f-Element-Komplexe.

5. Berichte, Veröffentlichungen

J. Kratsch, B. B. Beele, C. Koke, M. A. Denecke, A. Geist, P. J. Panak, P. W. Roesky: 6-(Tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridine: A Highly Selective Ligand for the Separation of Lanthanides(III) and Actinides(III), *Inorg. Chem.* 2014, article ASAP, DOI: 10.1021/ic5007549

A. T. Wagner: Luminescent Cell-Penetrating Pentadecanuclear Lanthanide Clusters, COST Action CM1006: European f-Element Network (EUFEN3), Nürnberg, 2014.

S. Hohnstein: Tailored Hydrazone-Supported Tripodal $\kappa 6\text{N}$ Donor Ligands for the Coordination of f-elements, COST Action CM1006: European f-Element Chemistry (EUFEN3), Nürnberg, 2014.

S. Hohnstein: Multifunctional ligands for the complexation of f-elements, First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, 2014.

S. Schäfer: 6-(Tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridine: Solid state structures and TRLFS-studies with Cm(III) and Eu(III), First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, UK, 2014.

A. T. Wagner: Luminescent Cell-Penetrating Pentadecanuclear Lanthanide Clusters, First Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, Manchester, UK, 2014.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen		Förderkennzeichen: 02 NUK 020C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 442.080,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Meyer	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen des BMBF-Projektes wurden bisher in der AG Meyer unterschiedliche O-, N,O- und N,N-Liganden synthetisiert, die verschiedene Ankersysteme (N, tacn, mes, py etc.) tragen. Durch eine entsprechend angepasste Auswahl an ortho- und para-Substituenten konnten im Anschluss die elektronischen und magnetischen Eigenschaften sowie die Reaktivitäten und Löslichkeiten der daraus hervorgegangenen Urankomplexe maßgeschneidert werden. In diesem Zusammenhang berichteten wir kürzlich über die Reaktivität niedervalenter Uran(III)-Komplexe (N-Ankersystem) gegenüber elementaren Chalkogenen, und diese Veröffentlichung ist in diesem Berichtszeitraum erschienen (Chem. Sci. 2014, 5, 942–950).

Des Weiteren wurden Synthesestudien bezüglich der Redoxchemie an dreiwertigen Uranmonoarenkomplexen durchgeführt, die als Chelatbildner den mesityl-geankerten Liganden $(^{Ad,Me}ArO)_3mes^{3-}$ aufweisen. Cyclovoltammetrische Untersuchungen an $[{(^{Ad,Me}ArO)_3mes}U^{III}]$ zeigten eine nahezu reversible und chemisch zugängliche Reduktion bei -2.495 V gegenüber Fc/Fc^+ , das den ersten elektrochemischen Hinweis für einen formal zweiwertigen Urankomplex darstellt. Die chemische Reduktion durch Na^0 oder KC_8 von $[{(^{Ad,Me}ArO)_3mes}U^{III}]$ weist darauf hin, dass dieser Reaktionsschritt eine Koordination- und Redoxisomerisierung zu einem Uran(IV)-Hydridkomplex einleitet. Nach der Zugabe von Kronenethern erfolgt eine Hydridinsertion in den koordinierten Arenring unter Bildung eines Uran(IV)-Komplexes. Die in dieser Studie synthetisierten Urankomplexe wurden strukturell eindeutig charakterisiert und diese Arbeiten konnten erfolgreich in der Angewandten Chemie publiziert werden (Angew. Chem. 2014, 126, 7282–7285; Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 7154–7157).

Eine Tieftemperaturreduktion ($<-35\text{ °C}$) des dreiwertigen Uranmonoarenkomplexes $[{(^{Ad,Me}ArO)_3mes}U^{III}]$ in Gegenwart von Kaliumkugeln und einem leichten Überschuss an 2.2.2-Kryptanden liefert eine quantitative Umsetzung zu dem Uran(II)-

Monoarenkomplex $[\text{K}(2.2.2\text{-crypt})][\{\text{ArO}_3\text{mes}\}\text{U}^{\text{II}}]$. Die molekulare und elektronische Struktur des so erhaltenen U^{II} -Komplexes wurde experimentell durch Einkristall-Röntgenbeugung, temperaturabhängige $^1\text{H-NMR}$ - und X-Band-EPR-Spektroskopie, magnetische Messungen in Lösung und im Festkörper sowie optische Absorptionsspektroskopie bestimmt. Die elektronische Struktur dieses zweiwertigen Komplexes wurde des Weiteren durch DFT-Rechnungen untersucht. Diese Vielzahl an Hinweisen bestätigen, dass dieser Uran(II)-Monoarenkomplex eine $5f^1$ -Elektronenkonfiguration aufweist, unterstützt durch eine δ -Rückbindung, und dass die bei Raumtemperatur beobachtete, fast reversible Reduktion (-2.495 V gegenüber Fc/Fc^+) vornehmlich metallzentriert ist (Angew. Chem. 2014, 126, 7286–7290; Angew. Chem. Int. Ed. 2014, 53, 7158–7162).

Zusätzlich zu diesen Studien konnten definierte Uran(III)-Trichloridkomplexe mit ausreichender Löslichkeit in laborüblichen Lösemitteln dargestellt und charakterisiert werden. So lieferte die Reduktion von $[\text{UCl}_4]$ mit Magnesiumspänen $[\text{UCl}_3(\text{py})_4]$, das durch Umkristallisation aus Et_2O /Pyridin den dimeren Komplex $[\text{UCl}_3(\text{py})_4]_2$ bzw. aus n-Hexan/Pyridin den dreikernigen Komplex $[\text{UCl}(\text{py})_4(\mu\text{-Cl})_3\text{U}(\text{py})_2(\mu\text{-Cl})_3\text{UCl}_2(\text{py})_3]$ zugänglich macht (Chem. Commun. 2014, 50, 3962–3964). Diese Verbindungen könnten die Basis für neue Entwicklungen in der Uran(III)-Koordinationschemie legen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Fortführung beinhaltet die 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 $\text{U}^{\text{III-VI}}$ -Komplexen ausgehend von tacn-, mes- und N-basierter O-, N,O-, N,N- bzw. N_xO_y - sowie sterisch abgeschirmten, pyridin- bzw. aryloxidsubstituierten Liganden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vorträge:

Der Vortrag mit dem Titel From Nuclear Fuels to CO_2 Activation at Uranium Complexes – Chemistry Between Phobia & Enthusiasm wurde von Prof. Karsten Meyer zu GDCh- und Plenarvorträgen sowie in Anorganisch-Chemischen-Kolloquien gegeben: 8.4.2014, Department Chemie - Biologie, Universität Siegen, Siegen, DE und 5.–7.05.2014, CARISMA, Working Group and Management Committee meeting (CMST COST Action CM1205), Venice, IT

Uranium-Mediated Small Molecule Activation & a New Oxidation State in Uranium Chemistry, 44^{èmes} Journées des Actinides (JDA 2014) and 10th SPCA, 24.–29.4.2014, Ein-Gedi, Dead-Sea, IL

“New Developments in Uranium Coordination Chemistry & Small Molecule Activation at Reactive Uranium Complexes, Mini-Symposium in Organometallic Chemistry, University of Central Lancashire, 26.2.2014, Preston, UK.

Folgende Vorträge wurden von Mitarbeitern gegeben:

Henry S. La Pierre, Titel: Fundamental Paradigms of Structure and Reactivity in Uranium Coordination Complexes, University of Arizona, 7.–10.1.2014, Tucson, AZ, US.

Henry S. La Pierre, Titel: Fundamental Paradigms of Structure and Reactivity in Uranium Coordination Complexes, University of Wyoming, 12.–15.1.2014, Laramie, WY, US.

Dominik P. Halter, Titel: Structure and Reactivity of Uranium Monoarene Complexes Spanning the Oxidation States from U(II) to U(V), EUFEN-3 Conference, 12.–15.4.2014, Nürnberg, DE.

Christopher J. Hörger, Titel: Small Molecule Reactivity and Controlled Redox Chemistry with Uranium Coordination Complexes of a Sterically Demanding Aryloxy Ligand, First joint workshop on f-element chemistry, 28.–30.4.2014, Manchester, UK.

Dominik P. Halter, Titel: Uranium Monoarene Complexes Spanning U(II) to U(V), First joint workshop on f-element chemistry, 28.–30.4.2014, Manchester, UK.

Veröffentlichungen:

Reactivity of uranium(IV) bridged chalcogenido complexes $\text{U}^{\text{IV}}\text{-E-U}^{\text{IV}}$ (E = S, Se) with elemental sulfur and selenium: synthesis of polychalcogenido-bridged uranium complexes, S. M. Franke, F. W. Heinemann, K. Meyer, Chem. Sci. **2014**, 5, 942–950.

Well-defined molecular uranium(III) chloride complexes, H. S. La Pierre, F. W. Heinemann, K. Meyer, Chem. Commun. **2014**, 50, 3962–3964.

Coordination and Redox Isomerization in the Reduction of a Uranium(III) Monoarene Complex, H. S. La Pierre, H. Kameo, D. P. Halter, F. W. Heinemann, K. Meyer, Angew. Chem. **2014**, 126, 7282–7285; Angew. Chem. Int. Ed. **2014**, 53, 7154–7157.

Synthesis and Characterization of a Uranium(II) Monoarene Complex Supported by δ Backbonding, H. S. La Pierre, A. Scheurer, F. W. Heinemann, W. Hieringer, K. Meyer, Angew. Chem. **2014**, 126, 7286–7290; Angew. Chem. Int. Ed. **2014**, 53, 7158–7162.

Molecular and Electronic Structure of Dinuclear Uranium Bis- μ -Oxo Complexes with Diamond Core Structural Motifs, A.-C. Schmidt, F. W. Heinemann, W. W. Lukens, Jr., K. Meyer, J. Am. Chem. Soc. **2014**, 136, articles ASAP, dx.doi.org/10.1021/ja504528n.

Zuwendungsempfänger: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Seminarstr. 2, 69117 Heidelberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 020D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 353.376,00 EUR	Projektleiter: 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 Komplexierung von Cm(III) und Eu(III) mit dem im Arbeitskreis von Prof. Dr. P. Roesky (KIT-AC) hergestellten Bis-(N-p-Tolyltriazinoyl)pyridin (BTTP) Liganden wurde mittels TRLFS untersucht. Hierbei wurden in Cm(III) TRLFS Titrationsexperimenten neben der Solvensspezies zwei weitere Komplexspezies nachgewiesen, die durch Steigungsanalyse einem Cm(III)-BTTP 1:2 und 1:3 Komplex zugeordnet werden konnten. Aus der Speziesverteilung konnten folgende konditionelle Gleichgewichtskonstanten bestimmt werden: $\log \beta_2 = 11.1$ und $\log \beta_3 = 13.1$. Durch TRLFS Untersuchungen der Eu(III) Komplexierung wurden neben der Solvensspezies ein Eu(III)-Ligand 1:1 und 1:3 Komplex gefunden und folgende konditionelle Gleichgewichtskonstanten bestimmt: $\log \beta_1 = 3.4$ und $\log \beta_2 = 10.6$. Demnach ist die Gleichgewichtskonstante für die Bildung des Eu(BTTP)₃ Komplexes um 2.5 Größenordnungen geringer als die Gleichgewichtskonstante zur Bildung des Cm(BTTP)₃ Komplexes. Da nur wenige N-Donor Liganden des BTP-Typs eine so hohe Selektivität aufweisen, sind im nächsten Halbjahr Flüssig-flüssig Extraktionstests geplant (siehe 4. Geplante Weiterarbeiten). Eine gemeinsame Publikation mit dem Arbeitskreis von Prof. Roesky ist in Vorbereitung.

Ergänzend zu NMR Untersuchungen an Ln(III)- und Am(III)-iPr-BTP Komplexen (siehe NMR-Untersuchungen am KIT-INE, P. Kaden) wurde die Komplexierung von Cm(III) und Eu(III) mit ¹Pr-BTP mittels TRLFS unter-

sucht. Neben den Solvensspezies wurde jeweils eine weitere Komplexspezies nachgewiesen, die durch Steigungsanalyse den 1:3 M(III)-¹Pr-BTP Komplexen zugeordnet werden konnten. Aus der Speziesverteilung wurden $\log \beta_{3,\text{Cm(III)}} = 16.0$ und $\log \beta_{3,\text{Cm(III)}} = 14.5$ als Stabilitätskonstanten zur Bildung der 1:3 M(III)-¹Pr-BTP Komplexe bestimmt. Untersuchung der Säurestabilität des Cm(iPr-BTP)₃ Komplexes, Bestimmung weiterer thermodynamischer Konstanten sowie Flüssig-flüssig-Extraktionsexperimente mit ¹Pr-BTP sind für das nächste Halbjahr geplant (siehe 4. Geplante Weiterarbeiten).

Die Untersuchung der Lösungsmittelabhängigkeit der konditionellen Stabilitätskonstante zur Bildung des Cm(ⁿPr-BTP)₃ Komplexes wurde fortgesetzt und um die Untersuchung in H₂O:¹PrOH Lösungsmittelgemischen erweitert. Zudem wurden mit der Komplexierungsenthalpie, ΔH , und der Komplexierungsentropie, ΔS , sehr wichtige thermodynamische Konstanten durch Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Stabilitätskonstante ermittelt. Hierdurch konnten wertvolle Erkenntnisse über den Einfluss des Lösungsmittelgemisches auf Komplexierungsenthalpie und -entropie gewonnen werden. Eine Publikation ist in Vorbereitung.

4. Geplante Weiterarbeiten

In Ergänzung zu Komplexierungsstudien von Cm(III) und Eu(III) mit dem BTTP Liganden sollen sowohl die Säurestabilität der 1:3 Cm(III) und Eu(III) Komplexe mittels TRLFS als auch die Extraktionseigenschaften in Flüssig-flüssig Extraktionsexperimenten untersucht werden.

Für die Komplexierung von Cm(III) und Eu(III) mit ¹Pr-BTP sollen weitere thermodynamischen Daten durch TRLFS Experimente bei verschiedenen Temperaturen bestimmt werden. Des Weiteren sollen die Extraktionseigenschaften in Flüssig-flüssig Extraktionsexperimenten untersucht und dabei die Zusammensetzung von wässriger und organischer Phase systematisch variiert werden. Darüber hinaus sollen Untersuchungen zur Säurestabilität der 1:3 Cm(III) und Eu(III) Komplexe durchgeführt werden.

Bei der Untersuchung der Lösungsmittelabhängigkeit der konditionellen Stabilitätskonstante zur Bildung von Cm(ⁿPr-BTP)₃ sollen die Messungen bei mittlerem Wassergehalt reproduziert werden. Eine Publikation ist in Vorbereitung und soll zeitnahe eingereicht werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Publikationen:

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.* **2014**, 32(2), 119-137.

J. Kratsch, B. B. Beele, C. Koke, M. A. Denecke, A. Geist, P. J. Panak, P. W. Roesky, 6-(Tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridine: A Highly Selective Ligand for the Separation of Lanthanides(III) and Actinides(III), *Inorg. Chem.* **2014**, accepted, DOI 10.1021/ic5007549.

Vorträge:

B. B. Beele, A. Wilden, A. Skerencak-Frech, S. Lange, F. Sadowski, G. Modolo, A. Geist, P. J. Panak, *Modified Diglycolamides for Ln(III)/An(III) Co-Separation: A Complexation Study using TRLFS and Solvent Extraction*, European F-Element Network Research Conference, 14-15.04.2014, Nürnberg.

B. B. Beele, C. Adam, U. Müllich, A. Geist, P. J. Panak, *Synthesis and LIFDI-MS characterisation of ¹⁵N-labelled C5-BPP*, Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, 28-29.04.2014, Manchester, UK.

A. Bremer, A. Geist, P. J. Panak, *Influence of the solvent on the complexation of Cm(III) and Eu(III) with nPr-BTP studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy*, Joint Student Workshop on f-Element Chemistry, 28-29.04.2014, Manchester, UK.

P. J. Panak, *Complexation and Extraction of An(III) and Ln(III) with Water-soluble SO₃-Ph-BTBP*, 17th Radiochemical Conference, RadChem 2014, 11-16.05.2014, Mariánské Lázně, Tschechische Republik. (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*, 3rd ITU – INE Research Fellow Day, 06.02.2014, Karlsruhe.

A. Bremer, D. M. Whittaker, A. Geist, P. J. Panak, *Complexation of Cm(III) and Eu(III) with CyMe₄-BTBP and CyMe₄-BTPPh studied by time-resolved laser fluorescence spectroscopy*, 3rd ITU – INE Research Fellow Day, 06.02.2014, Karlsruhe.

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich		Förderkennzeichen: 02 NUK 020E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2012 bis 30.06.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 529.746,00 EUR	Projektleiter: Dr. Modolo	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Neue Liganden von der Uni Erlangen wurden getestet. Dabei zeigte ein Derivat des C5-BPP interessante Extraktionseigenschaften, die weiter untersucht werden sollen.
- AP2: Es wurden Komplexe von verschiedenen Lanthaniden mit kurzkettigen Diglycolamiden hergestellt und zur Kristallisation gebracht. Eine Masterarbeit zu diesem Thema wurde gestartet.
- AP3: Der im letzten Bericht beschriebene Prozesstest im Labormaßstab zur Trennung von Actiniden(III) von Lanthaniden(III) aus einer salpetersauren Feedlösung wurde weiter ausgewertet und die Ergebnisse auf einer Konferenz in Manchester (s. u.) vorgestellt. Der verwendete Ligand wurde an der Universität Chalmers auf seine Radiolysestabilität hin untersucht. Hierzu wurden Lösungen des Liganden mit Co-60 Gammastrahlung bestrahlt und die Zersetzungsprodukte mittels HPLC-HRMS identifiziert.
- AP4: Die quantitative Bestimmung der Ligandenkonzentration in den bestrahlten Proben war Teil einer Bachelorarbeit, die erfolgreich abgeschlossen wurde. Dazu wurde auch ein Aufenthalt an der Uni Chalmers, Göteborg, Schweden, realisiert. Steve Lange bearbeitet zurzeit eine Masterarbeit zur Entwicklung eines Prozesses zur selektiven Extraktion von dreiwertigen Actiniden.

4. Geplante Weiterarbeiten

In Kooperation mit der Uni Erlangen und KIT-IAC werden weitere neue Liganden auf ihre Extraktionseigenschaften hin untersucht.

Die Untersuchungen zur Komplexbildung modifizierter Diglycolamide und die strukturelle Aufklärung werden fortgesetzt. Dazu sind EXAFS Messungen und die Synthese und Einkristallstrukturaufklärung von Komplexen mit kurzkettigen Diglycolamiden vorgesehen.

Die Radiolysestudien werden in Zusammenarbeit mit der Universität Chalmers in Göteborg, Schweden fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Wilden et al., Sustainable Nuclear Energy Conference, Manchester, England, 9-11 April 2014, Poster und Proc.-Artikel

A. Wilden et al., Sustainable Nuclear Energy Conference, Manchester, England, 9-11 April 2014, Vortrag und Proc.-Artikel

A. Wilden et al., TALISMAN First Plenary Meeting, Marcoule, France, 19.-20.06.2014, eingeladener Vortrag

A. Wilden et al., 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning as well as Supramolecular, Intermolecular, Interaggregate Interactions, 07-09 July 2014, Bonn – Bad Godesberg, Germany, eingeladener Vortrag

M. Hupert, Abschluss der Bachelorarbeit

S. Lange, Abschluss der Masterarbeit (in Kürze)

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich		Förderkennzeichen: 02 NUK 021A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 919.706,00 EUR	Projektleiter: Dr. Neumeier	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: *Synthesen:* Die Syntheserouten zur Herstellung der Mischkristalle wurden weiter optimiert. Bezüglich der Phosphate wurde auf die Herstellung von Mischkristallen unterschiedlicher Morphologie und Mikrostruktur fokussiert. Im Besonderen wurde die Synthese von $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ mit Pyrochlorstruktur mittels isostatischen Heißpressens (HIP) optimiert. Mit Hilfe der Alkalichlorid-Fluss-Methode (Hochtemperatur-Methode) wurde eine Reihe von U-haltigen Phosphat- und Arsenat-Einkristallen synthetisiert.

Materialtransfer: Ausgewählte Materialien wurden hergestellt und an GUF-IFG, RWTH-GHI, RWTH-IFK und HZDR-IRO geliefert. Die Zusammensetzungen wurden jeweils auf die speziellen Anforderungen der Versuche angepasst.

AP2: Weiterführende Auswertung der Pulverdiffraktogramme der Nd_2O_3 - ZrO_2 Mischkristallreihe: Intensitätsabnahme der Überstrukturreflexe wurde mit dem Modell der effektiven Radienverhältnisse $r(A)/r(B)$ für den Übergang des stöchiometrischen Pyrochlores zu den nicht stöchiometrischen Zusammensetzungen korreliert. Charakterisierung von Pyrochloren und Defektfluoriten mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen über TEM zur Untersuchung des strukturellen Übergangs. Für die Pu-haltigen Pyrochlore wird z. Zt. ein Strukturmodell erstellt, mit dessen Hilfe die geplanten EXAFS Messungen an der ANKA Beamline gefittet werden können.

Die Charakterisierung (XRD, REM/EDX, Raman) der Syntheseprodukte wird fortgesetzt. In Zusammenarbeit mit dem HZDR-IRO wurden TRLFS-Messungen an einer Eu dotierten Mischkristallreihe, $(\text{La,Gd})\text{PO}_4$ und an reinen Endgliedern LnPO_4 ($\text{Ln} = \text{La, Gd, Sm, Dy, Pr, Tb}$) sowie weitere EXAFS-Messungen an der ESRF an ausgewählten Verbindungen einer $(\text{La,Lu,Eu})\text{PO}_4$ -Reihe durchgeführt. Zusätzlich wurden EXAFS- und Raman-Messungen an $(\text{Sm,Tb})\text{PO}_4$ -Mischkristallen durchgeführt, um Nahordnungsphänomene der Metallionen abzuleiten.

Mit Hilfe des aus Projektmitteln finanzierten Einkristalldiffraktometers wurden neue Strukturen von U-haltigen Phosphaten und Arsenaten, die mittels einer Hochtemperatur-Synthese hergestellt wurden.

Über ab initio Berechnungen wurde der Wechselwirkungsparameter und die daraus resultierende Überschussenthalpie für Monazit-Mischkristalle berechnet. Aus DFT+U Berechnungen konnte die Temperatur für einen Phasentübergang von einem geordneten zu einem fehlgeordneten Zustand bestimmt werden.

- AP3: Brenk Systemplanung GmbH hat im Auftrag des IEK-6 bis Ende Juli 2014 eine Tabelle mit thermodynamischen Daten (Gleichgewichtskonstanten bei unterschiedlichen Temperaturen, Reaktionsenthalpien usw.) für diverse Monazite bzw. Rhabdophane zusammengestellt. Weiterhin wurden erste geochemische Modellrechnungen (mittels Geochemist's Workbench) mit ausgewählten thermodynamischen Daten zur Untersuchung der Monazitauflösung durchgeführt.
- AP4: Die Untersuchungen der dynamischen Aspekte des Sinterprozesses von $\text{La}_{0.5}\text{Eu}_{0.5}\text{PO}_4$, wurden mittels In-situ-Hochtemperatur-REM am ICSM in Marcoule, FR fortgesetzt. Im Besonderen wurde der Einfluss von Waschstufen auf die Pulveragglomeration und die Morphologie der Pellets untersucht.
- AP5: Weiterführende Arbeiten zur mikroskopischen Betrachtungen der Auflösung von $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Pyrochlorpellets mittels REM. Neu ist die Charakterisierung der Probe über GI-XRD zur Identifikation von potentiellen Sekundärphasen (in Kooperation mit ICSM, FR). Die mikroskopische Betrachtung der Auflösung von Pyrochlor mit Weißlichtinterferometrie (VSI) in Kooperation mit der Universität Bremen wurde ebenfalls fortgeführt. Die Entfernung vom thermodynamischen Gleichgewicht wurde über GEMS-PSI berechnet. Dynamische Auflösungsexperimente wurden an definierten LaPO_4 -Pulvern (Hydrothermalsynthese; pH = 1) begonnen, um der Einfluss von Temperatur und pH auf das Auflösungsverhalten zu untersuchen.
- AP6: Die Ergebnisse wurden in Artikeln veröffentlicht oder sind zur Veröffentlichung eingereicht. Des Weiteren wurden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen in Vorträgen und Postern vorgestellt (s. Pkt. 5).

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Synthese von $\text{Nd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Defektfluorit soll ebenfalls über isostatisches Heißpressen erfolgen. Gemeinsam mit dem RWTH-IFK sollen Phosphat-Einkristalle für strukturelle Untersuchungen hergestellt werden.
- AP2: Die Charakterisierung (XRD, REM/EDX, Raman) der Syntheseprodukte wird fortgesetzt. TRIFS und weitere EXAFS-Messungen sind mit dem HZDR-IRO vorgesehen. Die Untersuchungen zu Ordnungs-Unordnungsphänomenen mittels FIB und TEM in Abhängigkeit des Nd/Zr Verhältnisses bei Nd_2O_3 - ZrO_2 werden fortgeführt. Zusätzlich soll ein weiterführendes Verständnis der Ordnungs-Unordnungsphänomene durch Unterstützung der experimentellen Daten mittels Modellierung erlangt werden. Für die U und Th Phosphate und Arsenate sind Raman und IR Messungen vorgesehen. Es soll die Bildungsenergie von Defekten in der Pyrochlorstruktur bestimmt werden, um die enorme Toleranz gegenüber Strahlenschäden zu untersuchen. Des Weiteren soll die „Verlagerungsschwelle“ (threshold displacement energy) bestimmt werden.
- AP3: Bis Ende 2014 sind weitere geochemische Modellrechnungen der Brenk Systemplanung GmbH mittels Geochemist's Workbench zur Untersuchung der Monazitauflösung geplant (z. B. mit La-Monazit, Sm-Monazit, Nd-Monazit und unterschiedlichen Wasserzusammensetzungen), wobei auch Rhabdophan-Phasen berücksichtigt werden sollen. Weiterhin wird die thermodynamische Datenbasis weiter vervollständigt.
- AP4: Die In-situ-HT-REM Untersuchung des Sinterverhaltens für Pulver mit nadelförmigen Partikeln sind in Zusammenarbeit mit dem ICSM, Marcoule geplant.
- AP5: Statische und dynamische Auflösungsexperimente an Pulvern und Pellets der Phosphat-Mischkristallreihen sind bereits in Vorbereitung.
- AP6: Die Ergebnisse werden gemeinsam mit Projektpartnern auf verschiedenen Konferenzen präsentiert und zur Veröffentlichung eingereicht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Zeitschriftenbeiträge:

Finkeldei et al.: Appl. Geochem., 2014, in press. // Li et al.: Solid State Chem. 2014, submitted // Romero et al.: J. Comput. Chem. 2014, 35, 1339–1346 // Yu et al.: Solid State Chem., 2014, 215, 152-159

Vorträge:

Arinicheva et al.: BMBF meeting, Grenoble, France, 27.-28.02.2014 // Bukaemskiy et al.: CIMTEC2014, Montecatini Terme, Italien, 15.–19.06.2014 // Bukaemskiy et al.: BMBF meeting, Grenoble, France, 27.-28.02.2014 // Heuser et al.: BMBF meeting, Grenoble, France, 27.-28.02.2014 // Neumeier et al.: ICACC2014 Conference, Daytona Beach, USA, 27.-31.01.2014 // Neumeier et al.: Institutsseminar, Institut für Ressourcenökologie, HZDR, Dresden, 28.03.2014 // Neumeier et al.: Radchem 2014, Marianske Lazne, 11.-16.05.2014

Neumeier et al.: BMBF meeting, Grenoble, France, 27.-28.02.2014 // Brandt et al.: REDUPP meeting, Stockholm, Schweden, 18. – 21.02.2014 // Kowalski et al.: BMBF meeting in Grenoble, France, 27.-28.02.2014 // Li et al.: BMBF meeting in Grenoble, France, 27.-28.02.2014 // Lozano-Rodriguez et al.: Actinide XAS workshop, PSI, Böttstein, Schweiz, 20.-22.05.2014 // Thust et al.: DGK 2014, Berlin, 16.-20.03.2014

Beridze et al.: CECAM workshop, Lugano, Switzerland, 26.-28.05.2014 // Beridze et al.: NIC Symposium, Jülich, 12./13.02.2014 // Li et al.: CECAM workshop, Lugano, Switzerland, 26.-28.05.2014 // Li et al.: COSIRES - Computer Simulation of Radiation Effects in Solids, Alicante, Spain, 08.-13.06.2014 // Yu et al.: DGK 2014, Berlin, 16.-20.03.2014, Das Poster wurde mit dem Best Poster Award ausgezeichnet.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 021B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 394.874,00 EUR	Projektleiter: Dr. Scheinost	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP2: Strukturelle Charakterisierung

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):

- XAS-Messung des $\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x\text{PO}_4$ -Systems an den Sm L_3 und Tb L_1 -Kanten, um den Übergang von der Monazit- zur Xenotim-Struktur zu untersuchen. Bis zu 85 % Tb bleibt die Xenotim-Struktur erhalten, dann Übergang zur Monazitstruktur (29.01.-01.02.).
- Durchführung des Conditioning-Meetings in Grenoble (27.-28.02.)
- XAS-Messung des $\text{Lu}_{0.7-x}\text{La}_x\text{Eu}_{0.3}\text{PO}_4$ -Systems an den Eu- und Lu- L_3 Kanten (11.-12.06.)
- Gleichzeitig erster Test des neuen SDD-Detektors erfolgreich (11.-12.06.)

4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):

Durchführung weiterer XAFS-Messungen im System Luthetium-Lanthan-Europium mit einem Übergang von Monazit- zu Xenotim-Struktur an den Lu und Eu- L_{III} und La- L_I -Kanten und Datenauswertung der EXAFS-Spektren simultan an beiden Absorptionskanten.

Durchführung der ersten XAFS-Messungen in Eu- und ^{248}Cm -gedopten Lanthan-Gadolinium-Phosphaten mit einem möglichen Übergang von Monazit- zu Xenotim-Struktur an den Ln- L_{III} , Eu- L_{III} , Gd- L_I und Cm- L_{III} -Kanten (Herbst 2014, Stefan Neumeier, FZ-Jülich).

Teilnahme an der 8th EUROPEAN SUMMER SCHOOL ON SUPRAMOLECULAR, INTERMOLECULAR, INTERAGGREGATE INTERACTIONS AND SEPARATION CHEMISTRY in Bonn, mit einem Poster zur EXAFS-Technik (J. Lozano-Rodriguez, 7.-9.07.)

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag bei Actinide-XAS, Boetzstein (CH), 20.-22.05.2014: Janeth Lozano-Rodriguez „Monazite as promising candidates for nuclear waste management: Structural characterization by X-ray Absorption Spectroscopy“

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 021C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 322.755,00 EUR	Projektleiter: Prof. 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

Bearbeitung des Programmpaketes AP-2 (Strukturelle Charakterisierung mit TRLFS)

- Literaturstudie zu Lanthanidphosphatphasen beendet.
- Bestellung eines Detektionssystems und einer CCD-Kamera für Cm³⁺-Direktanregung.
- Site-selektive TRLFS Messungen von Eu³⁺-dotierten Lanthanidphosphaten (LnP04) wurden durchgeführt. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass Eu³⁺ in LnP04-Phasen mit Monazit Struktur eingebaut wird, unabhängig von der Größe des "host" Lanthanidions. LnP04-Phasen mit Xenotimstruktur, zeigen hingegen viel geringeren Eu³⁺-Einbau im Kristallgitter. Das heißt, die Struktur der Mineralphase spielt scheinbar eine große Rolle für den Einbaumechanismus dreiwertiger Fremdionen. Mit einem unvollständigen Einbau von Fremdionen, sind die Xenotimphasen weniger zur Immobilisierung langlebiger Actiniden geeignet als Monazitphasen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung des Programmpaketes AP-2 (Strukturelle Charakterisierung mit TRLFS)

- Aufbau des Detektionssystems und der CCD-Kamera.
- Weiterführende TRLFS-Untersuchungen an Eu³⁺-dotierten Monaziten zur Aufklärung des Einflusses des Ionenradius des Wirtskations auf den Einbau von Eu³⁺.
- Weitere TRLFS Untersuchungen von Eu³⁺-dotierten Xenotimphasen mit Wirtskationen ähnlicher Größe wie Eu³⁺.
- Synthese und TRLFS Messungen von Monazitproben mit höherer Eu³⁺-Dotierung, um direkten Vergleich mit EXAFS-Proben zu ermöglichen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Huittinen, N. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 05.06.2014.

Huittinen, N. et al. Goldschmidt, Sacramento, CA, 08-13.06.2014.

Huittinen, N. et al. BMBF "Conditioning" Sommerschule, Bonn/Bad Godesberg, 07.-09.07.2014

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		Förderkennzeichen: 02 NUK 021D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langle- biger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 336.612,00 EUR	Projektleiter: 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

Die durch das FZJ-IEK6 mittels Präzipitation synthetisierten LaPO_4 -Pulver wurden zunächst kalziniert um die Hydratphase Rhabdophan durch die erwünschte Monazit-Phase zu ersetzen. Zur Ermittlung der geeigneten Kalziniertemperatur wurde dazu eine Röntgenbeugungsanalyse mit Messungen in 50 K-Intervallen zwischen 450 und 900 °C in einer Hochtemperaturkammer (HTK-XRD) durchgeführt. Hintergrund ist dabei der Einsatz möglichst niedriger Temperaturen, um einen unnötigen Verlust von Triebkräften zu vermeiden, welche für den späteren Sinterprozess zu hohen Enddichten erforderlich sind. Während der HTK-XRD wurde die Bildung der zusätzlichen Hydratphase $\text{LaH}_3(\text{PO}_4)_5$ ab ca. 700 °C beobachtet. Ferner wurden Pulverproben mittels DTA-TG-Analyse und Dilatometrie charakterisiert. Eine anschließende mathematische Korrektur und Ableitung der Dilatometerkurven lieferten Temperaturangaben über Beginn der Schwindung und maximale Schwindung. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Sinterkurven hinsichtlich Heizraten, Haltezeiten und Maximaltemperatur angepasst.

Das kalzinierte Pulver wurde gemahlen und auf eine Korngröße $< 45\mu\text{m}$ gesiebt. Die uniaxial gepresst und drucklos gesinterten Probekörper wurden gemäß des oben erwähnten angepassten Sinterprofils wärmebehandelt. Die Dichtemessung erfolgte nach archimedischem Prinzip und ergab eine Verringerung der offenen Porosität im Vergleich zu den zuvor verwendeten Sinterprogrammen. Die anschließenden Analysen am Rasterelektronenmikroskop zeigten nach wie vor die feinere Mikrostruktur an den Randzonen. Zudem ist weiterhin ein Anteil an geschlossener Porosität erkennbar. Parallel wurde eine Charge des kalzinierten Pulvers vor der Formgebung hinsichtlich einer besseren Verpressbarkeit mit organischen Additiven versetzt. Die Sinterung und Charakterisierung dieser Proben steht noch aus. Beim dritten Verbundprojekttreffen im Februar wurden die aktuell generierten Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Das Treffen diente ferner einem intensiven Erfahrungsaustausch und der weiteren Kooperation.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die mit organischen Additiven versetzten Probekörper werden gesintert und hinsichtlich Dichte und Mikrostruktur analysiert. Ferner wird die Bildung der weiteren Hydratphase genauer untersucht, um ein einphasiges Endprodukt garantieren zu können.

CePO_4 -Pulver von Alfa Aesar wird im Dilatometer und mittels Röntgenbeugungsanalyse charakterisiert. Daraufaufgehend wird ein geeignetes Sinterprofil für das Material erstellt und die Dichte und das Gefüge der wärmebehandelten Proben untersucht.

Das vierte Verbundprojekttreffen im Oktober in Fulda soll für einen direkten Austausch, Diskussion der bisherigen Ergebnisse und der weiteren Vorgehensweise genutzt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Es werden auf der Konferenz „International Conference of Sintering“ in Dresden vom 24.-28.8.2014 ein Poster mit dem Titel „Sintering and microstructure characterisation of monazite (REPO_4 , with RE = La, Ce, Pr)“, (Autoren: A. Wätjen (Sp), C. Schausten, R. Telle, RWTH Aachen University (Germany); Y. Arinicheva, Forschungszentrum Jülich GmbH in the Helmholtz Association (Germany); A. Hirsch, RWTH Aachen University (Germany)) sowie auf der Konferenz „MSE“ in Darmstadt vom 23.-25.9.2014 ein Vortrag mit dem Titel „Investigation of the Sintering Behaviour of Rare Earth Phosphates REPO_4 (with RE = La, Ce, Pr)“, (Autoren: A. Wätjen (Sp), C. Schausten, R. Telle, RWTH Aachen University (Germany); Y. Arinicheva, S. Neumeier, Forschungszentrum Jülich GmbH in the Helmholtz Association (Germany); A. Hirsch, G. Roth, RWTH Aachen University (Germany)) präsentiert.

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Temp- lergraben 55, 52062 Aachen		Förderkennzeichen: 02 NUK 021E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langle- biger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 223.380,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Roth	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

Am Institut für Kristallographie der RWTH Aachen sollen im Rahmen des Projektes vordergründig Einkristalle der Lanthanoidmonazite hergestellt und untersucht werden. Dies wird in Kooperation vor allem mit dem Forschungszentrum Jülich (Teilprojekt A), dem RWTH-GHI (Teilprojekt D) sowie der Goethe-Universität Frankfurt am Main (Teilprojekt F) erfolgen.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Mischkristallreihe der Monazitzusammensetzung $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ wurde im ersten Halbjahr 2014 in Zusammenarbeit mit der Goethe-Universität Frankfurt (Teilprojekt F) mittels Raman-Messungen charakterisiert. Die Auswertung der Messergebnisse ist noch nicht abgeschlossen. Pulverproben der Mischkristallreihe $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ wurden im Januar 2014 während einer Strahlzeit der Goethe-Universität an PETRA III (DESY, Hamburg) mittels Synchrotronmessungen charakterisiert. Die gewonnenen Daten lassen Aussagen zum Verhalten der Gitterparameter im Allgemeinen und zu den Bindungslängen im Besonderen zu. Es stellte sich heraus, dass mit steigendem Pr-Gehalt die Ln -O-Bindungen kürzer werden.

Es wurden Vorversuche für die Einkristallzüchtung in der Mischreihe $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ durchgeführt, um die Parameter (Temperatur, Abkühlraten etc.) zu optimieren. Für weitere Zuchtversuche befindet sich neues Ausgangsmaterial in der Produktion.

Es wurde versucht, eine Mischkristallreihe der Zusammensetzung $(\text{La,Tb})\text{PO}_4$ zu synthetisieren, um die strukturelle Stabilität des Monazits beim Einbau kleinerer Kationen (hier Tb) zu untersuchen. Die Endglieder konnten phasenrein hergestellt werden, wobei LaPO_4 den Monazit- und TbPO_4 den Xenotim-Strukturtyp aufweist. Mischkristalle konnten bisher nicht phasenrein hergestellt werden; weitere Versuche zur Optimierung der Synthesbedingungen sind im Gange.

Ein Publikationsentwurf wird um die Ergebnisse aus den Raman-Messungen erweitert und voraussichtlich Ende 2014 eingereicht.

Bei einem Gruppentreffen in Grenoble wurden die Ergebnisse innerhalb der Projektpartner vorgestellt. Auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Kristallografie (DGK) wurde ein Vortrag über die Mischkristallreihe $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ gehalten. Die Mischkristallreihe $\text{La}_x\text{Sr}_{1-0.5x}\text{Ce}_{1-0.5x}\text{PO}_4$ wurde auf der DGK und auf der internationalen Goldschmidt-Tagung in Sacramento (USA) durch einen Posterbeitrag präsentiert.

Es wurde an der internationalen Rietveld Refinement School in Durham (UK) teilgenommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Publikation zum Thema $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ soll fertiggestellt werden.

Die Züchtung der Einkristalle soll optimiert werden, sodass auch Kristalle der Mischkristallreihe vorliegen.

Pulverproben zum Einbau von Tb in LaPO_4 sollen einphasig synthetisiert werden.

Im Juli 2014 wird eine Summer School in Bonn und ein Workshop in Hamburg (beides zum Thema Radionuklide, Actinoidenchemie u.ä.) besucht. Im August werden die Ergebnisse der $(\text{La,Pr})\text{PO}_4$ -Mischkristallreihe auf der Tagung der IUCr in Montréal (CA) präsentiert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

2 Abstracts für die DGK-Tagung, Berlin (1 Vortrag, 1 Poster)

1 Abstract für die Goldschmidt-Tagung, Sacramento, USA (1 Poster)

Eingereicht: 1 Abstract für die IUCr-Tagung, Montreal, Kanada (1 Poster)

Eingereicht: 1 Abstract für die Summer School in Bonn (1 Poster)

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main		Förderkennzeichen: 02 NUK 021F
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 238.092,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Winkler	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist es, ein Verständnis des Langzeitverhaltens von Radionukliden in keramischen Endlagermatrices unter endlagerrelevanten Bedingungen abzuleiten. Im Frankfurter Teilprojekt sollen strukturelle und physikalische Charakterisierungen von Keramiken und Kristallen vorgenommen werden.

Dazu sollen verschiedene experimentelle Techniken zum Einsatz kommen:

(a) Bestimmung von elastischen Eigenschaften bei Temperaturen bis 1600 K durch resonante Ultraschallspektroskopie (RUS), (b) Messung thermodynamischer Größen durch Mikrokalorimetrie, (c) Bestimmung der thermischen Ausdehnung durch Dilatometrie im Temperaturbereich von 100 K bis 1700 K, (d) in situ RUS Messungen während der Bestrahlung mit relativistischen Schwerionen an der GSI (Darmstadt), (e) strukturelle Charakterisierungen mit Röntgen- und Neutronendiffraktionsmessungen an Großforschungseinrichtungen (PETRA III, ESRF, APS, LANSCE). Die Experimente sollen durch atomistische Modellrechnungen auf DFT-Basis ergänzt werden, um ein besseres Verständnis der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zu erhalten.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde weiter an der Charakterisierung von Keramikproben verschiedenster Zusammensetzungen gearbeitet. Die Untersuchung dieser Proben mittels Ultraschallmessungen konnten noch nicht zufriedenstellend abgeschlossen werden, da weiterhin keine auswertbaren Signale gemessen werden konnten. Das Vorliegen eines technischen Fehlers konnten wir definitiv ausschließen, und stattdessen ist es nun offensichtlich, dass die Probenherstellung und die daraus resultierenden Mikrostrukturen kritisch sind. Wir konnten somit zeigen, dass Ultraschallspektroskopie eine empfindliche Methode zur Charakterisierung der strukturellen Integrität von Keramikproben ist. Um die Keramiken mikro-strukturell zu untersuchen wurden REM-Messungen in Zusammenarbeit mit den Partnern in Jülich sowie an der Goethe Universität Frankfurt durchgeführt. Die Messungen der Wärmekapazitäten wurden weiter fortgeführt und sind für die Keramikpellets weitestgehend abgeschlossen. Im März wurden Keramiken an dem von der GSI betriebenen Schwerionensynchrotron mit schweren relativistischen Ionen bestrahlt um Strahlenschäden zu induzieren. Die Datenauswertung wurde begonnen. Dilatometrie-Messungen wurden für den Temperaturbereich bis 500 °C abgeschlossen. Es konnten Unterschiede in der thermischen Ausdehnung zwischen heißgepressten und nachgesinterten Proben festgestellt werden. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner RWTH-Aachen wurden Ramanspektren von (La, Pr)PO₄-Pulvern gemessen. Leider konnten entsprechende Keramiken durch die Projektpartner bis heute nicht hergestellt werden. Die Raman-Spektren werden zurzeit ausgewertet. Es wurden zwei Beiträge auf der DGK-Jahrestagung präsentiert. Zusätzlich wurde ein Beitrag zur MSE in Darmstadt eingereicht und dort als Vortrag akzeptiert. Ein Entwurf einer Veröffentlichung über die physikalischen Eigenschaften der (La,Eu)PO₄-Proben wurde im Berichtszeitraum fertiggestellt. Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen werden zurzeit mit Ergebnissen von in Jülich durchgeführten Computersimulationen verglichen. Frau Thust hat darüber hinaus einen Beitrag für die 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning verfasst und Zeit in die Planung des nächsten Projekttreffens investiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden wie geplant weiter durchgeführt. Im Juli, August und September werden REM-Messungen in Jülich und Frankfurt stattfinden. Zusätzlich sollen polierte Dünnschliffe für Polarisationsmikroskopie hergestellt werden. Die Untersuchung der bestrahlten Proben beginnt im Juli durch REM-Messungen und wird in der zweiten Jahreshälfte fortgesetzt. Die erste Veröffentlichung zu Strahlenschädigung wird im August eingereicht. Die Veröffentlichung zu den physikalischen Eigenschaften der Keramiken wird im 2. Halbjahr fertiggestellt. Konferenzbeiträge werden im Juli (Summer School) und im September (MSE) präsentiert. Weitere Messungen in den nächsten Monaten hängen von der Lieferung von neuen Proben von den Projektpartnern ab.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Thust et al.: Mechanical and physical properties of monazite-type ceramics La_(1-x)Eu_(x)PO₄. DGK (Abstract, Poster)

Thust et al.: Plane wave parallel plate ultrasound spectroscopy on ceramic pellets. 7.-9. Juli 2014, 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning as well as Supramolecular, Intermolecular, Interaggregate Interactions (Abstract, Poster).

Thust et al.: Mechanical and Physical Properties of (La,Eu)PO₄ Ceramics - A Promising Waste form for Radioactive Waste. MSE Darmstadt, September 2014 (Abstract, Vortrag)

Hirsch et al.: Synthesis and characterisation of (La,Pr) monazite solid solution series. DGK (Abstract, Vortrag)

Hirsch et al.: Synthesis and characterisation of (La,Pr) monazite solid solution series. IUCr Montreal, August 2014 (Abstract, Poster)

Zuwendungsempfänger: Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		Förderkennzeichen: 02 NUK 021G
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 231.108,00 EUR	Projektleiter: 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

An dem in Apatiten und LDH Phasen eingebauten Iod wurden EXAFS-Messungen durchgeführt und inzwischen vollständig ausgewertet. Eine Veröffentlichung ist in Vorbereitung.

Am LDH wurden Auslaugungs Experimente durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass nach ca. 14 Tagen in Milli-Q nur noch 40 % des Iodat in der LDH Phase verbleiben. In Salzlösung ist die Auslaugung schon nach einem Tag auf diesem Niveau. Nach 31 Tagen in Milli-Q, verbleibt nur noch 10 % des Iodats in LDH. Die thermische Stabilität der I-LDH Phasen ist gering, da das Iod eher schwach in dem Zwischenraum durch Wasserstoffbrückenbindungen und van der Waals-Wechselwirkungen gebunden ist und beide bei relativ niedriger Temperatur in hohem Maße freigesetzt werden.

Eine Pulikation der LDH Arbeiten ist fast fertig und soll in der Zeitschrift Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry innerhalb der nächsten 2 Monate publiziert werden.

Mit Iodat-Apatiten wurden statische Auslaugungsexperimente durchgeführt. Apatit setzt in den ersten Tagen in MilliQ Wasser wenig Iodat frei und stabilisiert sich dann auf einem zurückgehaltenen Niveau von ca 95 %. Laugung in Kochsalzlösung sowie dynamische Auslaugungs-Experimente sollen am Forschungszentrums Jülich, die mit den notwendigen Geräten ausgestattet sind, durchgeführt werden. Die dynamischen Auslaugungs-Experimente selbst sind sehr wichtig, um die Bedingungen, die in einem potentiellen Endlager für radioaktive Abfälle eintreten können zu simulieren.

Für nachfolgend geplante Arbeiten zur Immobilisierung von Technetium wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, um Experimente mit einer geeigneten Matrix zu planen.

Die im ersten Jahr des Projekts erzielten Versuchsergebnisse wurden auf dem dritten Projekt-treffen, das in Grenoble, Frankreich am 27.-28. Februar stattgefunden hat vorgestellt. Präsentation auf der Konferenz RadChem, 11-16. Mai 2014, Marienbad, Tschechische Republik wurde "Immobilisierung von langlebigen Jod nach der Einarbeitung in Apatit und geschichteten Doppelhydroxids Matrizen".

Ein Experiment-Bericht über Arbeiten an der Rossendorf Beamline an der ESRF wurde erstellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Als Vorbereitung für die nachfolgenden Arbeiten mit Tc sollen Testexperimente mit Perrhenat (ReO_4^-) zum Einbau in Apatit und LDH durchgeführt werden. Perrhenat wird hier als Analogon zu Pertechnetat verwendet ($^{99}\text{TcO}_4^-$), eines der flüchtigen und sehr mobilen Spaltprodukte mit einer langen Halbwertszeit ($t_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ Jahre).

Die Matrizenherstellung und die Beladung mit Rh werden in Hannover durchgeführt, die Beladung mit Tc erfolgt dann im Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf.

Dynamische Auslaugungs-Experimente sind ebenfalls geplant. Die erhaltenen Ergebnisse werden auf dem folgenden Projekt-treffen am 9. sowie auf der Konferenz „Materials Science & Technology 2014“ in Pittsburgh, PA, USA im Rahmen eines eingeladenen Vortrags präsentiert.

Eine Publikation zu den Apatitarbeiten wird fertig gestellt und eingereicht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Ein Experiment-Bericht über Arbeiten an der Rossendorf Beamline an der ESRF wurde erstellt.

Zwei weitere Veröffentlichungen sind in Vorbereitung (s. o.)

2.3 Strahlenforschung

Zuwendungsempfänger: Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 003A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2008 bis 31.07.2014		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 572.506,00 EUR		Projektleiter: 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 an 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: Um die Relevanz der Telomerverkürzung für Alterung und Hautkrebsentstehung zu verifizieren, haben wir Hautbiopsien von zwei Körperstellen (Gesäß und Hals/Schulter Region) bezüglich der Telomerlänge in der Epidermis und Dermis untersucht. Hierbei zeigten die dermalen Fibroblasten prinzipiell längere Telomere als die epidermalen Keratinozyten. Bezüglich Telomerverkürzung war in den HS Keratinozyten gegenüber den Gesäß Keratinozyten eine Alters-abhängige Verkürzung nachweisbar, was für eine kumulative UV Schädigung spricht. In den Fibroblasten war eine solche Verkürzung eher vernachlässigbar. Interessanterweise kam es bei Auftrennung nach Geschlecht zu einer wesentlich klareren Alters-abhängigen Telomerverkürzung in den Keratinozyten der HS Haut der männlichen Probanden. D. h. die potenzielle Schädigung durch UV Strahlung scheint sich wesentlich auf die Epidermis zu beschränken. Ob die Gender-spezifischen Unterschiede durch unterschiedliche Prädisposition oder Freizeitverhalten bedingt ist, ist derzeit noch unklar.

- 2.2: Weitere Analysen zu Mechanismus der Rolle von UV-bedingten Telomerverkürzung wurden durchgeführt. Zur weiteren Analyse der epigenetischen Regulation der Telomerlänge und Telomeraggregate durch Bestrahlung wurden weitere Bestrahlungsexperimente durchgeführt:
- HaCaT Zellen bestrahlt mit 24 J/cm² UVA mit und ohne Vorbehandlung mit GSH (Glutathion), um die Rolle von ROS in diesem Szenario zu ermitteln. Alle Proben wurden nach 48 geerntet und für die PCR bzw. Q-FISH Analyse aufgearbeitet.
 - HaCaT Zellen bestrahlt mit 24 J/cm², die nach 24 und 48 h geerntet wurden und derzeit für CHIP Analysen für HP1 β und H3K9ac (Heterochromatin Marker), RPA (Einzelstrangbruch Marker), aufgearbeitet werden.
 - Keratinozyten bestrahlt mit 24 J/cm² für die gleichen Analysen wie oben.
- 2.4: Um die Konsequenzen der UVA Bestrahlung für die dermalen Fibroblasten zu untersuchen, wurde auch dermale Äquivalente (auf Basis von cell-derived Matrix) für 4 Wochen 3x wöchentlich bestrahlt. Diese chronische Bestrahlung wurde nun in einem Dosisexperiment (2 – 12 J/cm² Einzeldosis) untersucht. Interessanterweise war bis 6J/cm² nur wenig Vitalitätsverlust zu beobachten. Ab 8 J/cm² stieg der Vitalitätsverlust signifikant an und lag bei 12 J/cm² bei 52 %. Die Analysen zur Telomerverkürzung sind derzeit in Bearbeitung.
- 2.5: Das Wiederholungsexperiment: Bestrahlung der OTKs mit IRA in Kooperation mit AG Krutmann (Düsseldorf) wurde inzwischen durchgeführt. Die Auswertung steht derzeit noch aus. Für das erste Experiment (IRA Bestrahlung 860 J/cm²) wurden noch weitere Auswertungen angeschlossen. Hierbei zeigte sich, dass IRA in den Keratinozyten in OTKs keine Proliferation induziert. Wurden die Kulturen jedoch zuvor mit UVA bestrahlt, kam es bei nachfolgender IRA Bestrahlung zur Proliferationsinduktion. In Kollaboration mit Buxtehude wurde auch die DNA Schädigung (Bildung von CPDs (Cyclobutan Dimere) untersucht. Offensichtlich kann IRA keine CPDs induzieren. Ebenso konnten auch keine p53BP1 Damage Foci nachgewiesen werden, d. h. IRA führt im OTK Modell offensichtlich nicht zur DNA Schädigung.

4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.1: Weitere Untersuchungen zum Mechanismus der TA Entstehung/epigenetischen Regulation stehen an. Des Weiteren werden Untersuchungen zur Telomerverkürzung in den dermalen Äquivalenten und IRA-bestrahlten OTKs durchgeführt
- 2.2: Auswertung der oben angeführten Experimente mit UVA bestrahlten HaCaT Zellen (+/-GSK) und normalen Keratinozyten
- 2.3: Weitere Auswertungen der Bestrahlungsexperimente (OTK Versuche), speziell auch des Experimentes mit chronischer Bestrahlung und der IRA Bestrahlung:
- frühe und andauernde Schädigung in der Epidermis – Doppelstrangbrüche – dysfunktionelle Telomere, Damage response (p53BP1 Damage Foci), Telomerase Expression – hTERT Färbung
 - frühe und andauernde Schädigung im dermalen Äquivalent (Fibroblastenzahl, Kollagen Degradation (MMP1 Induktion, Gelatinase Assay), aberrante Genexpression
- 2.4: Durchführung und Auswertung eines neuen Bestrahlungsexperiments – chronische Bestrahlung (3x/Woche für 4 Wochen) von Hautäquivalenten auf cell-derived Matrix, mit UVA plus UVB zur Verifizierung der Befunde mit Scaffold-basierten OTKs
- 2.5: Auswertung des zweiten IRA Bestrahlungsexperiments

5. Berichte, Veröffentlichungen

Einladung als Festredner zur 34. Alfred-Marchionini-Gedächtnisvorlesung: Was macht die Sonne mit unserer Haut? – Hautkrebs und Photolterung, Hamburg, 1.2.2014

Einladung zum Konferenzvortrag bei der "Singapore International Conference on Skin Research": Long-term culture of scaffold-dependent skin models: The niche determines stem cell maintenance and function, Singapore 3.3.2014

Einladung zum Seminarvortrag an der Universität Tübingen: Die Nische/Mikroumgebung als Garant für Erhalt und Funktion epidermaler Stammzellen, Tübingen 30.4.2014

Bauer S, Stark H-J, Kollar J, Busch H, Börries M, Weber S, Leufke C, Pavez Lorie E, Bickenbach JR, and Boukamp P. TGF β -dependent fibroblasts transdifferentiation link a chondrogenic profile to photoaging (external skin aging), Manuskript in Vorbereitung

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., 52428 Jülich		Förderkennzeichen: 02 NUK 005A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2008 bis 31.05.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 31.05.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 686.460,00 EUR	Projektleiter: 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 Targetsequenz 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}I -markierten DNA-Triplex-bildenden Oligonukleotiden (TFO), aber auch mittels DNA-inkorporiertem 5- ^{125}I -2'-desoxyuridin (^{125}I -UdR) durchgeführt werden. In SCL-II Zellen sollen nach Transfektion mit spezifischen TFOs sowie mit ^{125}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 darauf hin, 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.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- 2.1+2.2 Die im Projekt gewonnenen Genexpressionsprofile wurden hinsichtlich strahlungsassoziierter Gennetzwerke sowie der Bildung robuster, konsistenter Konsensusmodule („consensus modules“) unter Miteinbeziehung von Datensätzen aus mehreren vergleichbaren Studien anderer Autoren analysiert. Für die Genexpressionsdatensätze im hohen (2 – 4 Gy) und mittleren Dosisbereich (0.5 – 1 Gy) wurden gute Übereinstimmungen hinsichtlich der aktivierten Gennetzwerke zwischen den Studien gefunden und dabei über 20 Konsensusmodule identifiziert. Insgesamt zehn Konsensusmodule erwiesen sich als strahlungsassoziiert, eines davon hochsignifikant (5e-56). Im Niedrigdosisbereich (0,05 – 0,1 Gy) scheinen nur drei Konsensusmodule strahlungsassoziiert zu sein. Genontologie („GO ontology“) and „KEGG pathway“ Analysen für das hochsignifikante Konsensusmodul für den mittleren und hohen Dosisbereich zeigten u. a. die Involvierung der zellulären Prozesse „regulation of the cell cycle“, „DNA damage response/signal transduction by p53 class mediator“ und „intrinsic apoptosis pathways“. Die entsprechenden Analysen für die Konsensusmodule im Niedrigdosisbereich zeigten die Involvierung völlig anderer Prozesse. Da die Anzahl der hierbei berücksichtigten Genexpressionsstudien jedoch wesentlich kleiner ist, als bei den Experimenten im mittleren und hohen Dosisbereich, müssen diese Analysen weiter validiert werden.
- 2.3 Vergleichende Untersuchungen bezüglich der Induktion von DNA-Doppelstrangbrüchen (DSB) und Zelltod zeigten, dass I-125-markierte TFO im Vergleich zu P-32-markierten TFO sowohl pro Zerfall als auch pro Dosisseinheit ein wesentlich höheres gen- und zytotoxisches Potential (~ 19-fach, respektive 13-fach) besitzen. Offensichtlich induziert der Auger-Elektronen-Emitter I-125 DNA-Läsionen, die in den Zellen länger persistieren bzw. ineffektiver repariert werden, als dies bei uniformer, externer Gamma-Bestrahlung oder P-32-markierten TFO der Fall ist.
- 2.4 Abgeschlossen zum 31.12.2013.

4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.1+2.2 Analyse der Genexpressionsdaten bezüglich Identifizierung und Validierung von weiteren Kandidatengen und Gensignaturen, die die Diskriminierung von Strahlenqualitäten erlauben. Analyse der beteiligten Signalwege und biologischen Prozesse im Niedrigdosisbereich.
- 2.3 Abschließende Reparaturkinetiken zu I-125-induzierten DNA-Doppelstrangbrüchen sowie abschließende Untersuchungen zur Chromosomenschädigung in primären Zellen und Zelllinien nach Exposition mit DNA-assoziiertem I-125.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 015A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2010 bis 31.03.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 31.03.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 159.922,00 EUR	Projektleiter: 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 Voxelm Modelle des menschlichen Körpers an die Körperproportionen eines Individuums angepasst werden. Voxelm Modelle 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 Voxelm Modellen anhand der ermittelten anthropometrischen Parameter und Prüfung des Einsatzes von alternativen Repräsentationstechniken (z. B. Polygonnetze, implizite Oberflächen) für Körpermodelle.
- Entwicklung und Anwendung von Algorithmen zur Bestimmung der anthropometrischen Parameter an den erstellten Voxelm Modellen.
- Erstellung einer routinetauglichen Datenbank mit auf anthropometrischen Parametern basierenden Zähleffizienzen bei niederenergetischen Photonenstrahlern (z. B. Am-241, U-235) für *in vivo* Messsysteme.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- Die Dokumentation des entwickelten Softwarewerkzeugs „Voxel2MCNP“ und des Datenmodells „V2M Schema“ wurde finalisiert.
- Der Abschlussbericht (mit dem Titel der Vorhabenbezeichnung) wurde angefertigt.

4. Geplante Weiterarbeiten

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Pözl, S. (2014). „Personalised body counter calibration using anthropometric parameters“. Doktorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie. doi: 10.5445/KSP/1000038415.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 015B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2010 bis 31.08.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.937.835,00 EUR	Projektleiter: Dr. Tschiersch	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Die Methoden und Ergebnisse der automatischen Berechnungen von Umgebungsfaktoren wurden zusammengefasst. Zusammen mit den Ergebnissen eines Vergleichs von gemessenen Kontaminationsdaten aus Fukushima und aus Satellitenbildern berechneten Umgebungs-

faktoren nach dem Reaktorzwischenfall im März 2011 wurde ein Manuskript erstellt, das zur Veröffentlichung eingereicht wird. Aus diesen Daten wird der Endbericht für das Arbeitspaket erstellt.

- AP1.3: Für das 2D-Video-Distrometer ist die Programmierung eines neuen Algorithmus speziell zur Charakterisierung von Schnee abgeschlossen. Mehrere Schneereignisse des vergangenen Winters wurden charakterisiert und Aerosole wie Niederschlag intensiv (2 h-Abstände) beprobt. Washout-Quotienten und Scavenging-Koeffizienten wurden berechnet und interpretiert. Für die geringkonzentrierten, partikelgrößenfraktionierten Aerosole gelang eine γ -spektrometrische Aktivitätsbestimmung.
- AP2.3: Das Arbeitspaket wurde beendet.
- AP3.1: Die in vitro-Löslichkeitsstudien mit kontaminierten Erden sind abgeschlossen und ausgewertet. Anhand des berechneten fA- und ermittelten Löslichkeitsfaktors wurde der Conversionsfaktor fA_{sol} errechnet, der für die Bestimmung des Absorptionsfaktors von Uran aus hochkontaminierten Erden wesentlich ist. Dosisberechnungen stehen noch aus. Eine Veröffentlichung über die Ergebnisse der Humanstudien und der Löslichkeitsstudie mit Heilerde wird eingereicht.
- AP3.3: Es wurden weitere Messungen an zwei kürzlich aufgetretenen ²⁴¹Am-Inkorporationsfällen durchgeführt, wobei die im AP entwickelten Verfahren angewandt wurden. P. Nogueira fasste alle seine im Rahmen des AP erzielten Ergebnisse zusammen und reichte sie als Doktorarbeit an der LMU München ein. Eine Publikation mit den Ergebnissen einer im Rahmen des AP durchgeführten internationalen Messkampagne befindet sich in Vorbereitung.
- AP3.4: In Kooperation mit AP3.3 wurden die Ausscheidung und die Anreicherung der Aktivität von Ra-226 im Skelett nach Ingestion und Inhalation modelliert. Ziel ist es, zusammen mit den Messungen des Teilkörperzählers, den optimalen Messzeitpunkt für die in vitro- und in vivo-Messungen von Ra-226 zu bestimmen.
- AP4.1: Die Messungen für die Ra-226, Pb-210 und Ra-228 in Lebensmitteln mit Gamma-Spektrometrie wurden fortgesetzt. Aufgrund der niedrigen Konzentrationen sind lange Messzeiten notwendig. Ein Meeting mit VKTA zur Abstimmung des weiteren Vorgehens wurde vereinbart.
- AP4.2: Die Monte-Carlo Simulationen zur Abhängigkeit des Kalibrierfaktors von Umweltparametern wurden abgeschlossen. Dabei zeigte sich, dass die Variation der Luftfeuchte zwischen 0 % und 100 % den Kalibrierfaktor maximal um 1.4 % ändert. Größeren Einfluss haben Luftdruck (Höhenunterschied) und Temperatur. Für die anvisierten Betriebsbedingungen von -25 ° bis 30 °C in einer Höhe von 0-5000 Meter kann sich ein Unterschied von fast 10 % für den Wert des Kalibrierfaktors ergeben. Bei vergrößertem Messvolumen steigen diese Unterschiede. Die simulierten Spektren wurden durch gemessene Radon und Thoron Spektren verifiziert.
- AP4.3: Der Einfluss mineralogischer Eigenschaften auf die Exhalation von Thoron wurde in einer Bachelorarbeit bestimmt. Die Ergebnisse wurden in einer internationalen Konferenz vorgestellt. Messungen der Thoron-Folgeproduktkonzentration in deutschen Lehmhäusern wurden publiziert. Vergleichsmessungen mit einem indischen Team werden gerade zur Veröffentlichung zusammengestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeitspakete (bis auf AP2.3) werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans weiter abgearbeitet. Publikationen und der Abschlussbericht werden vorbereitet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		Förderkennzeichen: 02 NUK 015D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2010 bis 31.03.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 31.03.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 430.874,00 EUR	Projektleiter: 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

AP7: Die für die Aerosolfilter mit Hilfe von Literaturdaten berechneten Depositionsraten liegen zwischen 3 und 191 $\text{pg/m}^2/\text{a}$ für ^{129}I und 0,03 und 2,87 $\text{mg/m}^2/\text{a}$ für ^{127}I . Die ^{129}I -Deposition ist dabei im Norden am höchsten und im Süden am niedrigsten. Die ^{127}I -Deposition ist dagegen unabhängig von der geographischen Lage der Standorte.

Für die Flusswasserproben sind unter Einbeziehung von Durchflussdaten jährliche Austragsmengen berechnet worden. Der Gesamtaustrag, bezogen auf die Einzugsgebiete der untersuchten Flüsse, beträgt für ^{129}I 272,4 pg/m^2 und für ^{127}I 23,7 mg/m^2 pro Jahr.

Die Untersuchung der letzten zu messenden Bodenproben lieferte ^{129}I -Gehalte von 87,7 - 260,1 fg/g in der oberen 5 cm. Daraus ergeben sich Isotopenverhältnisse zwischen $19,0 \times 10^{-9}$ und $81,8 \times 10^{-9}$. Sie liegen damit im selben Bereich, wie die der bisher untersuchten Proben.

Für ^{129}I im Boden ergab sich eine enge Beziehung zum Gehalt an organischer Substanz ($r^2 = 0,6$), während seine Affinität zu Eisen- und Aluminium(hydr)oxiden sich als vergleichsweise schwach ($r^2 = 0,06$ bzw. $r^2 = 0,14$) herausstellte. Für ^{127}I war die Beziehung zu den Aluminium(hydr)oxiden des Bodens enger als zu Eisenoxiden und organischer Substanz.

4. Geplante Weiterarbeiten

Erstellung des Abschlussberichtes.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vortrag: A. Daraoui (2014): Application of AMS for determination of I-129 in soil profiles from the northern and southern hemisphere, DPG Frühjahrstagung 2014, 17.-21. März, Berlin.

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, Leo-Brandt-Straße, 52428 Jülich		Förderkennzeichen: 02 NUK 015E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2010 bis 31.08.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 140.493,20 EUR	Projektleiter: Dr. Hofmann	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

Im Projekt wird das Verhalten der Radionuklide (RN Cs-137 und Sr-90) in Bodensystemen desselben Typs mit unterschiedlicher Bodenbewirtschaftung untersucht. Eine Minimierung der Bodenbearbeitung wird dazu beitragen, dass Bodenverlust durch Erosion reduziert wird. Eine solche Bodenbearbeitung in Kombination mit der Anwendung von Biochar oder Gärrückständen verändert die Eigenschaften der organischen Substanz des Bodens sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen/Radionukliden. Darüber hinaus sind extreme Wetterbedingungen auf Grund des Klimawandels zu erwarten. Extreme Feuchtwechsel werden die natürlichen Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe verändern und sich so in noch unbekannter Weise auf die Mobilisierung von Radionukliden in der Bodenmatrix auswirken mit zu erwartenden Effekten auf den Transfer in die Kulturpflanze. Eine Vernetzung mit dem Arbeitspaket Microbial Processes of Sequestration and Mobilization in Soil (Prof. Kothe, Jena) ist vorgesehen.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Digestate amendment did not make a significant effect on soil-plant transfer of the two radionuclides (RN). However, different plant species showed a difference in plant uptake, weed plants showed higher uptake compared to the wheat. Due to the high applied activity in soil (66 MB/m² for Cs-137, 18 MB/m² for Sr-90), clear translocation of activity was observed in different plant parts. Grain resulted in lower activity values compared to straw for both RN. Sr-90 exhibited 80-100 times higher plant uptake and translocation

compared to Cs-137. The activity results for soil samples collected at different soil depths (0-5, 5-10, 10-15 cm) indicate that most of applied activity remained in the top soil layers, 5-10 cm soil. No activity was found in the percolate samples (suction cups) at the 40 cm depth, reinforcing the lower vertical mobility of both RN.

The intercrop, Teralife has already been harvested; activity analysis is in progress. For Teralife, soil sampling was done in the same way as for summer wheat, however sampling depth was increased to 20 cm (0-5, 5-10, 10-15 and 15-20 cm). Summer oat has been harvested in July 2014; soil sampling after oat harvest will be done in beginning of August 2014.

The sorption experiments of cesium and strontium at room temperature are complete. The results indicate that organic amendment has less pronounced effect on sorption-desorption of both elements compared to the soil texture. Among the two RN, cesium demonstrated a higher sorption affinity in silty-loam soil followed by forest soil and lowest for loamy sand. In contrast, strontium showed a lower sorption for all three soils, with a slightly higher adsorption in silty-loam and almost similar both for the forest and sandy soils.

The sorption-desorption data was fitted with Freundlich model, $C_s = K_f C_e^n$, C_s and C_e are adsorbate concentrations in solid and liquid phases respectively; K_f and n are Freundlich parameters. The strength of sorption and reversibility was examined by Freundlich parameters (K_f and n) for sorption and desorption. Cesium showed higher reversibility in silty-loam soil, followed by loamy-sand and lowest for forest soil. Strontium sorption was partly reversible in mineral soils, loamy-sand and silty-loam due to ion-exchange with Ca^{2+} . Forest soil resulted in highest hysteresis, least desorption for strontium due to the interaction with native organic matter.

Sorption-desorption experiments at two different temperatures (5 and 35 °C) are complete and analysis is in progress.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Soil sampling after oat harvest in beginning of August 2014; a continuation of transfer factors (TFs) determination.
- Radioactivity measurement in plant and soil samples (for teralife and summer oat) to calculate the transfer factors (TFs).
- Radioactivity measurement in soil samples collected at different soil depths to account for the vertical mobility.

Ongoing

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Khalid Mehmood, Diana Hofmann, Peter Burauel, Harry Vereecken and Anne E. Berns (2014): "Cesium and strontium sorption behavior in amended agricultural soils". In: Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-875, EGU General Assembly, 27 April – 02 May, 2014, Vienna, Austria.

Khalid Mehmood, Anne E. Berns, Thomas Pütz, Peter Burauel, Harry Vereecken, Myroslav Zoriy, Reinhold Flucht, Thorsten Opitz and Diana Hofmann (2014): "Soil-plant transfer of Cs-137 and Sr-90 in digestate amended agricultural soils- a lysimeter scale experiment". In: Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-871-1, EGU General Assembly, 27 April – 02 May, 2014, Vienna, Austria.

Mehmood K., Hofmann D., Burauel P., Vereecken H. and Berns A.E.: (2014): "Sorption of Cs^+ and Sr^{2+} after addition of wood-biochar and digestate in two temperate arable soils at different temperatures" (in preparation).

Mehmood K., Berns A.E., Pütz T., Burauel P., Vereecken H., Zoriy M., Flucht R., Opitz T. and Hofmann D.: "Translocation and plant uptake of Cs-137 and Sr-90 in different crops in digestate amended silty-loam soil- a lysimeter scale experiment" (in preparation).

Zuwendungsempfänger: Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 128, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 015G
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2010 bis 31.08.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 247.200,00 EUR	Projektleiter: 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}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb und ^{210}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}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb und ^{210}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

- Die Analyse der Ausscheidungsproben der Arbeiter ist abgeschlossen.
- Die Analyse der Ausscheidungsproben der Referenzgruppe nicht strahlenexponierter Personen wurde weiter geführt und läuft noch. Dabei wurden die Analysen der Stuhlproben schon abgeschlossen. Lediglich die Analyse der Urinproben ist noch im Gange.
- Zur besseren Interpretation und zum Vergleich mit den Analysenwerten der Ausscheidungsproben, die während der Studie mit spezieller „Diät“ und Reinigung der Wärmetauscher (WT) genommen wurden, sind in einer weiteren Kampagne für drei Tage jeweils 24 h-Stuhl- und 24 h-Urin-Proben der Arbeiter gesammelt worden um als „Null“- bzw. „Normal“-Werte zu dienen (ohne Einfluss der zur Verfügung gestellten Nahrungsmittel und ohne WT-Reinigung).
- Zum Zeitpunkt dieses Berichtes sind von den in Summe 566 einzeln zu bestimmenden Werten (die sich durch die erneute Probenkampagne entsprechend erhöht hat) aktuell bereits 402 Analysen durchgeführt worden.
- Es wurde damit begonnen die erhaltenen Analysedaten zusammenzustellen und auszuwerten. Dabei fällt auf, dass die Urinproben meist nur sehr kleine Werte, z. T. unter der Erkennungsgrenze (EG) aufweisen. Wohingegen in den meisten Stuhlproben für alle bestimmten Radionuklide Werte deutlich größer als EG gefunden wurden. Es ist anzunehmen, dass diese Radionuklide nicht durch die im Rahmen der Studie zugeführten Lebensmittel aufgenommen wurden. Die Quelle der gefundenen Radionuklide ist demnach noch zu ermitteln. Eine mögliche These ist hierbei die lebenslange Aufnahme kleiner Mengen dieser natürlichen Radionuklide, z. B. über die Nahrung, und die Ausbildung eines Körperdepots. Genauere Berechnungen hierzu sollten noch folgen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Die Literaturrecherche wird fortgesetzt und daraus erhaltene Erkenntnisse werden zur Interpretation der verfügbaren Analysedaten genutzt.
- Die Analyse der Urin- und Stuhlproben der Probanden der Referenzgruppe sowie die noch ausstehenden Analysen der „Null“-proben der Arbeitergruppe werden weitergeführt und baldmöglichst abgeschlossen.
- Nach Zusammenstellung der Analysedaten erfolgt eine Bilanzierung der Aufnahme- und Ausscheidungsmengen für jeden einzelnen Probanden. Die ermittelten Ausscheidungsraten werden mit den Ergebnissen der Analysen der zur Verfügung gestellten Lebensmittel (welche am Helmholtz-Zentrum München analysiert wurden) abgeglichen.
- In einer gemeinsamen Publikation mit den Kollegen vom ISS des Helmholtz-Zentrums München werden Methoden und Analyseergebnisse vorgestellt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen		Förderkennzeichen: 02 NUK 015H
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2010 bis 30.06.2014	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 113.639,00 EUR	Projektleiter: 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}I im Fließgewässer erstellt werden. Daten für ^{137}Cs und ^7Be 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

In den letzten Berichtszeiträumen wurden insgesamt 12 Methodenvariationen zur Extraktion von Iod-131 in Oberflächenwasser untersucht. Dabei werden prinzipiell in 2 Schritten das anorganische und das organische Iod ausgefällt.

Anhand der chemischen Ausbeuten (von 79 % bis 88 %), des Aufwandes und der Kosten wurden 3 davon ausgewählt. Anorganisches Iod wird mit Flockungsmitteln nach dem Bentonitverfahren (auf Basis der „Messanleitung für die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“ des BMU), organisches Iod mit Kationen wie Fe(III) gefällt.

Die 3 Methoden unterscheiden sich in der Kombination der Flockungs- und Fällungsmittel.

Im Teilprojekt 1.1 des TransAqua-Verbundprojektes werden diese Methoden bei der Aufbereitung von Flusswasserproben verwendet.

In der im Sommer 2013 durchgeführten einwöchigen Messkampagne im städtischen Abwasser-Kanalnetz wurden zwischen der Kläranlage und dem Wohnort eines aus der Radioiodtherapie entlassenen Patienten unter Einhaltung des Datenschutzes an 3 Orten Abwasserproben entnommen und gammaspektroskopisch auf Iod-131 untersucht.

Für die Simulation dieser Kampagne wurden Daten des beprobten Teilnetzes in die kommerzielle Kanalberechnungssoftware Kanal++ importiert. Da die Probennahme während einer Trockenwetterphase stattfand, konnte vereinfacht ohne Sonderbauwerke, wie zum Beispiel Regenüberlaufbecken, die in diesem Teil der Mischkanalisation vorhanden sind, gearbeitet werden.

Für die Simulation wird Iod-131 als Schmutzfracht mit konstanter Konzentration im Schmutzwasser definiert und analog zu den Probeentnahmestellen die Konzentrationen berechnet. Bezüglich der Verdünnung in der Kanalisation liefert diese Berechnung für 2 der 3 Probennahmeorte plausible Ergebnisse.

Mit dem vorhandenen Radionuklidmodul (im Teilprojekt der HGMU in KVVSF-1 entwickelt) soll Iod-131 als nichtkonstanter Eintrag entsprechend einer Iod-131-Ausscheidungskurve eines Patienten im Netz simuliert werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Abschließen der Simulationen mit der Kanalberechnungs-Software Kanal++.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Zwei Tagungsbeiträge mit den Themen:

“An experiment to use medical I-131 as tracer in a city sewer system” und “Be-7 in rainfall, river sediment and sewage sludge” wurden für die ICRER 2014 in Barcelona als Poster bzw. Poster mit Kurzvortrag (2) angenommen.

Zuwendungsempfänger: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 017A
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.01.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.782.208,00 EUR	Projektleiter: Dr. Fournier	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem hier vorgestellten Projekt soll die Langzeitwirkung von niedrigen Dosen dicht-ionisierender Strahlung (α -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-Expositionskammer zu bauen, in der Zellkulturen und Kleintiere (Mäuse) mit α -Teilchen bestrahlt werden können. In Tierexperimenten soll die Verteilung der α -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 κ 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: Weitere Zellkultur- und Tierexperimente wurden erfolgreich durchgeführt. Die Messung der Radon-Zerfallsprodukte mittels Gammaskopie ermöglichte die Bestimmung der Anreicherung von Radon in verschiedenen Materialien (Muskel, Fett).

- AP3: Die Untersuchung von Strahlenschäden in Lymphozyten von zwei Patienten aus Bad Steben (mFISH-Analyse von bis zu 350 Metaphasen pro Probe) für verschiedene Zeitpunkte vor und nach Therapie wurde beendet. Unsere Daten weisen auf große inter-individuelle Unterschiede zwischen den Patienten hin, die sowohl die Spontanrate von Schäden (vor Therapiebeginn) als auch die Häufigkeit und die Komplexität von Austauschaberrationen betreffen. Weiterhin wurden Knochenmarkszellen von arthritischen Mäusen (aus AP9) ex vivo mit Alphastrahlen an der TUD bestrahlt und Chromosomenpräparate 16 und 24 Stunden nach der Exposition hergestellt und angefärbt. Mit der Analyse der ersten Präparate wurde begonnen.
- AP4: (a) Ein Vergleich der strahleninduzierten Apoptose in Monozyten verschiedener Herkunft (Buffy-Coats und frisch gespendetes Vollblut) hat ergeben, dass eine höhere Apoptoserate mit besserer O₂-Versorgung der Proben korreliert. Eine verminderte Adhäsion von Lymphozyten an primäre TNF- α stimulierte Endothelzellen (HMVEC) wurde in einem zweiten Experiment mit Kohlenstoff-Ionen (Niedrigdosis-Bereich) für laminare Bedingungen bestätigt. Weitere Zytokin-Messungen ergaben für Röntgenstrahlung keine (TGF- β , IL-8) oder eine zur Adhäsion anti-korrelierte Freisetzung (MCP-1). In mehreren gemeinsamen Experimenten mit AP5 und AP8 wurde in Ea.hy.926 Zellen parallel zur Adhäsion und der Freisetzung von Zytokinen die NF κ B-Signaltransduktion und ROS-Induktion untersucht (Röntgenstrahlung und Kohlenstoff-Ionen).
- (b) Bestrahlte Vorläufer-Osteoblasten zeigten eine Induktion und erhöhte Freisetzung von Differenzierungsfaktoren und matrixbildenden Proteinen, was einer beschleunigten Differenzierung und damit einer potentiellen Hemmung der Osteoklastenaktivität entspricht. Die Untersuchungen von Markern des Knochenmetabolismus in Blutproben von Patienten (in Zusammenarbeit mit AP9) haben eine Abnahme der Osteoklastenaktivität ergeben, was auf eine Minderung des Knochenabbaus nach Radon-Therapie hindeutet. Mit der Untersuchung von weiteren potentiellen Einflussfaktoren auf die Osteoklastenaktivität, die durch Synovialfibroblasten oder Adipozyten freigesetzt werden, wurde begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Der Experimentier-Betrieb kann am alten Standort weitergeführt und anschließend am neuen Standort fortgesetzt werden. Gammaskopische Messungen verschiedener Gewebetypen und die Untersuchung des Diffusionsverhaltens von Radon werden im Rahmen einer Masterarbeit weitergeführt.
- AP3: Die Untersuchung zur Induktion von Chromosomenschäden in Lymphozyten und Knochenmarkszellen von Mäusen in Zusammenarbeit mit AP2 und AP9 wird fortgesetzt. Im Juli werden Wildtyp Tiere mit Radon bestrahlt und Proben 3 Monate nach der Exposition gewonnen. Weiterhin wird eine neue Methode zur Identifikation von Inversionen an der GSI in ersten Versuchen eingesetzt..
- AP4: (a) Experimente zur Apoptose von Monozyten werden mit frischem Spenderblut wiederholt. Experimente zu den molekularen Grundlagen der verminderten Adhäsion von Immunzellen an Endothelzellen im Niedrigdosis-Bereich werden in Zusammenarbeit mit AP5 und AP8 fortgeführt.
- (b) Die beschleunigte Differenzierung von Osteoblasten nach Bestrahlung und deren Auswirkung auf die Osteoklastenaktivität soll weiter untersucht werden (Wnt-signaling, Resorption auf Knochen) sowie weitere potentielle Faktoren wie das Zytokinprofil von bestrahlten synovialen Fibroblasten aus Gelenken von gesunden Spendern und RA-Patienten sowie die Differenzierung von Adipozyten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

GSI Scientific Report 2014-1 (in press):

J.A. Adrian et al.: Construction of an alpha-irradiation-setup for cells

N. Paz et al.: Time-course of radiation induced chromosome aberrations in mouse bone marrow cells

N. Erbdinger et al.: Interaction of endothelial cells and lymphocytes after X-ray exposure

A. Groo et al.: Response of bone marrow progenitor cells to ionizing irradiation

J. Wiedemann et al.: Inflammation-related response to irradiation in different human skin culture systems

A. Maier et al.: Radon exposure setup for cells and small animals

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 017B
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.07.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 195.960,00 EUR	Projektleiter: 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 weitere elektrophysiologische Messungen zur Wirkung von α -Strahlen auf Ionenkanalaktivität in lebenden Zellen durchgeführt. Die Arbeiten konzentrieren sich im Moment auf die Wirkung von Strahlen auf Kanalaktivität in Lymphozyten. Die Daten sollen darüber Auskunft geben, ob eine Bestrahlung zu einer veränderten Immunantwort führt.

Vorherige Arbeiten haben gezeigt, dass es eine Korrelation zwischen der Expression des hIK Kanals in Zellen und deren Strahlenempfindlichkeit gibt. Zum Test der Hypothese, dass der hIK Kanal den Zellen eine solche Strahlenempfindlichkeit verleiht, haben wir den Kanal heterolog in HEK293 Zellen, in denen der hIK Kanal endogen nicht vorhanden ist, exprimiert. Die elektrophysiologischen Messungen zeigen, dass der Kanal in HEK293 Zellen funktional ist und sowohl durch eine Erhöhung von $\text{Ca}^{2+}_{\text{cyt}}$ wie auch von H_2O_2 stimuliert werden kann. Der wohl wichtigste Befund aus diesen Experimenten ist, dass HEK293 Zellen, die den hIK Kanal heterolog exprimieren, eine Strahlenempfindlichkeit hinsichtlich der Membranleitfähigkeit zeigen. Damit können wir nachweisen, dass vor allem das Vorhandensein des hIK Kanals darüber entscheidet, ob eine Zelle auf ionisierende Bestrahlung mit einer erhöhten K^+ -Leitfähigkeit und einer Hyperpolarisation der Membranspannung reagieren.

Große Fortschritte haben wir ebenfalls bei der Registrierung von Signalkaskaden nach Strahlenbehandlung mit fluoreszierenden Marker-Proteinen gemacht. Damit können wir nun in Zellen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung die Änderung von Signalmolekülen nach Bestrahlung mikroskopisch detektieren. Die Daten zeigen jedoch, dass schon unmittelbar nach Bestrahlung freie Radikale durch einen Redox-Puffer in den Zellen, der sowohl im Zytosol wie auch im Kern vorhanden ist, gepuffert werden. Interessanterweise zeigen die kinetischen Daten, dass die Reaktion des Redoxpuffers der des H_2O_2 Signals in den Zellen voraneilt. Mit einem einfachen kinetischen Modell können wir die gesamten Abläufe in einer Zelle so erklären, dass die Konzentration an freien Radikalen nach Bestrahlung erst dann nennenswert ansteigt, wenn die Kapazität des Redox-Puffers erschöpft ist. Diese Latenzzeit zwischen Bestrahlung und Anstieg an Radialkonzentration kann sehr gut erklären, warum in den Zellen die Aktivität der K^+ -Kanäle mit einer Verzögerung ansteigt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die oben beschriebenen Experimente werden fortgeführt, um so die Wirkung von α -Strahlen auf Signaltransduktionskaskaden in Zellen zu verstehen. Die folgenden Arbeiten werden sich mit der Rolle von cytosolischem Ca^{2+} in der Signalverarbeitung beschäftigen. Wir werden uns dabei vor allem auf die Wirkung von Strahlung in Lymphozyten und dem Zusammenhang mit Immunreaktionen konzentrieren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Eine erste Publikation (Roth et al., Low dose photon irradiation alters cell differentiation via activation of hIK channels) wurde bei Pflügers Archiv-European J. Physiol. eingereicht und ist in Begutachtung. Die Promotion von B. Roth wurde am 07.02.14 abgeschlossen; eine zweite (C. Gibhardt) steht vor dem Abschluss; am 08.09.14 wird die Verteidigung sein.

Vortrag: Patrick Becker: "Response of K^+ channel activity in peripheral blood lymphocytes to ionizing irradiation", Klausurtagung des Graduiertenkollegs 1657, Kleinwalsertal, Juni 2014

Poster-Präsentation: Patrick Becker: "Response of K^+ channel activity in peripheral blood lymphocytes to ionizing irradiation", FEBS/EMBO Lecture Course Biophysics of channels and transporters, Erice, Italien, Mai 2014

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 017C
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.07.2015		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 213.924,00 EUR		Projektleiter: 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- κ 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

AP6 beschäftigt sich mit der Analyse des cholinergen Systems bei der Skelettentwicklung und mit Bezug zu verwandten Krankheitsbildern, insb. der rheumatoiden Arthritis. Wie früher schon berichtet, haben wir ein 3D-Hochdichte-Micromass-Kultursystem etabliert, mit dem die Bildung von Knorpel und Knochen in vitro anhand der Gliedmaßenanlagen von Hühnchen und Maus modelliert werden kann. Dabei konzentrieren wir uns auf die Analyse eines nicht-neuronalen cholinergen Signalwegs, der inzwischen auch als cholinerg anti-inflammatorischer pathway (CAIP) bei verschiedenen Krankheiten nachgewiesen wurde, wie z. B. der rheumatoiden Arthritis, welche Gegenstand des GREWIS-Projekts ist. Eine frühe Acetylcholinesterase (AChE)-Expression und -Aktivität während der Knorpel- und Knochenbildung belegt die Bedeutung des cholinergen Systems bei diesen Prozessen. Um dies experimentell nachzuprüfen, haben wir BW254c51, einem spezifischen AChE-Inhibitor, eingesetzt. Dabei konnten wir nachweisen, dass eine AChE-Hemmung die Bildung von Knorpelknötchen (nodules) stark unterdrückt, wie wir durch eine Alzianblau-Färbung gezeigt haben. Gleichzeitig wurde auch die alkalische Phosphatase (ALP) gehemmt, einem wichtigen Enzym der Knochenmineralisierung. Auf der anderen Seite führte 20 μ M Nicotin zu einer verstärkten Knorpel-, aber einer verzögerten Knochenbildung. Diese Resultate unterstreichen die Bedeutung des cholinergen Systems für die Skelettbildung.

Einfluss von Bestrahlung auf die Knochenbildung.

Nun wurden die Kulturen 0.5 und 2 Gy Röntgenstrahlung ausgesetzt, um den Einfluss von Strahlung auf die Knochenbildung zu untersuchen. Während 0.5 Gy keine Effekte zeigte, zeigten die Kulturen nach 2 Gy-Bestrahlung eine stark verfrühte Knorpelknötchen-Bildung. Zudem wurden die AChE- und die ALP-Aktivitäten nach 2 Gy-Bestrahlung erhöht, was mit einer fortgeschrittenen Knochenmineralisierung korrelierte. Dies deutet darauf hin, dass diese Bestrahlung die frühe Knochendifferenzierung begünstigt.

Röntgenstrahlung kann der Wirkung von TNF-alpha entgegenwirken.

Da TNF-alpha ein zentraler Faktor beim Entzündungsgeschehen der rheumatoiden Arthritis darstellt, haben wir diesen Faktor bei verschiedenen Konzentrationen in unseren Micromass-Kulturen eingesetzt, um den Effekt auf die Knochenbildung zu studieren. 5 ng/ml TNF-alpha hat tatsächlich die Mineralisierung drastisch reduziert, wie mit ALP- und Alizarin-Färbungen gezeigt wurde. Interessanterweise wurde auch die AChE-Aktivität reduziert, was wiederum die Bedeutung des cholinergen Systems unter diesen Bedingungen zeigte. Es war sehr überraschend, dass die Effekte in TNF-alpha-behandelten Kulturen durch 2 Gy-Röntgenstrahlung aufgehoben wurden. Diese Resultate befeuern unser Interesse, die Strahlenwirkungen in Kombination mit den cholinergen Effekten noch weiter zu analysieren, um sie schließlich therapeutisch einsetzen zu können.

4. Geplante Weiterarbeiten

(i) Monate 12-24:

- Bestrahlungen der verschiedenen Zellkultursysteme (Röntgen, Alphastrahlung, Radon)
- Analyse der Expression cholinerg Komponenten nach Bestrahlung

(ii) Monate 24-36:

- Analyse der Expressionsmuster cholinerg Komponenten im transgenen Arthritis-Mausmodell
- Analyse der Expression cholinerg Komponenten nach Bestrahlung der transgenen arthritischen Mäuse

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 017D
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.07.2015		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 582.853,00 EUR		Projektleiter: Prof. Dr. Cardoso

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Speziell in unserem Teilprojekt (*AP5*) soll die Rolle des Transkriptionsfaktors NF- κ 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- κ B bei der anti-inflammatorischen Wirkung von Strahlung (TUD)*

I. (Monate 1-6)

- NF- κ 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- κ B

II. (Monate 6-24)

- Aktivierung von NF- κ 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- κ B auf primäre menschliche Zellen (einschließlich Patientenproben) und auf Gewebe des RA Mausmodells

III. (Monate 25-36)

- NF- κ B Inhibierung durch Einschleusen des NEMO-Peptids in die Zellen (nach Choi u. a. 2003) oder durch NF- κ B Knock-Down mittels siRNA
- Auswirkung auf die genannten anti-entzündlichen Prozesse

IV. (Monate 18-24)

- Untersuchung von Expression und Aktivierung von NF- κ 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

Wir untersuchten die Aktivierungskinetik von NF- κ B Signalwegen nach Bestrahlung mit Röntgenstrahlen und C-Ionen. Zu diesem Zweck bestrahlten wir Endothelzellen (Primärzellen und Zelllinie) und fixierten sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Mittels Immunfluoreszenz Färbung konnten die NF- κ B Untereinheiten via „Operetta High-content/High-throuput imaging system“ detektiert und quantifiziert werden.

NF- κ B p65 (aber nicht RelB, p100 und p105/50) zeigt eine veränderte Aktivierungskinetik nach Bestrahlung in Anwesenheit von TNF alpha die aber nicht Dosis-abhängig zu sein scheint.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Laufe der nächsten sechs Monate werden wir die Aktivierungskinetik von NF- κ B in bestrahlten primären menschlichen Endothelzellen analysieren und die Daten mit den Ergebnissen der Endothelzelllinie vergleichen. Außerdem werden wir die Aktivierungskinetik von NF- κ B in Zusammenhang bringen mit der Lymphozyten Adhäsion an Endothelzellen von AP4.

Des Weiteren planen wir die Untersuchung des NF- κ B Signalweges im Gewebe bestrahlter wildtyp und TNF alpha transgener Mäuse.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Kind, B., Muster, B., Staroske, W., Henry, H. D., Sachse, R., Rapp, A., Schmidt, F., Koss, S., Cardoso, M. C.# and Lee-Kirsch, M. A.# (2014): Hum. Mol. Genet. doi: 10.1093/hmg/ddu319. #corresponding authors.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 017E
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.07.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 723.992,40 EUR	Projektleiter: 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 α -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}Am -Quelle
- Bestimmung von α -Teilchenspuren in zellulären Monolayern, lateral und in Bestrahlungsrichtung (mit und ohne Kollimator)
- Bestimmung von α -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 α -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 γ H2AX-Foci Methode zur Bewertung der durch eine Radonexposition in verschiedenen Mausgeweben deponierten Strahlendosis eingesetzt werden. In diesem Berichtszeitraum wurde das zweite Tierexperiment mit der Radonexpositionskammer durchgeführt.

Entzündlich-rheumatische Erkrankungen der Gelenke und chronische Schmerzen des Bewegungsapparates zählen zu den Hauptindikationen für eine therapeutische Radonbehandlung. Im Rahmen dieses Versuchsvorhabens soll untersucht werden, wie Radongas sich im Körper verteilt und ob eine Anreicherung des Gases in bestimmten Organen zu beobachten ist.

Eine der zentralen Fragestellungen ist wie Radongas auf den Knochen wirkt und ob es eventuell zu einer Anreicherung von Radon oder dessen Tochternukliden im Knochengewebe kommt. Um dies zu untersuchen, müssen die durch die radioaktiven Zerfälle des Radongases hervorgerufenen DNA Schäden im Knochen mittels Immunfluoreszenzfärbung nachgewiesen werden. In einer Reihe von Vorexperimenten wurde ein Protokoll zur Präparation, Einbettung und Färbung von murinen Knochen etabliert.

Am 11. Februar 2014 wurde in Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern der zweite Radon Tierversuch durchgeführt. Es wurden insgesamt sechs adulte, weibliche Mäuse in der Radonexpositionskammer einer Radonkonzentration von 40 kBq/m^3 ausgesetzt. Die Tiere befanden sich eine Stunde in der Kammer und wurden anschließend nach 15 Minuten, 24 Stunden und 7 Tagen getötet für die Organentnahme. Desweiteren wurden zu jedem Zeitpunkt die Organe von einem unbestrahlten Tier (insgesamt drei Kontrollen) entnommen. Durch enge Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern während des Tierversuchs wurde eine besonders effiziente Aufteilung aller Proben sichergestellt. Unter anderem wurden fixierte Organe für die Radioaktivitätsmessung an AP1 abgegeben, Blut und Knochenmark für die Chromosomenanalyse an AP3 und eine Teil unfixierte Lunge zur Charakterisierung pulmonaler Makrophagen an AP4.

Zurzeit werden Immunfluoreszenzfärbungen der Paraffinschnitte von den ersten zwei Tierexperimenten ausgewertet. Zunächst wird sich die biodosimetrische Analyse auf besonders relevante Organe (Lunge, Haut, Knochen) konzentrieren. Anschließend wird auch die Radonexposition der anderen Organe (Herz, Leber, Niere etc.) mittels der γ H2AX-Foci Methode untersucht.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im zweiten Halbjahr 2014 ist die Auswertung der ersten zwei Radon Tierversuche geplant. Desweiteren ist die Durchführung des dritten Tierversuchs für Juli 2014 angesetzt. Neben Experimenten mit der Radonkammer sind weiterführende Versuche mit der Röntgenröhre und der α -Quelle geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main		Förderkennzeichen: 02 NUK 017F
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.07.2015		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 280.992,00 EUR		Projektleiter: 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- κ 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- α transgenen Maus dar.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nicht-lineare Dosis-Wirkungsbeziehungen sind ein wesentliches Charakteristikum der anti-inflammatorischen Wirkung niedriger Strahlendosen. In diesem Zusammenhang gelang im Berichtszeitraum, unabhängig von einer Stimulation mit dem Zytokin TNF- α , in der Endothelzell-Linie EA.hy926 und in primären humanen mikrovaskulären Endothelzellen (HMVEC) mittels quantitativer PCR, kolorimetrischer und Western-Blot Analysen (AP3) der Nachweis einer lokal (0,5 Gy) reduzierten Expression (auf mRNA und Proteinebene) und Aktivität der Enzyme Superoxiddismutase (SOD), Katalase (CAT), Glutathionperoxidase (GPx) und des Transkriptionsfaktors Nuclear Factor-like 2 (NRF2). Funktionell konnte in Adhäsionsassays eine diskontinuierliche Dosis-Wirkungsbeziehung der Bindung von mononukleären Zellen des peripheren Blutes (PBMC) an stimulierte Endothelzellen mit einem lokalen Minimum nach Bestrahlung mit 0,5 Gy und erhöhten Werten nach Dosen von 0,7 oder 1 Gy bestätigt werden. Eine Vorbehandlung mit dem Radikalfänger N-Acetyl-L-Cystein (NAC) hingegen führte zu einer weiteren Minderung der Adhäsion nach Bestrahlung mit 0,5 Gy und Verlust der Adhäsionssteigerung nach Dosen > 0,5 Gy (AP2). Diese Ergebnisse belegen eine funktionelle Relevanz antioxidativer, ROS-modulierender Enzyme für die diskontinuierliche Detektion residueller gamma-H2AX-Foci (AP1) und funktioneller Eigenschaften (AP2) in Endothelzellen nach niedrig dosierter Bestrahlung (Publikation in Vorbereitung).

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten in AP1 werden plangemäß weitergeführt und die Untersuchungen nach Radonbestrahlung und in Lymphozytenpräparationen weitergeführt. In AP2 soll die Bedeutung der Stressfaktoren Hsp70 und von High-Mobility-Group-Protein B1 (HMGB1) auf die Funktionalität von Endothelzellen in einem Adhäsionsassay unter statischen und dynamischen Bedingungen evaluiert werden. Den Schwerpunkt weiterführender Untersuchungen im AP3 stellen Untersuchungen zur funktionellen Bedeutung des Transkriptionsfaktors NRF2 und einer regulatorischen mikroRNA (miRNA) Expression dar.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum sind folgende Arbeiten publiziert:

Gaipl US, Multhoff G, Scheithauer H, Lauber K, Hehlhans S, Frey B, Rödel F.: Kill and spread the word: stimulation of antitumor immune responses in the context of radiotherapy. *Immunotherapy* 2014; 6: 597-610.

Large M, Reichert S, Hehlhans S, Fournier C, Rödel C, Rödel F.: A non-linear detection of phosphohistone H2AX in EA.hy926 endothelial cells following low-dose X-irradiation is modulated by reactive oxygen species. *Radiat Oncol* 2014; 9: 80.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen		Förderkennzeichen: 02 NUK 017G
Vorhabensbezeichnung: 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		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2012 bis 31.07.2015	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 292.116,00 EUR	Projektleiter: 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- α (hTNF- α) 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 α -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- α 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- α 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- α transgenen Mäuse vor und nach Bestrahlung mit unterschiedlichen Strahlenqualitäten und -dosen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nach erfolgreichem Abschluss der RAD-ON01-Studie im Oktober 2013 erfolgte eine umfangreiche Auswertung der immunphänotypischen Daten der peripheren Blutzellen. Es zeigte sich, dass eine Modulation des Immunsystems schon durch die sehr gering dosierte Radon-Strahlung stattfindet. Zwar bleibt die Anzahl und Art der Hauptimmunzellen unverändert, aber Subtypen und vor allem Aktivierungszustände werden moduliert. So werden direkt nach Therapie signifikant mehr immunsuppressive regulatorische T-Zellen und immunregulatorischen DCs gemessen. Weiterhin kommt es zu einer allgemeinen Reduktion der Aktivierung von Lymphozyten (z. B. signifikant erniedrigte Expression von CD69, CD80) sowie zu einer vermehrten Expression von HLA-DR auf T-Zellen und Monozyten. Beides ist mit mehr anti-entzündlichen Phänotypen assoziiert. Eine Gegenüberstellung der beiden Therapie-Gruppen (100 % Radonwasser mit 1.200 Bq/l und 50 % Radonwasser plus 50 % Kohlen-säurewasser mit 600 Bq/l) ergab, neben der gleichen Reduktionen des Schmerzempfindens, auch ähnliche Immunmodulationen. Somit könnte eine Reduktion der Strahlenbelastung um 50 %, wie im Schmerzempfinden auch für die niedrig dosierte Röntgenstrahlentherapie gezeigt, für zukünftige Radon-Therapien in Frage kommen. Zusätzlich wurde begonnen, 25 unterschiedliche Zytokine im Serum der Patienten im Längsschnitt zu analysieren. Präklinisch zeigte die Bestrahlung der hTNF- α transgenen Mäusen mit 2x0.5Gy, dass sich die Griffstärke der behandelten Tiere über den gesamten Beobachtungszeitraum von 30 Tagen hinweg signifikant verbesserte. Deshalb wurde ein dritter Bestrahlungsversuch mit wiederum 2x0.5Gy gestartet, um die histomorphologischen Veränderungen in den Gelenken im Detail zu analysieren. Um zusätzliche transgene Tiere für Folgeversuche zu gewinnen wurden die Zuchten aufgestockt. Mausosteoklasten konnten *ex vivo* erfolgreich kultiviert und differenziert werden. Eine Beeinflussung der Osteoklastenzahl durch Niedrigdosisbestrahlung kann ausgeschlossen werden. Die funktionellen Analysen dauern noch an. Die Etablierungsarbeiten, um verlässlich ausreichende und zur qPCR-Analyse geeignete Mengen an mRNA aus *ex vivo* differenzierten Mausosteoklasten zu erhalten, wurden ebenfalls erfolgreich beendet. Vermessungen der Osteoklasten cDNA deuten auf eine Reduktion der Osteoklasten-Aktivität bei einer Strahlendosis von 2x0.5Gy hin (Reduktion der *TRAP* bzw. *Cathepsin K* Level). Um diese Ergebnisse zu validieren werden derzeit weitere Osteoklasten-Kulturen angelegt. Weiter konnten *Fibroblast-like synoviocytes* (FLS) erfolgreich aus C57Bl/6 und hTNF- α tg Tieren gewonnen werden. Erste Versuche zur Bestimmung des Einflusses niedrig dosierter Röntgenstrahlung auf deren Zellwachstum, Proliferation, Apoptoserate sowie Zytokinfreisetzung (IL-15, IL-1 β , IL-6, IL-10, KC, TNF- α) und mRNA Level entzündlicher Mediatoren wurden durchgeführt. Auch konnte die Osteoblasten-Kultur sowie eine Osteoblasten/Osteoklasten Co-Kultur erfolgreich etabliert werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die IPT-Daten der Radonbadpatienten und die IPT-Methode werden aktuell zur Publikation vorbereitet. Des Weiteren werden mit Hilfe eines Statistikers Korrelationsanalysen mit klinischen Daten einzelner Patienten durchgeführt, um ein individuelles Therapieansprechen mit immunologischen Parametern verbinden zu können. Außerdem werden die Zytokinanalysen beendet sowie mit der Bestimmung der Transkriptions- und Telomerase-Aktivität begonnen. Auf Basis der vielversprechenden Ergebnisse soll in Zukunft eine weitere Radonstudie stattfinden, welche auch eine Placebo-Gruppe enthält. Da nun klinische Langzeitdaten von Niedrigdosis-Strahlentherapie-Patienten vorliegen, wird der Ethikantrag für diese IPT-Studie gestellt werden. Präklinisch werden detaillierte histomorphologische Analysen in den Gelenken hTNF- α transgenen Mäusen nach 2x0.5Gy Bestrahlung durchgeführt werden. Zusätzlich soll ein weiteres entzündliches Tiermodell (KBxN-Serum induzierte Arthritis) in Analogie untersucht werden. Die geplanten Analysen mit hTNF- α transgenen Mäusen nach Radonexposition werden durchgeführt sobald der Tierversuchsantrag genehmigt vorliegt. Zusätzlich zu *TRAP* und *Cathepsin K* sollen weitere Osteoklastenmarker mittels qPCR untersucht werden. Wiederholungsversuche mit *Fibroblast-like synoviocytes* werden gemacht, ebenso Experimente zum Einfluss von niedrig dosierter Röntgenstrahlung auf den Phänotyp von Osteoblasten und Osteoblasten/Osteoklasten Co-Kulturen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Gaipl US et al. Kill and spread the word: stimulation of antitumor immune responses in the context of radiotherapy. *Immunotherapy*. 2014 6(5):597-610.

Wunderlich R et al. Low and moderate dose of ionising radiation up to 2 Gy modulates transmigration and chemotaxis of activated macrophages, provokes an anti-inflammatory cytokine milieu, but does not impact on viability and phagocytic function. *Clin Exp Immunol*. 2014 Apr 14.

Kulzer L et al. Norm- and hypo-fractionated radiotherapy is capable of activating human dendritic cells. *J Immunotoxicol*. 2014 Feb 10. ---- Ott OJ et al. The Erlangen Dose Optimization Trial for radiotherapy of benign painful shoulder syndrome. Long-term results. *Strahlenther Onkol*. 2014 190(4):394-8.

Ott OJ et al. The Erlangen Dose Optimization trial for low-dose radiotherapy of benign painful elbow syndrome. Long-term results. *Strahlenther Onkol*. 2014 190(3):293-7.

Zuwendungsempfänger: Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter		Förderkennzeichen: 02 NUK 024A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 310.026,00 EUR	Projektleiter: 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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.1: Für die Generierung der Proteom-Profile mit Hilfe der 2D-DIGE-Analyse wurden 2 strahlenüberempfindliche und eine normale lymphoblastoide Zelllinie kultiviert, mit 1 Gy und 10 Gy (¹³⁷Cs-Quelle) bestrahlt und 4 h und 24 h post-Bestrahlung für die 2D-Proteomanalyse mit eingegrenzten pH-Bereichen (pH 4-7, pH 6-10 und pH 3-10) geerntet (4 biologische Replikate). Die 24 h- Proben wurden im Vergleich zur Kontrolle analysiert. Es wurden zwischen 5 und 69 Proteine detektiert, die 24 h nach Bestrahlung mit 1 Gy oder 10 Gy signifikant reguliert sind, wobei die überempfindlichen Linien, im Vergleich zu der resistenten Linie eine größere Anzahl von Proteinänderungen aufwiesen. Ein Vergleich der Linien untereinander zeigte, dass der interindividuelle Unterschied, im Vergleich zur intraindividuellen Varianz auf Proteinebene sehr hoch war. Hier wurden 581 Proteine (Kontrollen) und 567 Proteine (10 Gy 24 h) unterschiedlich exprimiert. Die Proben wurden massenspektrometrisch analysiert. Eine Wiederholung der Massenspektrometrie für nicht signifikant identifizierte Proteine wird momentan durchgeführt, um die Kandidatenproteine zu vervollständigen.
- AP1.2: Es werden im Moment die mittels Proteomanalyse ermittelten Kandidatenproteine Proteasome activator complex subunit 1, Heterogeneous nuclear ribonucleoprotein H, RuvB-like 1/2, RNF20, MYCBP2, Nbs1, Mcm7, SOD2, SerpinB9 und Atm im Westernblot in lymphoblastoiden Zelllinien und primären Lymphozyten getestet. Eine Vielzahl der getesteten Proteine ist an der Proteindegradation beteiligt. Die Proteindegradation scheint, basierend auf den bisherigen Ergebnissen intra-individuell und inter-individuell eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung der Zellfunktion nach ionisierender Strahlung zu spielen und soll im Westernblot überprüft werden.
- AP1.3: Die Zelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression werden von AP2 generiert.

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

Das erste Jahrestreffen 2014 des ZiSS-Verbundes fand am 16. Mai 2014 beim Verbundpartner Verena Jendrossek im Institut für Zellbiologie am Universitätsklinikum Essen statt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Am 30. Juni wurde das Manuskript mit dem Titel "THE INTER-INDIVIDUAL VARIABILITY OUTPERFORMS THE INTRA-INDIVIDUAL VARIABILITY OF DIFFERENTIALLY EXPRESSED PROTEINS PRIOR AND POST IRRADIATION IN LYMPHOBLASTOID CELL LINES" (Autoren: A. Gürtler, M. Hauptmann, S. Pautz, U. Kulka, A. A. Friedl, S. Lehr, S. Hornhardt, M. Gomolka) in Archives Of Physiology And Biochemistry zur Publikation eingereicht und wurde zur Veröffentlichung angenommen.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 024B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 377.780,00 EUR	Projektleiter: Dr. Unger	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern: siehe Förderkennzeichen 02NUK024 A bis E.

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

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

Im Berichtszeitraum wurde bereits ein in AP6 generierter strahlenresistenter Zellklon für weitere Untersuchungen in AP2 erhalten. Ein technischer Assistent aus der HMGU Abteilung Strahlenzytogenetik wurde im Rahmen eines einwöchigen Laborbesuchs in der „Group of Computational Modelling in Medicine“ an der Charité Berlin in die Vorbereitung, Stimulation und Präparation von Zellen für die Luminex Magpix Analyse eingearbeitet. Dabei wurden zwei HNSCC Zelllinien gemessen, wobei diese Messung in den Labors der HMGU wiederholt wurde. Durch diese technische Replikation kann die experimentelle Varianz der gemessenen Daten errechnet werden um dann in der Modellierung über Likelihood in AP4.2 verwendet werden.

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) (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:

Es wurden 39 Subklone aus primären Zelllinien des Kopf-Hals-Bereichs (aus Tumor- und Normalgewebe) generiert, welche derzeit phänotypisch charakterisiert werden. Kein Klon zeigte nach qRT-PCR endogene FancA-mRNA-Überexpression. Mit Array CGH konnte gezeigt werden, dass die Zellen nicht aus Normalgewebe hervorgegangen sind. Die von AP6 erhaltenen HNSCC-Zelllinien wurden mittels Array-CGH und SKY hinsichtlich genomischer Kopienzahl und chromosomaler Rearrangierungen charakterisiert. Eine der HNSCC-Zelllinien wurde für die Einbringung induzierbarer Targetgen-Expression (FancA und MCM7) ausgewählt und derzeit Transduktionsexperimente (lentivirales System) durchgeführt.

Aus den globalen Transkriptomdaten der FancA-überexprimierenden- und Vektorkontroll-Zellen nach drei Zeitpunkten nach Bestrahlung (4 Gy/sham) wurden die differentiell exprimierte Gene identifiziert

Die Transkriptomdaten der LUCY Zelllinien wurden zunächst einer Primäranalyse unterzogen und nach „spline regression“ Analyse differentiell exprimierte Gene identifiziert. Genomische DNA von beiden Zelllinien wurden auf Methylierungs-Arrays hybridisiert und als nächstes prozessiert.

Ein strahlenresistenter HNSCC Zellklon und dessen Parentalzelllinie (von AP6) wird derzeit charakterisiert.

AP3:

Die Datenanalyse der LUCY Zelllinien hinsichtlich arrayCGH und Transkriptom (zeitaufgelöst) wurde durchgeführt, wobei die Strahlenantwort der strahlenhypersensitiven im Vergleich zu der normal-sensitiven Zelllinie auf Transkriptomenebene wesentlich stärker ausgeprägt war. Die arrayCGH Profile zeigten kaum genomische Kopienzahlveränderungen.

Aus den Transkriptomdaten wurden die genregulatorischen Netzwerke errechnet.

Die Integration der genomischen Kopienzahl mit der Transkriptomenebene wird derzeit durchgeführt.

Beim 1. Halbjahres-Meeting 2014 in Essen (Institut für Zellbiologie, Essen) haben für AP2/3 Igor Gimenez Aznar, Julia Heß, Agata Michna, Kristian Unger und Horst Titzelsberger teilgenommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Charakterisierung der generierten Subklone primärer Zelllinien des Kopf-Hals-Bereichs. Generierung und omics Analyse weiterer Zelllinien mit regulierter Targetgen-Expression (FancA und MCM7)

AP3: Die Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm, mit Fokus auf Rekonstruktion eines integrativen „Frameworks“ für die Identifizierung möglicher therapeutischer Zielmoleküle.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Posterpräsentationen EACR Jahrestagung 2014, 5.-8. Juli 2014, München: Identification of molecular targets and signaling networks that influence hypersensitivity and resistance to ionizing radiation (ZiSS): A. Michna et al.
FANCA overexpression confers radioresistance to cells of head and neck squamous cell carcinoma: I. Igor Gimenez-Aznar et al.

Posterpräsentation DEGRO 2014, 3.-5. Juli 2014, Düsseldorf: Identification of molecular targets and signaling networks that influence hypersensitivity and resistance to ionizing radiation (ZiSS): A. Michna et al.

Vorträge DEGRO 2014, 3.-5. Juli 2014, Düsseldorf: Charakterisierung der Strahlensensibilität durch Multi-Level Datenintegration und Netzwerk-rekonstruktion. K. Unger

FANCA overexpression confers radioresistance to cells of head and neck squamous cell carcinoma. J. Heß

Erstellung eines Manuskripts: FANCA overexpression confers radioresistance to cells of head and neck squamous cell carcinoma. Verena Zangen et al. Geplante Einreichung b. J. „Oncotargets“ bis September 2014.

Zuwendungsempfänger: Klinikum der Universität München, Marchioninstr. 15, 81377 München		Förderkennzeichen: 02 NUK 024C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 328.608,00 EUR	Projektleiter: 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

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

AP6.2: *In vitro*-Analyse der Strahlenwirkung nach Modulation durch Substanzen, die zielgerichtet in Signalwege angreifen, die im Rahmen des Projektverbundes als potentielle Zielstrukturen für eine therapeutische Manipulation der Strahlenempfindlichkeit identifiziert wurden (LMU/ CUB)

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die wissenschaftliche Postdoc Angestellte, die für die Bearbeitung dieses Projekts eingestellt wurde (Dr. Linda Kinzel), befindet sich seit Februar 2014 im Krankenstand. Von daher konnte das Projekt nicht weiter bearbeitet werden. Ein Gespräch mit Frau Dr. Kinzel ergab, dass sie aus gesundheitlichen Gründen den zum 30.08.2014 auslaufenden Arbeitsvertrag nicht verlängern kann. Wir werden daher versuchen, zum 01.09.2014 einen neuen PostDoc Mitarbeiter (m/w) zu finden, um die Arbeiten fortzusetzen. Wir schätzen die bisherige Verzögerung im Arbeitsprogramm auf etwa 3 Monate.

Sonstiges:

Das 1. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 16.5.2014 in Essen statt und wurde von AP5 (Prof. Jendrossek) ausgerichtet. Daran hat für AP6 Kirsten Lauber teilgenommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Das formulierte Arbeitsprogramm für AP6 wird wie geplant weiter bearbeitet, sobald ein neuer PostDoc Mitarbeiter (m/w) gefunden ist.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen		Förderkennzeichen: 02 NUK 024D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 364.656,00 EUR	Projektleiter: 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, Epi-genom, (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 strahlensensitivitätsmodulierender 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

Arbeiten des IFZ in AP5.1 und 5.2: Aus den bisher 10 getesteten Zelllinien konnten zwei weitere in vitro strahlenresistente HNSCC Zelllinien als geeignete Kandidaten für die geplanten in vivo-Untersuchungen zur Strahlensensitivitätsmodulation identifiziert werden. Die 4 bislang in vivo getesteten Zelllinien variieren in ihrer in vivo Strahlensensitivität. Die transiente Expression eines potentiell Radiosensitivitäts-modulierenden Kandidaten-Gens in einer tumorigenen HNSCC Zelllinie führte zu einer tendenziellen Steigerung der Strahlenresistenz dieser Zellen in vitro und in vivo. In aktuellen Arbeiten (AP2) wird diese Zelllinie für die Generierung von Sublinien mit regulierter Expression potentiell Strahlen-sensitivitäts-modulierender Gene für die weiteren in vitro und in vivo Untersuchungen in AP6.2 verwendet. Weiterhin wurden zwei der tumorigenen Zelllinien ausgewählt, um in vivo strahlenresistente Zellen zu generieren. Hierzu wurden die Zellen auf subkutan in NMRI-Nacktmäuse implantiert und bei einem Erreichen der Tumorgroße von 100 mm³ mit 10Gy bestrahlt. Nach weiteren 6 Tagen wurden die Tumore isoliert und das Gewebe zur Zellgewinnung einem Kollagenase-Verdau unterzogen. Die resultierenden Zellkulturen werden aktuell in vitro expandiert und anschließend einer 2. Bestrahlungsrunde in vivo zugeführt.

Arbeiten des IFZ in AP6.3: Die beiden in AP5.2 zusätzlich für die in vivo Untersuchungen als geeignet identifizierten HNSCC Zelllinien wurden für die in vivo Analysen möglicher radiosensibilisierender Effekte eines in vitro radiosensibilisierenden small molecule Inhibitors eingesetzt. Hierzu wurde die Kombinationstherapie aus Bestrahlung und der Gabe des small molecule Inhibitors mit den Effekten der Einzeltherapien und einer Lösungsmittelkontrolle im Xenograftmodell verglichen. Dabei wurde für beide Zelllinien jeweils die Zeit bis zum Erreichen eines Tumorumfanges von 1000 mm³ in vier Gruppen untersucht: i) Lösungsmittelkontroll-behandelte Tiere, ii) Inhibitor-behandelte Tiere, iii) Tiere mit Lösungsmittelkontroll-Behandlung plus Bestrahlung, iv) Tiere mit Inhibitor-Behandlung plus Bestrahlung. Die Experimentalreihen sind abgeschlossen. In Analogie zu den beiden ersten getesteten Zelllinien (vgl. Zwischenbericht 2013/2) konnte keine Radiosensibilisierung in vivo erreicht werden. Aus den histologischen Untersuchungen der aufgearbeiteten Gewebe haben sich bislang keine eindeutigen Gründe für die unterschiedliche Effektivität der Kombinationstherapie in vitro und in vivo ergeben; allerdings deuten diese darauf hin, dass in den Tumorgeweben der small molecule Inhibitor-behandelten Tiere weniger nekrotische Bereiche vorkommen. In aktuellen Untersuchungen wird der Einfluss der Behandlungen auf die Expression Inhibitor-assoziiierter Signalwege untersucht; außerdem werden weiterführende histologische und proteinbiochemische Untersuchungen an den Tumorproben durchgeführt.

Das 1. Halbjahres-Meeting des Verbundes wurde am 16. Mai 2014 im Institut für Zellbiologie in Essen durchgeführt. Für das AP5 nahmen Verena Jendrossek und Diana Klein teil.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Wirsdörfer F, et al.: V. Thorax irradiation triggers a local and systemic accumulation of immunosuppressive CD4⁺ FoxP3⁺ regulatory T cells. *Radiation Oncology* Apr 25; 9(1):98 (2014).

I. Gimenez-Aznar, et al.: FancA overexpression confers radioresistance to cells of head and neck squamous cell carcinoma. *Strahlenther. Oncol.* 2014;190 S1:29 (publiziertes Abstract)

I. Gimenez-Aznar, et al.: FancA overexpression confers radioresistance to cells of head and neck squamous cell carcinoma *Eur J Canc.* 2014;50:229 (publiziertes Abstract)

Zuwendungsempfänger: Charité – Universitätsmedizin Berlin, Charitéplatz 1, 10117 Berlin		Förderkennzeichen: 02 NUK 024E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 375.564,00 EUR	Projektleiter: 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

Es wurden Perturbationsdaten für zwei Zelllinien generiert, um die Signalnetzwerke, bei denen ein Einfluss auf die Strahlenresistenz bzw. -empfindlichkeit dieser Zellen vermutet wird, mit Hilfe des neu beschafften Luminex/Bioplex-Systems erstellt. Ein technischer Mitarbeiter des HMGUs wurde darin geschult, die Versuche auch in München durchzuführen. Dadurch wurde in München ein äquivalenter Datensatz generiert, der es uns nun erlaubt, genauere Erkenntnisse zur Reproduzierbarkeit und Variabilität der Messungen zu erlangen, die dann in der Modellerstellung genutzt werden können. Hier geht die Variabilität in das Likelihood ein, das zur Modellparametrisierung und -Selektion benutzt wird (AP4.2). Es wurden basierend auf den Daten erste Modelle generiert, diese werden derzeit noch verfeinert, und insbesondere die Modellselektion und -parametrisierung wird um die Methode des Profile-Likelihoods erweitert. Die Rekonstruktionsansätze für genregulatorische Netzwerke wurden um eine Methode erweitert, die es erlaubt ChIP-Seq-Datensätze zu integrieren (AP4.5). Die Messung der beiden Zelllinien wurde im Rahmen einer Geräteetablierung am HMGU nachgemessen, wobei die an der Charité generierten Daten bestätigt werden konnten.

4. Geplante Weiterarbeiten

Aus den erhobenen Daten werden nun erste robuste mathematische Modelle erstellt, die dann verglichen werden, um die Signalnetzwerke, welche die Strahlensensitivität und -Resistenz beeinflussen, genauer zu entschlüsseln. Diese Modelle werden dann auch eingesetzt, um weitere Experimente zu planen und dann diese Experimente wiederum benutzt, um die Modelle zu verfeinern. Insbesondere soll hier dann ein breiteres Zelllinienpanel benutzt werden sowie die induzierbaren Zelllinien (AP4.3). Sobald die Genexpressionsdaten vorliegen, werden die Rekonstruktionsalgorithmen auf diese angewendet (AP4.5).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 025A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 361.107,00 EUR	Projektleiter: 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 α -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 γ - 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

Zur Untersuchung des Einflusses von dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die embryonale Myokardbildung wurden kardiale Differenzierungsprotokolle etabliert. Diese basieren auf der Verwendung von humanen embryonalen Stammzellen der Linie WA09 (H9) und wurden mittels Real time-PCR validiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Modulation des Wnt-Signalwegs unter Verwendung eines Protokolls nach X. Lian et al. (Nature Protocols 8, 2013, 162-175) *in vitro* zu einer robusten Bildung von Kardiomyozyten führt. Die Differenzierung erfolgte über Zwischenstadien wie dem Mesoderm, dem kardialen Mesoderm und kardialer Vorläuferzellen. Studien zur Expression kardialer Proteine und mikroRNAs sind in Vorbereitung.

Nach der erfolgreichen Erweiterung des für die Arbeiten mit hES-Zellen erforderlichen Ethikantrags konnte mit der entodermalen Differenzierung der hES-Zellen nach K. A. D'Amour et al. (Nature Biotechnology 11, 2006, 1392-1401) sowie mit der Charakterisierung der Differenzierungsprodukte begonnen werden. Erste Versuche mit Röntgenstrahlen zeigten, dass die Differenzierung in definitives Entoderm, aus dem sich Organe wie die Lunge, die Leber und die Bauchspeicheldrüse bilden, je nach Zeitpunkt der Bestrahlung gehemmt wurde. Bestrahlungsversuche mit Kohlenstoffionen lieferten erste Proben für die Chromosomenanalyse und ein Bestrahlungsversuch mit Kohlenstoffionen ist derzeit in Vorbereitung und wird Ende Juli durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Derzeit werden Vorbereitungen für Bestrahlungsversuche mit Kohlenstoffionen getroffen, um die Auswirkungen von Schwerionenstrahlung auf die entodermale Differenzierung von hES-Zellen untersuchen zu können. Ebenfalls fortgeführt wird die gerichtete Differenzierung von hES-Zellen der Linie WA09 in Kardiomyozyten durch Modulation des Wnt-Signalwegs. Hier steht die Etablierung der WA09-Sublinie H9-hTnnTZ-pGZ-D2 im Vordergrund, die die direkte Detektion Troponin-positiver Kardiomyozyten in der Zellkultur mittels GFP-Expression erlaubt. Ebenso wird die Etablierung der Zelllinien HUES-2 und 3, die besonders für die kardiale Differenzierung geeignet sind, vorangetrieben. Ein Vergleich der Zelllinien mit der Linie WA09 erlaubt so, strahlenbedingte Effekte von zelllinienspezifischen Effekten zu unterscheiden, eine für die weitere Bewertung und Publikation der Ergebnisse unerlässliche Voraussetzung.

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Beck S., Ciliberti, G., Gleditsch, D., Radiosensitivity of mouse embryonic stem cells, Praktikumsbericht Mastermodul Strahlenbiophysik, Technische Universität Darmstadt (2014).

Bifl M., Ritter S., Kadereit S., Influence of ionizing radiation on early human brain development, GSI Report 2014-1 (in press).

Fuetterer S., Etablierung eines Protokolls zur kardialen Differenzierung der humanen embryonalen Stammzelllinie WA09, Bachelorarbeit, Hochschule Darmstadt, Fachbereich Chemie- und Biotechnologie (2014).

Kulish I., Auswirkungen ionisierender Strahlung auf die *in vitro*-Differenzierung von humanen embryonalen Stammzellen, Bachelorarbeit TU Darmstadt, Studiengang Molekulare Biotechnologie (2014).

Luft S., Pignalosa D., Nasonova E., Arrizabalaga O., Helm A., Durante M., Ritter S., Fate of D3 mouse embryonic stem cells exposed to X-rays or carbon ions, Mutation Research 760:56-63 (2014).

Luft S., Schroeder I.S., Hessel P., Arrizabalaga O., Layer P.G., Durante M., Ritter S., Preparatory experiments to investigate the radiosensitivity of human embryonic stem cells, GSI Report 2014-1 (in press).

Mayer M., Ritter S., Thielemann C., Electrophysiological effects of ionising radiation on cortical rat neurons *in vitro*, GSI Report 2014-1 (in press).

Schroeder I.S., Luft S., Hessel P., Durante M., Ritter S., Human embryonic stem cells: an ideal model for the risk assessment of ionizing radiation during early embryo development, GSI Report 2014-1 (in press).

Zuwendungsempfänger: Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Anton-Günther-Str. 1, 72488 Sigmaringen		Förderkennzeichen: 02 NUK 025BX
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2013 bis 30.09.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 170.268,00 EUR	Projektleiter: Dr. Kadereit	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das wissenschaftliche Anliegen dieses Teilprojektes ist es genauer zu untersuchen wie sich dünn ionisierende Röntgenstrahlung und dicht ionisierende Teilchenstrahlung auf die Entwicklung des menschlichen Nervensystems auswirken. Und zu vergleichen, ob in den Auswirkungen der beiden Strahlungsarten Unterschiede bestehen. Von Mausstudien und Versuchen mit Zelllinien ist bekannt, dass geringe Bestrahlung bereits zu Veränderungen in Genexpressionsmustern in Nervenzellen führen. Es soll nun anhand von hES-Zellen und abgeleiteten *in vitro* Nervensystem-Entwicklungsmodellen genau untersucht werden, inwieweit sich Bestrahlung auf die Entwicklung des menschlichen Gehirns auswirkt und welche Effekte man auf die verschiedenen Entwicklungstadien (Entstehung der ZNS Vorläuferzellen, NEPs, Entstehung von neuralen 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

Das Neurosphärenmodell ist an der Hochschule etabliert und es werden routinemäßig WA09 (H9) Zellen neural differenziert. Dabei werden die embryonalen Stammzellen zuerst adhärent zu neuroepithelialen Vorläuferzellen (NEPs, erste Gehirnvorläuferzellen) differenziert und anschließend im Neurosphärenmodell weiter zu, unter anderem, Neuronen gereift. Im Rahmen einer inzwischen abgeschlossenen Masterarbeit wurden auch humane induziert pluripotente Stammzellen (hiPSC, aus Nabelschnurblut) im Neurosphärenmodell differenziert, um eventuell vergleichen zu können wie hiPSC im direkten Vergleich mit H9 Zellen Strahlenschäden verarbeiten. Dies würde es ermöglichen eventuell in großangelegten Studien und Screenings hiPSCs statt hESCs zu benutzen, da in Deutschland Anwendung von hESCs gesetzlich beschränkt ist. Dabei hat sich gezeigt, dass die benutzte Zelllinie (UCB44) nicht so gut wie die H9 Zelllinie neural differenziert. Vielmehr war schon die Differenzierung zu NEPs

nicht effektiv, mit anschließender Generation von kleineren und schlecht wachsenden Neurosphären. Expression von neuronalen Marker-Genen war auch weniger effektiv als in der H9-Differenzierung.

Es haben weiterhin bereits zwei Strahlenexperimente in Darmstadt stattgefunden. Ein Röntgenexperiment sowie ein Kohlenstoffionen-Experiment. Es wurden H9 und NEPs bestrahlt. Die NEPs wurden anschließend auch noch zu Neurosphären angesetzt. Bei diesen Versuchen handelte es sich vor allem darum, erst einmal die Dosis-Ränge zu definieren und logistische Probleme zu identifizieren. Z. B. um heraus zu finden inwieweit die Zellen den weiten Weg ohne zu große Schäden transportiert werden können. Die Auswertungen finden noch statt. Es zeichnen sich allerdings schon Effekte auf die Genexpression von neuronalen Marker-Genen ab. Des Weiteren vertragen die Zellen ohne größeren Schaden eine Fahrt. Ein Rücktransport der Zellen nach der Bestrahlung ist allerdings nicht mehr möglich. Die Zellen müssen somit vor Ort weiter verarbeitet werden bzw. differenziert werden.

Es wurden auch Vorversuche mit Aschaffenburg durchgeführt, wobei Neurosphären aus H9 Zellen nach Aschaffenburg gebracht wurden, um dort auf sogenannten micro array electrode Chips (MEA-Chips) aufgetragen wurden. Die Neurosphären wuchsen relativ problemlos an und es wuchsen Zellen aus die Neuronen sein könnten. Es muss nun genauer untersucht werden, ob Ströme abgeleitet werden können. Das Erfassen von elektrischer Aktivität von Neuronen nach Bestrahlung und während der Differenzierung wird ein wichtiger funktioneller Readout sein. Veränderte elektrische Aktivität kann dramatische Effekte auf die Gehirnentwicklung und -funktion haben.

4. Geplante Weiterarbeiten

Es werden vor allem die Systeme 1 und 3 weiter benutzt, da es sich als schwierig erweist, Modelle 4 und 5 an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen zu etablieren. Es wird aber eine Alternative entwickelt, wie z. B. Migration aus Neurosphären anstelle von Modell 4. Dies ist ein etablierter Assay um Migrationsfähigkeit von Neuronen zu testen (Moors et al., Toxicol Appl Pharmacol 221:57). Modell 5 wird durch Generation von Neuronen aus Neurosphären ersetzt. Dies konnte bereits an der Universität Konstanz erreicht werden und wird an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen etabliert. Weiterhin wird Modell 2 etabliert und charakterisiert werden. Erste Strahlenversuche werden aber in diesem System erwartungsgemäß erst Anfang 2015 stattfinden können.

Es ist auch ein neues Mikroskop bestellt worden, welches ermöglichen wird, gefärbte Neurosphären morphologisch vor Ort zu untersuchen, statt sie nach Dortmund zu schicken. Das Mikroskop wird Ende des Jahres einsatzbereit sein und es wird dann begonnen, das Imaging von Neurosphären zu optimieren. Es kann dann bestimmt werden, ob sich die Zusammensetzung an neuronalen Zelltypen nach Bestrahlung ändert (mehr oder weniger Neuronen).

Im Herbst werden die 'chronischen'-Bestrahlungs-Versuche mit Röntgenstrahlen am Gerät an der Uni Konstanz beginnen. Das Gerät ist noch nicht für chronische Bestrahlung einsatzbereit, da es an der Uni Konstanz Verzögerungen beim Umzug des Labors, welchem das Gerät gehört, gegeben hat sowie beim Aufbau des Gerätes selber. Die Studien mit hiPSCs werden im Hintergrund weitergeführt und es wird versucht werden eine hiPSC-Zelllinie zu identifizieren, die equivalent zur H9 Zelllinie neural differenziert.

Die Versuche mit Aschaffenburg werden weitergeführt, um die Bedingungen für elektrische Ableitung von Neurosphären und Neuronen zu optimieren. Dafür wird auch das Neurosphärenmodell so weiter optimiert und standardisiert, um ein Versenden der Zellen zu ermöglichen.

Es wird auch ein neuer, funktioneller Readout in die Auswertung von Strahlenschäden integriert werden. In der Gruppe von Professor Bergemann an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen ist die Charakterisierung von Effekten von Strahlung (UV) auf die mitochondriale Funktion etabliert. Es wird getestet werden ob auch radioaktive Bestrahlung, vor allem im niedrigen Dosis-Bereich, im neuronalen Differenzierungs-System mitochondriale Schäden hervorruft und ob diese vielleicht schon messbar sind, bevor stärkere Schäden wie Genotoxizität messbar sind.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Hochschule für angewandte Wissenschaften – Fachhochschule Aschaffenburg, Würzburger Str. 45, 63743 Aschaffenburg		Förderkennzeichen: 02 NUK 025C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 3		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2012 bis 31.01.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 186.606,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Thielemann	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das vorrangige wissenschaftliche Anliegen des Projektes ist es, zu einem besseren Verständnis der zytotoxischen und gentoxischen Wirkung ionisierender Strahlung während der pränatalen Entwicklung des Menschen beizutragen. Als In-vitro-Modell werden humane embryonale Stammzellen (hES-Zellen) verwendet. Im Forschungsvorhaben soll dabei die Wirkung von dünn ionisierender Röntgenstrahlung und dicht ionisierender Teilchenstrahlung in Abhängigkeit von der Dosis untersucht werden. Dicht ionisierende Strahlung hat bei gleicher Energiedosis eine höhere biologische Effektivität als dünn ionisierende Strahlung. Dies führte dazu, dass für α -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 γ - oder Röntgenstrahlen im Ansatz untersucht, jedoch fehlen weitergehende Kenntnisse über die Genauigkeit der Reparaturprozesse in Abhängigkeit von der Dosis und der Strahlenqualität. Neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn leistet das Forschungsvorhaben einen wichtigen Beitrag zur Nachwuchsförderung und zum Kompetenzerhalt in der Strahlenforschung. Die jungen Projektmitarbeiter erhalten eine intensive wissenschaftliche Aus- bzw. Weiterbildung in der Strahlenforschung und in Fortbildungsveranstaltungen wird um potenziellen wissenschaftlichen Nachwuchs geworben.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundvorhaben beinhaltet die folgenden Arbeitspakete (Teilprojekte):

- AP1: Untersuchung der Wirkung von Röntgen- und Ionenstrahlen auf pluripotente und differenzierte hES-Zellen (GSI Helmholtzzentrum, Dr. S. Ritter)
- AP2: Bewertung des Einflusses dünn und dicht ionisierender Strahlung auf die neuronale Entwicklung (Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Dr. S. Kadereit).
- AP3: *Elektrophysiologische Untersuchung kardialer und neuraler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. Dr. C. Thielemann).*

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wie bereits im letzten Zwischenbericht erwähnt, wurden die Versuche mit primären kortikalen Neuronen aus der Ratte weitergeführt. Hierfür wurden zunächst Protokolle für diverse Antikörperfärbungen (z. B. γ H2AX und MAP2) etabliert. In einem ersten Versuch wurde die Induktion und Reparatur von DNA Schäden in neuronalen Zellen infolge einer Exposition mit Röntgenbestrahlung an Hand der Bildung von γ H2AX-Foci untersucht. Die Zellen wurden hierfür auf Coverslips kultiviert und nach 21 Tagen in Kultur einer Exposition mit Röntgenstrahlung ausgesetzt. Die hierbei verwendeten Strahlendosen betragen 1 Gy und 2 Gy (90 kV, 33,7 mA). Es konnte von anderen Arbeitsgruppen bereits gezeigt werden, dass sich die Anzahl der Foci in vitro proportional zur Strahlendosis verhält (P. Rogakou et al., J. Biol. Chem. 273, 1998, 5858-5868). Dies konnte auch bei den hier untersuchten neuronalen Zellen beobachtet werden. 30 Minuten nach der Bestrahlung wurden durch eine Dosis von 1 Gy etwa 11 und durch eine Dosis von 2 Gy etwa 20 DNA-Doppelstrangbrüche pro Nucleus induziert. 24 Stunden nach der Bestrahlung waren nur noch vereinzelt Doppelstrangbrüche nachweisbar. Diese Reparaturkinetik entspricht interessanterweise der bereits bekannten Kinetik von humanen Fibroblasten (M. Sokolov et al., Oncogene 24, 2005, 7257-7265). Des Weiteren scheint es in der neuronalen Zellkultur eine Subpopulation zu geben, die keine FOCI ausbildet.

Zusätzlich zu den Versuchen mit den kortikalen Neuronen aus der Ratte, wurde an einem Protokoll für die Aussaat und Kultivierung humaner iPS Neuronen auf MEA Chips gearbeitet. Die zunächst verwendeten iPS Neurone der Firma Axol Bioscience erwiesen sich für unsere Versuche als nicht geeignet. Alternativ dazu wurden die humane iPS Neurone der Firma Cellular Dynamics, die sogenannten iCell neurons, untersucht. Die Etablierung des Protokolls erwies sich auch hier als problematisch. Durch einige Optimierungen konnte bei diesen Zellen nun jedoch ein Protokoll etabliert werden, mit dem die Zellen auf den MEA Chips kultiviert und elektrophysiologisch abgeleitet werden können. Nach erfolgreicher Etablierung des Protokolls werden die iCell neurons für eine Schwerionenbestrahlung mit Kohlenstoff Ende Juli 2014 an der GSI vorbereitet.

Des Weiteren konnten erste Vorversuche mit den von Frau Kadereit aus Sigmaringen bereit gestellten Neurospheres, die aus einer H9-Zelllinie nach dem Protokoll von Thomson et al. (J. Thomson et al., Science 282, 1998, 1145-1147) differenziert wurden, durchgeführt werden. Die Neurospheres wurden auf die MEA Chips aufgebracht und über einen Zeitraum von einer Woche kultiviert. Dabei zeigten sich ein gutes Adhäsionsverhalten der Zellen und neuronale Auswüchse über das Elektrodenfeld. An vereinzelt Elektroden konnten hierbei bereits einige Signale gemessen werden. Für weitere Versuche ist jedoch eine Optimierung des Protokolls erforderlich.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Versuche mit kortikalen Neuronen aus der Ratte werden weitergeführt. Hierzu ist es zunächst erforderlich die Kultivierungsprobleme der Neurone auf den MEA Chips zu beheben oder alternativ Neurone von einem anderen Anbieter zu verwenden. Anschließend sollen weitere Versuche mit Röntgenbestrahlung durchgeführt werden, um die bisher generierten Ergebnisse (siehe letzter Zwischenbericht) zu verifizieren. Neben den bisher verwendeten Strahlendosen von 1 Gy und 2 Gy, sollen nun auch Dosen von 0,5 Gy und 7 Gy verwendet werden um das Bild zu vervollständigen. Die elektrophysiologischen Signale der iPS Neuronen sollen infolge einer Exposition mit Röntgen- und Schwerionenbestrahlung analysiert werden. Weitere Versuche mit den Neurospheres aus Sigmaringen sind ebenfalls geplant. Nach der erfolgreicher Optimierung des Protokolls sollen auch mit diesen Zellen Röntgenexperimente durchgeführt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Mayer M., Ritter S., Thielemann C.: Electrophysiological effects of ionising radiation on cortical rat neurons in vitro, GSI Report 2014-1 (in press).

J. Frieß, A. Heselich, Sylvia Ritter, A. Haber, N. Kaiser, PG. Layer, C. Thielemann: Electrophysiologic and Cellular Characteristics of Cardiomyocytes after X-ray Irradiation, (to be submitted) in 2014.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 026A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.059.340,00 EUR	Projektleiter: Dr. Jacob	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Für die Dosisverteilung im ganzen Körper nach Anwendung von Therapieverfahren gegen Brustkrebs (AP2) sollen die Partner bei der Erstellung der Patientenmodelle beraten werden.

Die Bestimmung der Ganzkörper-Dosisverteilung bei verschiedenen Untersuchungsverfahren des Herzens (AP3) soll patientenspezifisch durchgeführt werden. Dazu sind individuelle biokinetische Modelle zu erstellen, mittels derer die zeitliche und räumliche Verteilung der PET- und SPECT-Tracer in den Organen bestimmt werden kann. Außerdem sind aus den CT-Datensätzen der jeweiligen Patienten individuelle virtuelle Modelle zu erzeugen, um durch Kombination mit Monte-Carlo-Transport-Rechnungen die Dosen in jedem Organ relativ zur Aktivität berechnen zu können (SAFs). Durch Kombination der biokinetischen Modelle mit den SAFs lässt sich sowohl der zeitliche Dosisverlauf jedes Organs des Patienten bestimmen, wie auch dessen gesamte Strahlendosis.

Für die Risikomodelle (AP4) werden sowohl empirische Modelle des relativen und absoluten Risikos, wie auch mechanistische Modelle der Pathogenese unter Berücksichtigung individueller Risikofaktoren entwickelt. Es werden Risiken für Herz-Kreislaufkrankungen, für Leukämie und für solide Tumoren in Darm, Lunge, Magen, Schilddrüse, Speiseröhre und weiblicher Brust modelliert.

AP5 implementiert die Ergebnisse von AP1-4 in numerisch effizienter Weise als zwei Anwendungen mit graphischer Benutzeroberfläche. Dabei werden neben den Risikowerten auch die entsprechenden Unsicherheitsintervalle berechnet.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen von AP2 wurde von der Universität Mainz beobachtet, dass es einen signifikanten Unterschied zwischen der gemessenen und der von der Bestrahlungssoftware vorhergesagten Dosisverteilung gibt. Um außerdem die Dosis in den einzelnen Bereichen des Herzens besser ermitteln zu können, wird ein Herzmodell mit höherer als der bisherigen Auflösung benötigt. Ein geeigneter Datensatz wurde von der TU München bereitgestellt. In der AMSD hat die Segmentierung des Datensatzes dazu bereits begonnen und sollte in den nächsten Monaten fertiggestellt werden.

Innerhalb des AP3 wurde am Klinikum rechts der Isar der Ethikantrag für Ganzkörpermessungen umgearbeitet, so dass dieser alle Untersuchungen abdeckt (SPECT-CT, PET-CT, PET-MR-Aufnahmen und das Auswerten von Urin- und Blutproben). Bis zum Eintreffen der ersten Patientendaten wurde zwischenzeitlich ein anderer von der TUM zur Verfügung gestellter Datensatz (TIM-1) als Datengrundlage für biokinetische Fragestellungen herangezogen. Die AMSD wertet diesen Datensatz dabei hinsichtlich der individuellen Unterschiede bezüglich Biokinetik und resultierender Organdosen aus, indem auch die ICRP-Referenzphantome erstmals eingesetzt werden sollen. Die Arbeiten sollen demnächst abgeschlossen werden. Bei einem zweiten und dritten vom Klinikum rechts der Isar zur Verfügung gestellten Datensatz wurden bereits parallel erste Arbeiten hinsichtlich der Erstellung eines biokinetischen Modells begonnen.

Das Arbeitspaket AP4 (Risikomodelle) hat ab Monat 7 angefangen, AP5 (Implementierung, Software) beginnt ab Monat 25. Es wurden mechanistische Modelle für Brust- und Darmkrebs untersucht (Kohorte der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki sowie die Schwedischen Hämangioma-Patienten). Diese Modelle wurden auf die Qualität der Datenbeschreibung in den epidemiologischen Kohorten untersucht und Gewichtungsfaktoren der Modelle mit der Methode der "Multi-Modell-Inferenz" ermittelt. Es wurde eine Klassifizierung aller anderen Krebsarten vorgenommen. Diese schließen die Organe ein, die nicht zu den Hauptrisikorganen nach Strahlenexposition gehören, deren Risiko jedoch für PASSOS bestimmt werden muss. Es wurden funktional verwandte Gruppen gebildet (z. B. Verdauungstrakt, Geschlechtsorgane, u. a.), bei denen die Anzahl von strahleninduzierten Fällen ausreichend ist, um Risikoparameter zu bestimmen. Auf dem Projekttreffen in Rostock wurde darüber diskutiert und es wurden zusätzlich weitere einzelne Organe ausgewählt (Blase, Niere, Leber), für die explizite Risikomodelle erstellt werden sollen. Als eine besondere Herausforderung wurde die Bestimmung der Dosis im Knochenmark nach einer Brustkrebstherapie angesehen, da sie stark inhomogen verteilt ist. Zur Bestimmung der Lebenszeitriskiken wurden die relativen Überlebensraten von Brustkrebspatientinnen nach Grad des Tumors und Kalenderjahr untersucht.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im AP2 wurde auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse vereinbart, dass in der AMSD begleitende Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden sollen. Dazu sind neben den Verifikationsrechnungen zur Dosisverteilung aus der Bestrahlungsplanung auch Dosen in denjenigen Organen zu bestimmen, die außerhalb des Bereichs liegen, der von der Bestrahlungsplanung abgedeckt wird.

Im AP3 sollen innerhalb der AMSD die Arbeiten bezüglich der TIM-1-Daten abgeschlossen und die zwei weiteren vom Klinikum rechts der Isar zur Verfügung gestellten Datensätze ausgewertet werden, um die Zeit bis zum Eintreffen der ersten Patientendaten vom Klinikum rechts der Isar zu überbrücken.

Es sollen spezielle Risikomodelle für die Krebsarten entwickelt werden, die für PASSOS als wichtig identifiziert wurden, für die es aber bisher keine spezifischen Risikomodelle gibt (Blase, Niere, Leber).

Die Untersuchungen sollen auf weitere Krebsarten wie Lunge und Magen ausgedehnt werden. Zusammen mit AP2 und AP3 sollen die konkreten Schnittstellen definiert werden, wie die Dosisverteilungen bzw. Dosis-Volumen-Histogramme übergeben werden, so dass sie in die Modelle eingebaut werden können.

Es sollen Inzidenzdaten für kardiovaskuläre Erkrankungen in Deutschland gesammelt und aufbereitet werden. Gemeinsam mit den Partnern soll eine Gruppierung der kardiovaskulären Erkrankungen vorgenommen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz		Förderkennzeichen: 02 NUK 026B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 795.048,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Blettner	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1:

Koordinative Arbeiten: Fertigstellung des statistischen Auswertepfades. Entwicklung standortübergreifender SOPs (für Mainz und Ulm) zur standardisierten Durchführung des Mortalitäts-Follow-up und der Patientinnen-Befragung; Ausbau der Studiendatenbank.

Aufbau einer Kohorte am Standort Mainz: Abschluss der Rekrutierung einer Kohorte am Standort Mainz. Anzahl der in die Kohorte eingeschlossener Patientinnen: ca. 1.500.

Mortalitäts-Follow-up: Durchführung und Abschluss der Recherchen zum Vitalstatus (über Einwohnermeldeämter) für Mainzer Patientinnen. Vorbereitungen zur Durchführung von Todesursachenrecherchen über Gesundheitsämter.

Befragung zur kardialen Morbidität: Pilotierung des Fragebogens (mit 20 zufällig ausgewählten Patientinnen). Organisatorische Vorbereitungen für die Befragung der gesamten Kohorte. Start der Befragung im Juni 2014.

Dosimetrie (Mainz/Ulm): Exakte Dosimetrie von je 100 Patientinnen aus Mainz und Ulm auf Basis des PASSOS-Herzatlases. Prüfung der Datenqualität der klinischen Akten durch Vergleich mit Daten aus Radioonkologie. Zusammenführung der Akten- und Bestrahlungsdaten. Herzdosisanalyse nach aktueller SOP. Identifikation und Quantifizierung von Einflussfaktoren auf die mittlere Herzdosis in der Stichprobe. Explorative Vorhersagemodelle für die mittlere Herzdosis mit Quantifizierung des Vorhersagefehlers.

AP4:

Durchführung von systematischer Literaturrecherche zu Risikomodelle für Herz-/Kreislaufereignisse nach Strahlentherapie.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Mortalitäts Follow up: Start der Recherchen zu Todesursachen im Juni/Juli 2014.
- Befragung: Start im Juni 2014.
- Dosimetrie: Validierung des PASSOS-Herzmodells. Untersuchung der Variabilität in Abhängigkeit vom Dosisberechnungsalgorithmen/Bestrahlungsplanungssystem sowie von der inter- und intrafraktionellen Beweglichkeit des Patienten und deren Auswirkungen auf die Dosisverteilung im Allgemeinen sowie auf die für die Studie relevanten Parameter. Vergleich der Mainzer und Ulmer Bestrahlungstechniken.
- Exakte Dosimetrie und Herzdosisanalyse bei je 100/300 weiteren Patienten aus Mainz/Ulm auf Grundlage der aktuellen SOP. Endgültiges Vorhersagemodell für die mittlere Herzdosis. Analyse weiterer DVH-Metriken. Festlegung der für die Risikoanalyse relevanten Parameter.

AP4:

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität Ulm, Helmholtzstr. 16, 89081 Ulm		Förderkennzeichen: 02 NUK 026C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 283.332,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Wiegel	

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 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 1998 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 mit Beobachtungsende zum 31.12.2008.
- Befragung zur kardialen Morbidität und zu individuellen kardiovaskulären Risikofaktoren.
- Abfrage der Todesursachen bei den Gesundheitsämtern.
- Ausgewählte Telefoninterviews zu kardiovaskulären Erkrankungen und Anschreiben der Hausärzte
- 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

In der aktuellen Berichtszeit wurde in Ulm der bereits im Vorfeld entstandene Ethikantrag durch die Ethikkommission der Universität Ulm genehmigt. Nach Vorbereitung des Follow-ups mit Erstellung

des Patientinnenfragebogens in Kooperation mit den Kollegen in Mainz ist nun die Follow-up Phase angelaufen.

Erster Schritt im Follow up war die Dokumentation des Life-Status über die Einwohnermeldeämter. Aufgrund der datenschutzrechtlichen Probleme muss diese Abfrage dezentral innerhalb der jeweils behandelnden Netzwerkklinik erfolgen und ist deshalb terminlich an die Kliniken als Kooperationspartner gebunden. Diese Abfrage ist für den Standort Ulm und die Netzwerkkliniken abgeschlossen.

Nach Abschluss der Life-Status Abfrage wurde eine Pilotphase mit Patientinnenanschriften durchgeführt, um die Abläufe zu testen. Trotz reibungslosem Ablauf der Pilotphase muss hier festgestellt werden, dass der Rücklauf mit nur 50 % recht gering war. Die Voruntersuchungen in BRENDA wiesen stets eine Rücklaufquote von 70 % und höher auf. Nach erfolgreicher Pilotphase läuft gerade die Abfrage der Todesursachen der verstorbenen Patientinnen und parallel die Anschriften der lebenden Patientinnen. Diese Anschriften sind in 3 Wellen organisiert, wobei aktuell die Welle 1 läuft. Hier werden über 4000 Briefe versandt um den Standort Ulm abzudecken. Die Welle 2 und 3 werden ab KW 33 bzw. KW 35 beginnen.

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

Das Arbeitsprogramm zur retrospektiven Dosimetrie wurde zwischen den Universitätskliniken Mainz und Ulm abgestimmt: Aus digitalen Therapieplänen des Behandlungszeitraums 1998 bis 2008 sollen für je ca. 400 Patientinnen beider Kliniken die Herzdosen bestimmt werden. Anhand eines SOP basierten Verfahrens zur Konturierung werden für sechs geometrisch-anatomisch definierte Teilstrukturen des Herzens plus das Gesamtorgan Dosis-Volumen-Histogramme (DVH) als Kriterium der Strahlenbelastung aus Photonen- und Elektronenbestrahlung erstellt. Die SOP-konforme Konturierung erfordert das aktuelle Therapie-Planungssystem (TPS) Eclipse. Zum Transfer alter Pläne (TPS = Cadplan) nach Eclipse wird die Software VODCA-RT (z. Z. in Probelizenz) verwendet.

Bisher wurden 270 Fälle randomisiert und die ursprünglichen Cadplan-Daten ausgelesen. 132 Fällen wurde gemäß SOP dosimetriert und die DVHs zur epidemiologischen Auswertung an die Projektpartner in Mainz weitergeleitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nun muss der Rücklauf der Bögen bearbeitet werden. Wir rechnen insgesamt mit über 10.000 Briefen, die es zu bearbeiten gilt. Nach der Dokumentation wird erhoben, welche Patientinnen nicht geantwortet haben. Diese werden explizit nochmals nachgearbeitet und werden Erinnerungsschreiben erhalten, in denen sie nochmals gebeten werden, teilzunehmen. Diese Maßnahme soll den Rücklauf verbessern und einen möglichen Selektionsbias reduzieren. Ein identes Vorgehen wird mit dem Rücklauf aus den Gesundheitsämtern erfolgen.

Aktuell in Vorbereitung sind die Telefoninterviews und die Anschriften der Hausärzte. Diese hängen natürlich entscheidend von der Rücklaufquote ab. Zusätzlich müssen die lebenden Patientinnen im Rahmen der Anschriften ihre schriftliche Erlaubnis erteilen, dass wir die Hausärzte kontaktieren dürfen. Es ist also zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich exakt abzuschätzen, wann diese Phase beginnen wird.

Es sollen insgesamt 400 Behandlungspläne dosimetriert werden. Nach Randomisation werden die ausstehenden Fälle entsprechend der SOP bearbeitet. Für abschließende Anpassungen des Arbeitsprogramms ist ein Treffen der Dosimetrie-Gruppe Mainz/Ulm im November vorgesehen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universitätsmedizin Rostock, Schillingallee 35, 18057 Rostock		Förderkennzeichen: 02 NUK 026D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 372.000,00 EUR	Projektleiter: 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

Aufbau Datenbank mit Patientenparametern:

Die primäre Datenbank (Excel-Format) wurde bereits zum Zeitpunkt des zweiten Zwischenberichtes erstellt und enthält inzwischen die Daten von insgesamt 35 komplett konturierten Patientinnen. Es wurden für jede Patientin

persönliche und klinische Daten, Behandlungsart sowie physikalische Bestrahlungsparameter aufgenommen (s. zweiter Zwischenbericht).

Konturierung der betrachteten Risikoorgane:

Für jede Patientin wurden in der medizinischen Planung neben Unterstrukturen des Herzens (s. zweiter Zwischenbericht) folgende weitere Risikoorgane konturiert: Lunge rechts und links, Ösophagus, Magen, Rückenmark, Plexus brachialis rechts und links, Axilla Level 1-3, Schilddrüse sowie kontralaterale Brust.

Bewertung der Bestrahlungsplanungsalgorithmen:

Die Analyse der verschiedenen Bestrahlungstechniken hat gezeigt, dass unter Anwendung der IMRT Technik die mittleren Dosen der Risikoorgane zunehmen. Zeitgleich werden aber auch Volumina mit hoher Dosis innerhalb der Risikoorgane durch die IMRT-Technik reduziert (z. B. Herz, Axilla). Zudem wurden seit Anfang dieses Jahres mehrere Patientinnen mit tiefer Inspiration (DIBH, Deep Inspiration Breath Hold) bestrahlt und die Veränderungen hinsichtlich der Dosis für Lunge und Herz analysiert. Hier hat sich gezeigt, dass das Herz aufgrund der tiefen Inspiration im Mittel rund 1cm aus dem Hauptstrahlengang (Tangententechnik, keine IMRT) herauswandert und dies im Mittel zu einer Reduktion um 2.1Gy mittlerer Herzdosis führt. Allerdings läßt sich anhand der aktuellen Patientenzahl keine Verbesserung für die mittlere Lungendosis festmachen. Hier zeigt sich bisher, dass durch die komplizierten individuellen geometrischen Konstellationen von Größenverhältnissen und Lage der Organe annähernd gleichverteilt geringere sowie höhere mittlere Lungendosen durch tiefe Inspiration im Vergleich zu freier Atmung möglich sind.

Phantommessungen für Dosisabschätzung:

Da sich durch Phantommessungen im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Universität Leipzig ungewöhnlich hohe Abweichungen der Dosis des Bestrahlungsplanungssystems im Vergleich zur Messung ergeben haben, sind Dosisangaben für Risikoorgane außerhalb des Hauptstrahlenganges der Tangenten sehr kritisch zu betrachten. Hier sind Fehlergrenzen im hohen zweistelligen Bereich anzunehmen. Diese Fehlergrenze soll in den kommenden Wochen mit Hilfe von Dosismessungen am Wasserphantom bei Abstrahlung eines klassischen MammaCa Planes genauer quantifiziert werden. Für Dosisprofile entlang kranio-kaudaler Richtung sind Messungen mit realistischen Phantomen geplant.

4. Geplante Weiterarbeiten

Ein erster Datenaustausch bezüglich dosimetrischer Daten der bisher konturierten Organe (s. Punkt 2b) mit den epidemiologischen Modellierern ist inzwischen erfolgt. Weitere dosimetrische Daten für folgende Risikoorgane wurden von epidemiologischer Seite gewünscht:

Gebärmutter, Eierstöcke, Prostata, Magen, Darm, Speiseröhre, Leber, Rektum, Bauchspeicheldrüse, Niere, Harnblase, rotes Knochenmark, Gehirn, Auge, ZNS, Gallenblase.

Für diese Risikoorgane soll mit Hilfe von Standardpatienten und Abstandsbeziehungen der Organe vom Hauptstrahlenfeld mit Hilfe gemessener Dosisprofile die mittlere Dosis inklusive Fehlergrenzen (beinhaltet hier im Idealfall Patientengeometrie, Größe des Organes, Messunsicherheit) abgeschätzt werden.

Grundsätzlich läßt sich der Ausblick wie auch im zweiten Zwischenbericht folgendermaßen zusammenfassen:

Geplante Arbeitsschritte zur weiteren Bewertung der Bestrahlungsplanungsalgorithmen:

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

Erweiterte klinische Auswertung:

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig	Förderkennzeichen: 02 NUK 026E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E	
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 317.424,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Wolf

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

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

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

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

I:
Die Festlegung der in die Untersuchungen einzubeziehenden Risikostrukturen sowie deren standardisierte Konturierung sind zusätzlich zu den bereits im vorherigen Zwischenbericht erwähnten dergestalt erweitert worden, dass die Segmentierung des Herzens in Abstimmung mit den Arbeiten im AP1 durchgeführt werden soll. Weiterhin werden zusätzliche Risikoorgane wie Schilddrüse, Leber, linker und rechter Ventrikel, linker und rechter

Vorhof sowie Ösophagus in den CT-Datensätzen konturiert. Bis Ende Juli 2014 konnten 45 Patientinnen rekrutiert werden (linksseitige n= 31, rechtsseitige n= 14).

II:

- Patientenpläne werden mit Collapsed-Cone Algorithmus berechnet
- Vergleich von IMRT-Planung mit Hybrid-IMRT Planung ergibt in den meisten Fällen eine erhöhte Dosisbelastung der OAR. Deshalb erfolgte der Ausschluss einer reinen IMRT-Planung für diese Studie.
- Endgültige Festlegung folgender Bestrahlungstechniken:
 - Konventionelle 3DCRT-Tangente mit Keilfilterkompensation 6 MV
 - Konventionelle 3DCRT- Tangente ohne Keilfilterkompensation 6 und 10 MV
 - Hybrid-IMRT-Tangente mit Ausgleichsfilter (FF) 6 MV (Kombination aus offenen und intensitätsmodulierten Feldern)
 - Hybrid-IMRT-Tangente ohne Ausgleichsfilter (FFF) 7 MV (Kombination aus offenen und intensitätsmodulierten Feldern)
 - Simultan-integrierter-Boost (SIB)
 - Perkutaner Boost
 - Interstitieller Boost in Afterloadingtechnik mit Iridium-192
- Beim Vergleich der Dosisbelastung der segmentierten Herzstrukturen für die verschiedenen Techniken wird ersichtlich, dass Hybrid-IMRT FFF die geringsten Dosiswerte liefert
- Ein Vergleich der Dosisbelastung der Herzstrukturen bei perkutanem und interstitiellem Boost lieferte vergleichbare relative Dosisbeiträge für die Techniken
- Test der Deep-Inspiration-Breath-Hold (DIBH) Technik an einer Patientin mit ungünstiger Herz-Thorax-Konfiguration
 - Mittlere Herzdosis kann bei Anwendung von DIBH um Faktor 3 gesenkt werden
 - Problematisch stellt sich die Tatsache dar, dass das CT im UKL zu lange Scan-Zeiten benötigt. Dies schränkt das mögliche Patientengut für diese Untersuchungen stark ein. Ferner ist der abgebildete Scan-Bereich im Vergleich zum CT ohne DIBH deutlich verkürzt, sodass nicht alle gewünschten OAR abgebildet werden können
- Registrierung der CT für die Teletherapie mit CT für Brachytherapie bis jetzt nicht ohne weiteres möglich
 - Nach Registrierung ist Dosisverteilung des Brachy-Plans örtlich verschoben

III:

- Die Grundstruktur der Datenbank ist in Abstimmung mit der Uni Rostock definiert und soll in vergleichbarer Weise am UKL implementiert werden.
- Absprache mit Uni Rostock über zu extrahierende Parameter

4. Geplante Weiterarbeiten

- I.: - Einbeziehung der Datensätze bereits behandelter Patienten in die Untersuchungen, um die Datenbasis zu verbreitern und die erforderliche Anzahl an Patienten zu realisieren
- Rekrutierung weiterer Patienten um die angestrebte Patientenzahl zu erreichen
 - Konturierung der Risikostrukturen und Zielvolumina im Planungs-CT für EBRT und für die Brachytherapie
- II.: - Ausdehnung der Messungen der Dosisverteilungen im Nutzstrahlenfeld und im erweiterten Streustrahlungsbereich zur Erfassung der Rechengenauigkeit der eingesetzten Planungssysteme (auch in anderen Institutionen (Mainz, AP1) für September angesetzt)
- Weitere Anpassung der Beam-Modelle im Planungssystem zur Verbesserung der Genauigkeit
 - Untersuchungen zur Möglichkeit eines einfachen Konzeptes zur Korrektur der Abweichungen in den Dosisberechnungen außerhalb des Hochdosisbereiches (Möglicherweise technik- und regionsspezifischer Korrekturfaktor anwendbar)
 - Monte-Carlo-Modellierung der Dosisberechnung für die Brachytherapie sowie messtechnische Erfassung der Dosiswerte in den Risikostrukturen
 - Registrierung des Planungs-CT für die Brachytherapie mit dem für die EBRT zur einheitlichen Definition von Risiko- und Zielvolumina
- III.: - Start der prospektive Erhebung klinischen Daten und Erfassung in Patientendatenbank

5. Berichte, Veröffentlichungen

Geplant: Poster für Dreiländertagung der Medizinischen Physik 2014: “Accuracy of out-of-field dose values – comparison between measurements and calculations of two different treatment planning systems”, J. Remmele, U. Wolf

Zuwendungsempfänger: Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Ismaninger Str. 22, 81675 München		Förderkennzeichen: 02 NUK 026F
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2013 bis 31.12.2016	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 329.328,00 EUR	Projektleiter: 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

Die SPECT/CT und PET/CT Messmethoden wurden kontextspezifisch eingehend untersucht und die Wiederverwendung des im Rahmen der klinischen Untersuchung durchgeführten CTs für die zusätzlichen Untersuchungen zur Bestimmung der Kinetik validiert. Somit ist der zeit- aufwendige Antrag beim Bundesamt für Strahlenschutz wegen des zusätzlichen Einsatzes von ionisierender Strahlung vermeidbar. Der Ethik-Antrag für Ganzkörpermessungen wurde um- gearbeitet und wird jetzt alle Untersuchungen (SPECT-CT, PET-CT, PET-MR-Aufnahmen) und das Auswerten von Urin- und Blutproben abdecken. Zusammen mit optimierten Messpro- totkollen wurde so die Grundlage geschaffen, die sehr komplexen Messungen im klinischen Umfeld schneller umzusetzen. Der Antrag wird zeitnah eingereicht. Das Aufnahmeverfahren für sehr schnelle SPECT-Messungen des radioaktiven Tracers ^{99m}Tc -MIBI wurde weiter op- timiert. Die bereits vorliegenden Daten aus früheren Studien (TIM-1 und TIM-2) wurden um einen weiteren Tracer (Bombesin) erweitert und werden derzeit in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum München mit Hilfe verbesserter Auswertungsmethoden neu analysiert, um tracer-generalisierte Modelle zu entwickeln und die Ergebnisse mit den konventionell er- mittelten Dosimetriedaten zu vergleichen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im 2. Halbjahr 2014 werden weitere dynamische Ganzkörperaufnahmen erstellt, wobei der Schwerpunkt auf den schnellen SPECT Untersuchungen liegt. Dabei muss weiter erarbeitet und optimiert werden, wie die Integration der Untersuchungen effizient und vor allem patien- tenfreundlich umzusetzen ist. Außerdem werden die noch erforderlichen Ethik-Anträge einge- reicht sowie die Auswertung der bereits vorhandenen kinetischen Daten abgeschlossen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 030A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.582.482,00 EUR	Projektleiter: 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 APs 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, Sommer-schule (Rühm)

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.2: Das Schneelabor inkl. Kühlzelle wurde installiert. Aktuell finden erste Tests zur Aufnahme der Temperaturverteilung im Raum statt. Aus den auf der Zugspitze erhobenen Schneeparametern für die Schneesaison 2013/2014 wurde der Zeitpunkt der Freisetzung potentiell in der Schneedecke enthaltener Radionuklide in das Oberflächenwasser exakt bestimmt. Ein Jahresprofil der akkumulierten Schneedecke wurde aufgenommen und beprobt. Aktuell werden die enthaltenen Radionuklidaktivitäten gammaspektrometrisch gemessen.
- AP1.3: Frau Dr. Katharina Gückel wurde zum 01.07.2014 als Postdoc eingestellt. Testexperimente für die chemische Trennung von Pu mit Tracern haben begonnen. Die chemische Ausbeute wird mittels ICPMS oder Alphaspktrometrie bestimmt und in Kürze starten Testmessungen von aufgereinigten Pu-Proben mittels AMS.
- AP2.5: Da Franziska Rühle in Elternzeit ist, ist seit dem 15.03.2014 Dr. Filip Wolny für die Aufgaben des Arbeitspakets zuständig. Im Institut für Grundwasserökologie wurde folgender Versuchsaufbau realisiert: Zwei einzelne Säulen wurden mit Sand und Ton gefüllt, um den in Grundwassersystemen vorkommenden, heterogenen Wasserfluss zu simulieren. In Vorbereitung auf die Experimente mit Radionukliden wurden zunächst die hydrogeologischen Eigenschaften des Sediments in den Säulen bestimmt. Dazu wurden an beiden Säulen Tracer-Versuche (Bromid, Uranin, Deuterium) mit unterschiedlichen Fließraten durchgeführt. Zusätzlich wurden die beiden Radionuklide Cs-134 und Sr-85 für die anschließenden Experimente ausgewählt.
- AP3.1: Tests mit verschiedenen Chromatographie-Harzen zur verbesserten Abtrennung von Cer aus biologischen Proben wurden durchgeführt sowie unterschiedliche Ionisations-Methoden bei der Messung mit TIMS. Den nächsten Schritt bilden Optimierungsarbeiten am Massenspektrometer und bei der chemischen Abtrennung von Cer sowie erste Messungen von biologischen Proben.
- AP4.2: Im Rahmen einer Kooperation mit der Universität Bremen (AP1.1) und der hanseWasser Bremen GmbH soll ein Modell erstellt werden, das die Verteilung von Be-7 in einem städtischen Kanalsystem modelliert. Dazu werden Netzkarten des Kanalnetzes der Bremer Altstadt, die von der hanseWasser Bremen GmbH zur Verfügung gestellt werden in ein Kanal++ Modell übertragen. Die Modellierungsergebnisse sollen dann mit von der Universität Bremen gesammelten Messdaten zur Be-7 Aktivität in Luft, Bodenproben, Regenwasserproben und Zeitreihen von aus dem Kanalsystem entnommenen Proben verglichen werden.
- AP5: Das Programm des ersten AP5 Workshops wurde festgelegt. Der Workshop wird am KIT in Karlsruhe vom 25.-27.11.2014 zum Thema „Aufbereitung von Wasserproben und Nachweis von Radionukliden in Wasserproben“ stattfinden. An der dieses Jahr vom 10.08. bis 22.08.2013 in Bad Honnef am Physikzentrum der Deutschen Physikalischen Gesellschaft stattfindenden WE-Heraeus Physikschele „Ionising Radiation and the Protection of Man“ können wieder Mitglieder des TransAqua-Projekts des KVSF teilnehmen. Entsprechende Anmeldungen wurden bereits getätigt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Akquirierung zur Stellenbesetzung wird weiter vorangetrieben. Die Arbeitspakete werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans abgearbeitet.

Die Homepage für das Verbundprojekt (<http://transaqua.helmholtz-muenchen.de>) wird fortlaufend mit News, Terminen sowie neuen Publikationen aktualisiert. Kurzfassungen und Abbildungen zu den einzelnen Arbeitspaketen werden aktuell implementiert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen		Förderkennzeichen: 02 NUK 030B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 164.749,00 EUR	Projektleiter: 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

- Der ausgesuchte Projektbearbeiter wurde eingestellt und hat die Arbeiten im ersten Halbjahr 2014 aufgenommen.
- Es wurden Literaturstudien zu den Themen Radionuklidnachweis in wässrigen Proben, Szintillationsdetektoren und Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt.
- Die Anforderungen an den Detektor wurden definiert. Darauf basierend wurden erste theoretische Konzepte für ein Detektordesign zusammengestellt.
- Eine erste Auswahl von geeigneten Detektormaterialien wurde getroffen. Erste Materialien wurden bestellt und sollen getestet werden. Ein geeigneter Testaufbau wurde konzipiert und wird derzeit gefertigt.
- Ein digitales Auslesesystem für Detektortests wurde in Betrieb genommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Es sollen Monte-Carlo-Simulationen zur Bewertung und Optimierung der Detektorgeometrie durchgeführt werden. Ein Monte-Carlo Code wurde ausgewählt, installiert und erste Simulationen mit einfachsten Modellen sind bereits erfolgt.
- Erste Detektorkonzepte sollen mit Simulationen und Messungen untersucht werden.
- 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.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena		Förderkennzeichen: 02 NUK 030C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 398.304,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Büchel	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das hier vorgestellte Teilprojekt soll einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Freisetzung, des Transports und der Immobilisierung der Radionuklide im System Gestein/Wasser liefern. Die möglichst genaue Kenntnis der beteiligten hydrogeochemischen und mikrobiologischen Prozesse trägt gezielt zur Reduzierung des negativen Einflusses der Radionuklide auf das Trinkwasser bei. Das Teilprojekt setzt unmittelbar bei den Verbund-Schwerpunkten „Verständnis der hydrogeochemischen und biologischen (mikrobiellen) Prozesse bei der Freisetzung und beim Transport von Radionukliden“ sowie „Bewertung der Sensitivität von unterschiedlichen Reservoirs in den Kompartimenten Grundwasser und Trinkwasser“ an. Die gewonnenen Ergebnisse bzgl. Radionuklideinträge lassen Abschätzungen zu den Prozessen in fluvialen Systemen und Abwassersystemen zu. Damit werden die in den ersten Förderrunden des BMBF begonnenen Kooperationen zwischen der Friedrich-Schiller-Universität Jena mit anderen Hochschulen und Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft intensiviert.

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses anhand konkreter Forschungsprojekte und die Einbindung in die forschungsorientierte Lehre an der Universität im Rahmen der Studiengänge B.Sc. und M.Sc. Biogeowissenschaften leistet einen erheblichen Beitrag zum Kompetenzerhalt in der Radioökologie.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Es werden drei wichtige Lithotypen untersucht:

AP1: Grundwasser-führende Gesteine des Mittleren Buntsandsteins (z. B. Umgebung von Jena und Eichsfeld). Sie stellen einen der wichtigsten Grundwasser-Aquifere in Deutschland und darüber hinaus dar. Die Grundwässer enthalten häufig erhöhte Urangehalte ($> 10 \mu\text{g/L}$).

AP2: Tiefenwasser-führende Rhyolithe (z. B. Kreuznacher Rhyolith, Saar/Nahe-Gebiet). Sie enthalten neben Uran auch Radium und sind für Radon-Emanation bekannt.

AP3. Oberflächennahe Grundwasser-führende Schwarzpelite bzw. Schiefer. Sie sind für hohe Radionuklid-, u. a. Uran- und Radiumgehalte und hohe Emanationsraten bekannt.

In den geplanten Untersuchungen wird auf der einen Seite die Mineralogie der Festkomponenten und auf der anderen Seite die Hydrochemie und die Mikrobiologie der aus dem Gestein stammenden Grund- und Tiefenwässer bestimmt und in Relation zu den Lithotypen gesetzt. An den Gesteinsproben sind parallel Laborversuche (Batch- und Säulenexperimente) geplant. Aus den Ergebnissen können konkrete Hinweise auf die vorherrschenden Prozesse der Radionuklidmigration gewonnen werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Anhand von Dünnschliff- und Mikrosondenanalysen konnten zahlreiche Apatite in den Bohrkernproben bestimmt werden, welche u. a. die Eigenschaft besitzen, Uran einzubauen (Bartsch, M., 2014). Für die mikrobiologischen Untersuchungen des Grundwassers (GW) wurde ein weiterer Aquifer (schwebender Grundwasserleiter – SWL) geringerer Teufe vergleichend herangezogen. Beide Aquifere unterscheiden sich sowohl hydrochemisch als auch mikrobiologisch. Während im tieferen Grundwasserleiter vorrangig *Pseudomonas* sp. und *Flavobacterium* sp. identifiziert werden konnten, traten im SWL hauptsächlich *Bacillus*-Arten auf (Sommerwerk, E., 2014). Das Grundwasser des SWL wurde in Kooperation mit dem VKTA Dresden gammaspektroskopisch untersucht.
- AP2: Ein weiterer GW-Brunnen wurde mikrobiologisch und hydrochemisch untersucht. Bei abweichender mikrobieller Diversität wurden jedoch wiederum Siderophore-bildende Bakterien nachgewiesen (Burow, K. et al., 2014). Basierend auf den in der Literatur erwähnten hohen Rn-Konzentrationen, wurde das GW in Zusammenarbeit mit dem VKTA Dresden auf dessen Rn-Gehalt (69,9-119,6 Bq/L) analysiert. Es folgten weitere gammaspektroskopische Untersuchungen des GWs sowie des Wirtsgesteins (^{228}Ra : 103 Bq/kg; ^{228}Th : 104 Bq/kg).
- AP3: Das durch das Wirtsgestein perkolierende Wasser weist einen niedrigen pH-Wert (2,6-3,7) und geringe Elementgehalte auf. In einem tieferen Bereich der Höhle wurden jedoch U-Konzentrationen von 4,19 – 400,6 $\mu\text{g/L}$ detektiert. Verschiedene Präzipitate wurden unter Verwendung des Totalaufschlusses und der Röntgendiffraktometrie (XRD) als Schwertmannit und Fe-Phosphate mit hohen Akkumulationskonzentrationen von u. a. V (4,5 mg/g) und Mo (1,0 mg/g) identifiziert. Auf die gleiche Art und Weise wurde das Wirtsgestein untersucht und u. a. U- (1.56-7.27 $\mu\text{g/g}$) sowie Th-Gehalte von 0.37-1.97 $\mu\text{g/g}$ nachgewiesen. Zusätzlich wurden verschiedene Präzipitate mikrobiologisch untersucht.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Im nächsten Schritt werden die hydrochemischen und gammaspektroskopischen Daten detailliert ausgewertet. In den Übergangsbereichen vom helleren zum dunkleren Buntsandstein sollen zukünftig mittels LA-ICP-MS orts aufgelöste Elementuntersuchungen durchgeführt werden. Weiterhin werden die isolierten Bakterien vollständig physiologisch charakterisiert und auf die Produktion von Siderophoren getestet.
- AP2: Zunächst werden die gammaspektroskopischen Analysen des GWs ausgewertet und diskutiert. Im Folgenden wird das Wirtsgestein mittels XRD mineralogisch untersucht. Weiterhin erfolgt eine orts aufgelöste Elementanalyse mit Hilfe der LA-ICP-MS. Zeitnah sind auch Batch-Experimente unter Verwendung des Rhyoliths und verschiedener Bakterien geplant.
- AP3: Schwerpunkt zukünftiger Untersuchungen ist die genauere mikrobiologische Charakterisierung der Präzipitate sowie des Wassers. Weiterhin werden die bereits laufenden Elutionsversuche verschiedener Schieferproben fortgesetzt und ausgewertet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- Bartsch, M. (2014): Petrologische und Sedimentologische Untersuchung der Bohrung GWM 24/2012 Hattorf. Projektmodulbericht Friedrich-Schiller-Universität Jena. Unveröffentlicht.
- Burow, K., Gärtner, S., Grawunder, A., Kothe, E., Büchel, G. (2014): Microbial consortia in radionuclide-rich groundwater. Uranium Mining Conference 2014, Freiberg. Springer-Verlag (in Press).
- Sommerwerk, E. (2014): Vergleich der mikrobiellen Diversität in Grundwasser-Aquiferen. Bachelorarbeit Friedrich-Schiller-Universität Jena. Unveröffentlicht.

Zuwendungsempfänger: Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover		Förderkennzeichen: 02 NUK 030D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 317.916,00 EUR	Projektleiter: Dr. Riebe	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die Freisetzung von Radionukliden aus kerntechnischen Anlagen im Rahmen zulässiger Emissionen führt zu einer diffusen Belastung von großräumigen Reservoirs wie der Atmosphäre, den Ozeanen und Binnengewässern und der Böden. Im Rahmen des Verbundprojektes „Strahlung und Umwelt III: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen (TransAqua)“ wird im vorliegenden Arbeitspaket die Sensitivität von Trinkwassergewinnungsgebieten – einem nicht überdeckten Grundwasserleiter und zweier Talsperren – gegenüber dem Eintrag von künstlichen Radionukliden untersucht. Basierend auf dem Förderkonzept "Grundlegende FuE-Arbeiten in der nuklearen Sicherheits- und Entsorgungsforschung zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und zum Kompetenzerhalt" des BMBF bietet es die Möglichkeit zur Ausbildung qualifizierten Nachwuchses in der Radioökologie und eröffnet aufgrund der Relevanz für die Beurteilung von radioaktiven Altlasten und auch im Hinblick auf Fragen der Langzeitauswirkungen von Endlagern radioaktiver Abfälle Zukunftsperspektiven für Nachwuchswissenschaftler.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Zusammenstellung der Kenntnisse über Stoffkreisläufe (Stoffflüsse, Inventare, Austauschzeiten, Reaktionen)
- AP2: Organisation der Probenahme, Einrichtung der Messstellen
- AP3: Entnahme von Gewässer-, Sediment- und Bodenproben
- AP4: Vorbereitung der Proben für die Analyse (radiochemische Trennung etc.)
- AP5: Messungen (LSC/AMS/ICP-MS/Gammaspektrometrie), Auswertung der Ergebnisse
- AP6: Modellierung, Langzeitsicherheitsanalyse

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Die theoretischen Vorarbeiten zu den Stoffkreisläufen der Elemente H, C, Cl, Sr, I, Pu, und der Einordnung der Radionuklide ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{90}Sr , ^{129}I , $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$ in diese Kreisläufe wurden fortgesetzt.
- AP2: Es haben mehrere Erkundungsfahrten in das Probenahmegebiet 'Fuhrberger Feld' stattgefunden, um geeignete Entnahmeorte für Oberflächenwasser-, Sediment- und Bodenproben zu identifizieren.
- AP3: Weitere Proben (Grundwasser, Oberflächenwasser, Sediment) wurden entnommen.
- AP4: An der Etablierung der benötigten Messverfahren wird weiter gearbeitet. Die Wasserproben befinden sich in der Aufbereitung für die Analyse von I-129.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Weiterführung der theoretischen Vorarbeiten zu den Stoffkreisläufen der Elemente H, C, Cl, Sr, I, Pu, und der Einordnung der Radionuklide ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{90}Sr , ^{129}I , $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}$ in diese Kreisläufe.
- Geplant ist die Entnahme von Grundwasserproben im Fuhrberger Feld aus unterschiedlichen Tiefen in Zusammenarbeit mit der BGR. Weiterhin werden im gleichen Gebiet Bodenproben gewonnen, sobald für die entsprechenden Flächen Betretungsgenehmigungen erteilt wurden sowie weiter Wasser- und Sedimentproben aus ausgewählten Vorflutern.
- Weiterentwicklung der Analyseverfahren sowie Vorbereitung von Proben zur Messung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München		Förderkennzeichen: 02 NUK 030E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 140.292,00 EUR	Projektleiter: Prof. Schönert	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel ist es eine Methode zu entwickeln, die es erlaubt, anthropogene, langlebige Spaltprodukte und zusätzlich Plutoniumisotope in derselben Probe in aquatischen Ökosystemen nachzuweisen und ihre Ausbreitung zu verfolgen. An den verschiedenen Messplätzen der Beschleuniger-Massenspektrometrie am Münchner Tandem Beschleuniger sollen dazu dedizierte Tests durchgeführt werden, die durch numerische Simulationen begleitet werden sollen. Als Anwendung sollen in Schneeproben zum einen Profile von Spaltnukliden und zum anderen Plutonium-Profile bestimmt werden. Zudem sind geplant erstmals Radionuklidkonzentrationen in Schnee-, Wasser- und Regenwasserproben zu bestimmen. Diese Arbeiten stellen einen ersten Schritt zur Quantifizierung des globalen Inventars der oben genannten Nuklide dar.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Um die unterschiedlichen Methoden zu optimieren, sind sehr umfangreiche Messungen nötig. Diese umfassen sowohl die Optimierung und Bestimmung der geeigneten negativen Molekül-Ionen zur Isobaren-Unterdrückung als auch der effizienten Ausbeute. Detaillierte Simulationsrechnungen müssen dabei zu allen Schritten der Isobaren-Trennung bei den beschleunigten Ionen durch Absorber bzw. Magnete durchgeführt werden, um die optimalen Parameter zur isobarischen Trennung zu finden.

Ressourcen: Beschleuniger mit AMS Anlage (Flugzeitmessung, Gasgefüllter Magnet, Q3D Spektrograph), chemisches Labor und Rechneranlage sind vorhanden.

Entsprechend der Fortschritte werden Messungen an Schneeproben durchgeführt.

Geeignete Schneeproben werden parasitär in enger Zusammenarbeit mit AP1.3 uns zur Verfügung gestellt.

Die Arbeitsgruppe, in der die Arbeiten durchgeführt werden sollen, besteht aus auf dem Gebiet der AMS erfahrenen Wissenschaftlern sowie aus Doktoranden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Projekt wurde ab 01.06.2013 bewilligt. Nach intensiver Suche nach einem geeigneten Doktoranten für dieses Projekt hat sich inzwischen ein Kandidat herauskristallisiert, der im Mai 2014 eingestellt wurde.

Nach ersten Testmessungen, die zur Entwicklung der Pu Chemie und auch zur Bestimmung der Trennung der Pu Isotope mittels der Beschleuniger-Massenspektrometrie dienten, wurden weitere Messungen im Juni 2014 durchgeführt. Die chemischen Trennvorgänge wurden mit Harzen durchgeführt. Die Ergebnisse der chemischen Trennvorgänge und auch der massenspektrometrischen Unterdrückung sind so, dass man demnächst mit der Präparation von ersten natürlichen Proben beginnen kann. Sämtliche Messungen zur Trennung der Aktinide mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie wurden an einem Experimentierplatz mit Flugzeitbestimmung plus Restenergie durchgeführt. Die geplanten Messungen der Spaltnuklide sollen an einem anderen Messplatz mittels einem sogn. Gasgefüllten-Magneten getestet werden. Zur Trennung der Isobare in dem Gasgefüllten-Magneten wurden bereits Simulationsrechnungen begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Entsprechend des Antrages sind die Weiterarbeiten geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. v., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 030F
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 596.288,00 EUR	Projektleiter: Dr. Arnold	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der vorgeschlagene Kompetenzverbund „Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen“ hat zum Ziel, die Abschätzung von Strahlenexpositionen über aquatische Ökosysteme und die damit einhergehende Dosisermittlung für den Menschen zu verbessern. Durch multidisziplinäre Zusammenarbeit sollen die verschiedenen Aspekte des Eintrages, des Transportes und der Ausbreitung von Radionukliden in Oberflächen-, Grund-, Trink- und Abwasser sowie in fluviale oder limnische Sedimente, des Transfers an Grenzflächen in biologisches Material und in die Nahrungskette bis hin zu biokinetischen Stoffwechselmodellen der Radionuklide im Menschen zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können Maßnahmen bei Störfällen kerntechnischer Anlagen, zur Sanierung von Altlasten und bei Betrieb von Anlagen, die natürliche Radionuklide durch ihre Prozessführung anreichern (TENORM), abgeleitet werden. Es ist beabsichtigt, die in den ersten Förderrunden des BMBF begonnene Kooperation zwischen Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft und Hochschulen fortzusetzen und durch verstärkte Vernetzung zu intensivieren. Damit wird auch die Erfüllung der Zielstellungen des Kompetenzverbundes, Forschungsarbeiten unterschiedlicher Disziplinen auf einen gemeinsamen Schwerpunkt zu bündeln - hier der Radionuklidtransfer in aquatischen Ökosystemen - sowie durch moderne Fragestellungen einen effizienten Wissenstransfer und nachhaltigen Kompetenzerhalt auf den Feldern der Strahlenforschung zu erreichen, vorangetrieben. Das Vorhaben ist thematisch in fünf Teilprojekte gegliedert, wobei das hier vorliegende im Teilprojekt drei „Biokinetik“ und vier „kontaminierte Wässer“ angesiedelt ist. Das Institut für Ressourcenökologie des Helmholtz-Zentrums Dresden-Rossendorf bearbeitet innerhalb des Teilprojekts 3 das AP „Spektroskopische Bestimmung der Bindungsform (Speziation) trivalenter Actinide/Lanthanide in Biofluiden des menschlichen Gastrointestinaltraktes und im Blut“ und im Teilprojekts 4 das AP „Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen unter Tage lebenden Mikroorganismen mit Uran und deren Einfluss auf das Migrationsverhalten von Uran in gefluteten Urangruben“. Die Projektarbeiten erfordern den sensitiven Umgang mit α -strahlenden Radionukliden in Strahlenschutzkontrollbereichen. Die internationale Wettbewerbsfähigkeit wird durch die Verbindung von mikrobiologischen und radiochemischen Arbeitsmethoden realisiert.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP3.2:

- Modellierung der Speziation von Ln(III)/An(III) in natürlichen Wässern
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Eu(III) und Cm(III) im Gastrointestinaltrakt
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Eu(III) und Cm(III) im Blut
- Spektroskopische Untersuchung der Speziation von Ce(III) im Urin

AP4.3:

- Anziehen von Reinkulturen und Durchführung von Bioakkumulationsexperimenten
- REM und TEM Untersuchungen
- Untersuchungen mit der zeitaufgelöste Laser Fluoreszenz Spektroskopie und Anfärben der Zellen
- Konfokales Laser Scanning Mikroskop kombiniert mit der Laser induzierten Fluoreszenz Spektroskopie
- Dokumentation: Technische Berichte, Zwischenberichte, Abschlussberichte

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3.2: Es wurden *in vitro*-Untersuchungen mit Hilfe der zeitaufgelösten Laserfluoreszenzspektroskopie (TRLFS) an den synthetischen Biofluiden Speichel und Magensaft durchgeführt, die mit Eu(III) versetzt wurden. Zur Herstellung der Biofluide wurde das UBM-Protokoll (*Unified Bioaccessibility Method*) von der Forschergruppe BARGE (*Bioaccessibility Research Group of Europe*) verwendet, welches Synthesvorschriften zu den Verdauungssäften Speichel, Magen-, Darm- und Gallensaft enthält, die am besten der menschlichen Physiologie entsprechen. Die Auswertung der TRLFS-Messungen ergab, dass Eu(III) beim physiologischen pH-Wert des Magensaftes (pH=1) vollständig als Aqua-Ion vorliegt. Lediglich das Protein Mucin weist im Sauren eine geringfügige Komplexierung mit Eu(III) auf. Beim Speichel (neutraler physiologischer pH-Wert) sind vor allem ausgeprägte Komplexbildungen mit der Anorganik des Speichelsystems zu beobachten. Die Proteine Mucin und Amylase komplexieren ebenfalls stark, bei Anwesenheit anorganischer Komponenten wird diese Komplexierung aber zurück gedrängt. Vermutlich werden dabei Mischkomplexe mit mehreren Spezies ausgebildet.

AP4.3: Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass *Bodo Saltans* Kulturen zusammen mit dem Futterbakterium *Acidovorax facilis* ideale Wachstumsbedingungen bei 28 °C, pH von 5.5 und einem speziellen Vollmedium (90 % Peptone, 10 % Hefeextrakt) finden. Die Kontrolle der optischen Dichte mittels Photometrie zeigte unter diesen Bedingungen ein starkes Wachstum (0.1-0.2 g dry weight L⁻¹). Anders verhielt es sich bei den von der DSMZ zugesandten Flüssigkulturen der Stämme *Acidocella aromatica* und *Ferroplasma acidiphilum*. Sie zeigten bei 30-35 °C, pH 1.8-3.0 und bei Verwendung eines von der DSMZ vorgegebenen Nährmediums hingegen nur ein sehr langsames Wachstum und eine optische Dichte von OD₆₀₀ 0.1. Als Vorbereitung für die Sorptionsuntersuchungen mit Uran wurde jeweils eine *Bodo Saltans*/*Acidovorax*, *Acidocella aromatica* und *Ferroplasma acidiphilum* Suspension nach 24 h bzw. 3 Wochen Wachstumsdauer bei 3500 rpm für 10 Minuten zentrifugiert. Das jeweilige Pellet wurde mit autoklavierten H₂O gewaschen und mit 30 mL H₂O versetzt. Die anschließende Uranzugabe zu den jeweiligen Suspensionen erfolgte zur Einstellung einer Uran-Ausgangskonzentration von 0.1 mM. Die Sorptionsdauer betrug 48 h. Zusätzliche wurden kinetische Untersuchungen durchgeführt, bei denen Suspensionen mit *Bodo Saltans*/*Acidovorax* Kulturen und einer Ausgangskonzentration von 0.1 mM U über einen Zeitraum von 12 h im Abstand von 5 bzw. 60 min. beprobt wurden. Nach Beendigung der Experimente wurden durch Färbung der Mikroorganismen mit SYTOX 59/SYTOX BLUE oder SYTO 9/Propidiumiodid der Nachweis des lebend/tot-Verhältnisses mittels Konfokaler Laser Scanning Mikroskopie erbracht. Nach anschließender Ultrazentrifugation wurden die Überstände mit ICP-MS analysiert. Die Ergebnisse zeigen nach 48 h Inkubation eine U-Immobilisierung von max. 98 % in der *Bodo Saltans*/*Acidovorax facilis* Mischkultur. *Acidocella aromatica* und *Ferroplasma acidiphilum* zeigten hingegen keine Aufnahme von Uran.

Für den mikroskopischen Nachweis der Immobilisierung von Uran an oder in den Zellen, wurden *Acidovorax facilis* Kulturen nach Beendigung von Experimenten mit einer Sorptionsdauer von 7 h für transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Untersuchungen präpariert. Erste Ergebnisse zeigen längliche, kristalline Strukturen an der Zellwandung von zahlreichen *Acidovorax* Bakterien. EELS Untersuchungen, die an diesen Kristallen durchgeführt wurden, geben einen analytischen Nachweis von U, Ca, P in diesen Kristallen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass es sich hierbei um schwerlösliche Meta-Autunitkristalle handelt, die sich innerhalb von kurzer Zeit als mikrobielle Antwort auf die Zugabe von Uran gebildet haben.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.2: Die Untersuchung der Speziation von Eu(III) wird in den synthetischen Biofluiden Darm- und Gallensaft fortgeführt. Dabei sollen sowohl die Einzelbestandteile der Biofluide als auch Mischungen der organischen und anorganischen Komponenten bei Raum- und Körpertemperatur erfolgen. Des Weiteren soll auch der Prozess der Verdauung und die damit einhergehende Änderung der Eu(III)-Speziation simuliert werden indem die verschiedenen Biofluide nach dem UBM-Protokoll nacheinander kombiniert werden.

AP4.3: Für weitere Untersuchungen werden nach den Experimenten *Bodo saltans* Kulturen für rasterelektronenmikroskopische (REM) und transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Untersuchungen präpariert. Hiermit soll der Nachweis und die Lokalisierung einer Immobilisierung von Uran an *Bodo Saltans* Kulturen erbracht werden. Des Weiteren sind Untersuchungen an den *Bodo Saltans*, als auch an *Acidovorax facilis* mittels Durchfluss-Zytometrie geplant. Durch einzelne In-situ-Biosorptions-Experimente ist man hiermit in der Lage, die durch Uranzugabe entstandenen Stressreaktionen durch Messungen von DNA/RNA Konzentration und interzellulären pH-Werten der Zellen nachzuweisen. Da die Sorptionsuntersuchungen mit *Acidocella aromatica* und *Ferroplasma acidiphilum* keine Aufnahme von Uran zeigten, sollen Isolate aus dem Grubenwasser der ehemaligen Uranmine Königstein verwendet werden. Hierzu ist geplant, mittels PCR die isolierten Stämme zu identifizieren, um anschließende Kultivierungen und Uran-Sorptionsuntersuchungen durchzuführen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. v., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 030G
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 326.236,00 EUR	Projektleiter: Dr. Hampe	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

^{226}Ra und ^{228}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}Ra , ^{228}Ra und ^{224}Ra mit Aktivitätskonzentrationen von einigen 10 Bq l^{-1} beobachtet worden.

Die Freisetzung von Radium aus dem Gestein in die flüssige Phase erfolgt sowohl durch chemische als auch physikalische Prozesse. Um den Einfluss des Alpharückstoßes zu quantifizieren und von den chemischen Vorgängen zu unterscheiden, werden hier geeignete Laborexperimente durchgeführt. Dabei werden das Grenzflächensystem Aquifergestein-Fluid durch geeignete Bohrkerne aus Porenspeichern, realen hydrothermalen Tiefenwässern sowie Modellwässern abgebildet und im Experiment verschiedene apparative und chemische Parameter variiert. Der physikalischen, mineralogischen und (radio-)chemischen Charakterisierung der Bohrkerne folgen Experimente unter Variation von Druck, Temperatur und chemischer Zusammensetzung der wässrigen Lösungen in Anlehnung an verschiedene Typen von Gesteins-, Grund- bzw. Tiefenwasser-Systemen. Nach definierten Verweilzeiten werden in den wässrigen Lösungen ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{223}Ra , ^{228}Ra und ^{222}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:

- 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.
- Zur Durchführung von Versuchen unter Variation von Druck und Temperatur ist eine Druckzelle oder ein Autoklavensystem aufzubauen und hinsichtlich konstanter Versuchsbedingungen zu testen.
- 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.
- 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.
- 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

Die Versuche zur Fluid-Gesteins-Wechselwirkung werden in einem Labor-Hochdruckreaktor durchgeführt, welcher im Rahmen des Projektes beschafft wurde. Die zur Auswahl des Systems führenden Vorbetrachtungen werden im Folgenden kurz dargestellt. In den Versuchen zu simulierende hydrothermale Systeme mit relevanten Radium-Aktivitätskonzentrationen zeichnen sich durch hohe Salzgehalte (>100 g/L), reduzierende Bedingungen und hohe Temperaturen (≥ 100 °C) aus. Durch den hohen Salzgehalt wird die Edelstahlkorrosion beschleunigt. Um dies zu vermeiden, wurde auf die Nutzung von PTFE-beschichteten Materialien entschieden. Die reduzierenden Bedingungen lassen sich durch eine Druckbeaufschlagung mit Stickstoff oder Argon gewährleisten. Die Dimension des Reaktors wurde anhand der analytischen Möglichkeiten (γ -Spektrometrie) und vorliegender Untersuchungsergebnisse hydrothermalen Systeme abgeschätzt. In Lagerstätten mit Sandstein als Wirtsgestein werden in den tonigen Zwischenlagen die höchsten spezifischen Aktivitäten gemessen (^{238}U : ≤ 170 Bq/kg; ^{232}Th : ≤ 130 Bq/kg), was diese Lagen, auch wegen der großen spezifischen Oberflächen ($0,7\text{-}15$ m²/g) zu den Hauptquellen der Radiumfreisetzung macht. Für ^{238}U -/ ^{232}Th -Aktivitäten von 100 Bq/kg und verschiedene Gestein/Fluid-Verhältnisse wurden theoretische Aktivitätskonzentrationen im Fluid kalkuliert und ein notwendiges Reaktorvolumen von mindestens 0,2 L bestimmt. Nach Auswertung mehrerer Angebote wurde das Reaktorsystem Berghof BR-300 (PTFE-Einsatz/Beschichtung; V= 0,3 L, Heizmantel) beschafft. Der Reaktorstand wurde nach Erhalt im Labor aufgebaut, mit den notwendigen Medienanschlüssen (N₂-Versorgung) versehen und in Betrieb genommen. Die Testversuche mit dem Reaktorsystem werden derzeit durchgeführt.

Für die Laborversuche ist es nicht möglich ausschließlich Realproben aus hydrothermalen Entnahmehorizonten zu verwenden, da entsprechende Bohrkerne nur sehr begrenzt zur Verfügung stehen. Als mögliche Versuchsmaterialien wurden daher ein Rhyolith und Kaolin in Betracht gezogen und hinsichtlich der spezifischen Aktivitäten untersucht. Im Rhyolith wurden für ^{238}U und ^{232}Th spezifische Aktivitäten von 50 Bq/kg bzw. 100 Bq/kg gemessen. Die spezifischen Aktivitäten im Kaolin betragen 140 Bq/kg für ^{238}U und 100 Bq/kg für ^{232}Th . Eine Untersuchung der spezifischen Oberfläche der Materialien steht noch aus. Für das Kaolin liegt das Ergebnis einer Korngrößenanalyse vor. Der d₅₀-Wert beträgt 2 µm, das heißt 50 % der Körner haben einen Durchmesser von ≤ 2 µm. Ausgehend von diesem Wert wird eine spezifische Oberfläche von min. 1 m²/g erwartet. Beide untersuchten Gesteinsarten sind grundsätzlich für die Versuche zum Radiumtransfer geeignet. Allerdings wird wegen der höheren spezifischen Aktivität von ^{238}U und der erwarteten größeren spezifischen Oberfläche der Einsatz des Kaolins bevorzugt. Mit den Ergebnissen der Oberflächenuntersuchung wird eine Auswahl des Versuchsmaterials getroffen.

Weiterhin wurde im Berichtszeitraum die Zusammenarbeit innerhalb des Teilprojektes 2 intensiviert. Für das AP2.4 (Hydrogeochemischer und mikrobieller Einfluss auf den Transfer von Radionukliden im Grund- und Tiefenwasser) erfolgte die Untersuchung von Gesteinsproben (γ -Spektrometrie) und Wasserproben (γ -Spektrometrie, ^{222}Rn).

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach Abschluss der Vorversuche wird die Durchführung von Experimenten unter Parametervariation fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Projekttreffen TRANSAQUA 26.03.2014: Vortrag: „Freisetzung von Radium an der Grenzfläche Gestein/Wasser“

Zuwendungsempfänger: Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen		Förderkennzeichen: 02 NUK 030H
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 391.716,00 EUR	Projektleiter: 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 Dosiskonversionsfaktoren in diesem Kompartiment in AP4.2 hilfreich sein. Weiterhin kann der Output des Kläranlagenmodells mit dem Input für das fluviatile Transportmodell aus AP1.1 bzw. für die Reservoirs 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 fluviatile Transportmodell für jedes ausgewählte Radioisotop entwickelt, wobei der Eintrag in das Gewässer, die Ausbreitung und Deposition des Nuklids im Flusssediment berücksichtigt 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}I und ^{137}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}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:

Es wurde die ausgewählte Extraktionsmethode für ^{131}I (vorgestellt im Projekttreffen am 26.3.14 in Hannover) anhand von 36 Proben vom Klärwerksablauf ausgiebig getestet. Die chemischen Ausbeuten waren normalverteilt und betragen im Mittel (86 ± 11) %. Es wurden keine signifikanten Korrelationen zwischen chemischer Ausbeute und den Parametern pH, Leitfähigkeit und Salinität gefunden.

Es wurden mehrere Proben vom Ablauf der Kläranlage und von Flusswasser direkt hinter dem Kläranlagenablauf genommen und auf den ^{131}I -Gehalt untersucht. Im Ablauf befanden sich 0,8 – 2,5 % der Aktivität in den Schwebstoffen, im Flusswasser waren es 0,6 %.

Desweiteren wurde die anstehende Kampagne zur Flusswasser- und Sedimententnahme geplant. Es wurden Probeentnahmegereäte beschafft, eine Möglichkeit zur Bootsnutzung geschaffen und geeignete Entnahmeorte ausgewählt.

AP4.1:

Es wurde mit Hilfe des geochemischen Codes PHREEQC ein Speziationsmodell für Iod und Caesium zur Abschätzung der Fraktionierung der beiden Nuklide erstellt.

Das Modell sagt voraus, dass das Caesium in den üblichen Konzentrationen in Lösung schwer nachzuweisen sein wird und sich praktisch nur im mineralischen Bestandteil der Schwebstoffe aufhält. Dies wird durch frühere in dieser Arbeitsgruppe durchgeführte Messungen bestätigt, in denen die Cs – Aktivitäten im Kläranlagen-Zulauf fast immer unter der Messgrenze waren, im Primärschlamm aber aufgrund der Schwebstoffanreicherung Werte zwischen 1 - 4 Bq/kg ^{137}Cs pro kg Trockenmasse aufwiesen.

Das vorausgesagte Verhalten von Iod ist komplexer. Für die Sorption an anorganischen Schwebstoffen wurden Komplexierungskonstanten für Ferrihydrit mit Hilfe von sog. „linear free energy relationships“ abgeschätzt, denn dieses Mineral gehört im Erdboden zu den stärksten bekannten anorganischen Sorbenzien. Ein Batchversuch aus der Literatur konnte mit befriedigenden Ergebnissen modelliert werden. Würden alle anorganischen Schwebstoffe aus Ferrihydrit bestehen, so sagt das Modell einen sorbierten Anteil von maximal 1 % des gesamten Iods voraus, d. h. diese Fraktion sollte in der Praxis bei der Modellierung des Iod-Stoffflusses in Kläranlagen vernachlässigbar sein. Laut Modell ist zu erwarten, dass ein großer Teil des Iods als Iodid gelöst vorkommt und ein anderer, signifikanter Teil gebunden an gelöste und partikuläre organische Substanzen. Verhältnis und Speziation dieser Fraktionen sind von den chemisch-physikalischen Bedingungen in der Lösung abhängig.

Um diese Fraktionierung experimentell zu erfassen, wurde ein Extraktionsverfahren entworfen, das zurzeit experimentell erprobt wird. Es umfasst die Extraktion des anorganischen Iods und die Isolation sowohl des an hochmolekulare organische Substanzen gebundenen Iods als auch der niedermolekularen organischen Iodfraktion.

Kooperation mit AP4.2:

Es wurde in Zusammenarbeit mit den Kollegen von AP4.2 eine Probenkampagne für die Entnahme von Regenwasser- und Abwasserproben in Bremen geplant, die auf 7Be untersucht werden sollen. Parallel dazu sind Messungen von Oberflächenaktivitäten im Einzugsbereich vorgesehen. Messungen und Probeentnahmen sollen von Bremer Mitarbeitern durchgeführt werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Folgende Arbeiten sind für den nächsten Berichtszeitraum geplant:

AP1.1:

- Entnahme von Wasser- und Sedimentproben auf bzw. in der Weser
- Chemische Extraktion und gammaspektroskopische Auswertung der Proben
- Erstellung eines „ ^{131}I -Profils“ der Weser

AP4.1:

- Probenahme am Ablauf Vorklämung der Kläranlage Seehausen
- Analyse der chemisch-physikalischen Fraktionierung des Radioiods in den genommenen Proben (chemische Aufbereitung und anschließende gammaspektroskopische Analyse der einzelnen Fraktionen)
- Vergleich mit den Vorhersagen des PHREEQC-Speziationsmodells und ggfs. Modifikation des Modells

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Hochschule Ravensburg-Weingarten, Doggenriedstraße, 88250 Weingarten		Förderkennzeichen: 02 NUK 030I
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 139.260,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Klemt	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Wie nukleare Katastrophen gezeigt haben, tragen im wesentlichen ^{131}I sowie $^{134,137}\text{Cs}$ zur Dosis für die Bevölkerung bei. ^{137}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.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Es soll das ^{137}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}Cs im Sediment und die ^{137}Cs -Bindung an das Sediment untersucht werden.

Die Konzentration der Cs-Konkurrenzen K^+ und NH_4^+ sowie die O_2 -Konzentration, der pH-Wert und die Temperatur des Wassers sollen bestimmt werden. Die zeitabhängige Verteilung und der Transport des ^{137}Cs im Seesystem soll dann mit Hilfe von Compartment-Modellen bzw. mit Sedimentations-Diffusionsmodellen verstanden werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das ^{137}Cs -Bodeninventar im Einzugsgebiet des Vorsees wurde an 9 verschiedenen Positionen bestimmt. Der Mittelwert des ^{137}Cs -Inventars beträgt $(28,7 \pm 4,0) \text{ kBq/m}^2$ (01.05.1986). Die an einzelnen Positionen gemessenen Inventare variieren zwischen 17,0 und 41,4 kBq/m^2 . Die ^{137}Cs -Tiefenverteilung im Boden des Einzugsgebiet wurde mit einem Probennehmer nach Pürckhauer ($L = 60 \text{ cm}$; $\text{Ø} = 2,6 \text{ cm}$) an 4 Positionen mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften bestimmt. Die höchste spezifische ^{137}Cs -Aktivität befindet sich in allen untersuchten Bodenprofilen in den oberen 5 – 10 cm und variiert zwischen 700 und 1680 Bq/kg . Die spezi-

fische ^{137}Cs -Aktivität nimmt im Bereich der Tiefe von 15 - 20 cm sehr schnell bis auf Werte von etwa 30 Bq/kg ab. Die Untersuchungen der ^{137}Cs -Tiefenverteilung haben gezeigt, dass der von uns verwendete Inventar-Stecher mit 25 cm Länge ausreichend lang ist, um praktisch das gesamte Inventar im Boden des Einzugsgebiets zu erfassen.

Im Wasser des Vorsees variierte die ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration zwischen 6 und 14 Bq/m³ wobei eine kontinuierliche Abnahme von Januar bis Juni zu beobachten war. Der mittlere ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration in Schwebstoffen des Vorsees beträgt 320 Bq/kg. Die Bindung des ^{137}Cs an Schwebstoffe wird im Gleichgewicht durch den Verteilungskoeffizienten K_d^{tot} beschrieben. Der mittlere K_d^{tot} -Messwert beträgt $32 \cdot 10^3$ L/kg und steigt von $26 \cdot 10^3$ L/kg im Januar bis auf $55 \cdot 10^3$ L/kg im Juni.

Es wurden monatliche In-situ-Messungen von Wassertemperatur, pH-Wert und Sauerstoffkonzentration sowie monatliche Labor-Messungen von NH_4^+ - und K^+ -Konzentrationen im Wasser des Vorsees durchgeführt. Die Verteilung der spezifischen ^{137}Cs -Aktivität im Wasser folgt der Verteilung der Konzentration des Konkurrenz-Ions K^+ , die von 1,4 mg/L im Januar bis auf 0,7 mg/L im Juni abnimmt. Die NH_4^+ -Konzentration steigt in Februar auf 0,19 mg/L und nimmt im Juni bis auf 0,04 mg/L ab. Die saisonale Variation der NH_4^+ -Konzentration im Wasser ist vermutlich wegen des besonders warmen Winters 2013/14 nicht so ausgeprägt wie in anderen Jahren. Die gemessenen TOC-Werte (Total Organic Carbon) liegen im 1. Halbjahr 2014 bei etwa 19 mg/L bei leicht abnehmender Tendenz.

Eine Modell-Recherche zu Transport und Verteilung von ^{137}Cs in aquatischen Ökosystemen und die Analyse der verfügbaren empirischen Daten hat gezeigt, dass für den kleinen eutrophen Vorsee Compartment-Modelle von J.Smith (AQUASCOPE) und L.Håkanson (VAMP) am besten geeignet sind. Für die Modellierung der Aufnahme von ^{137}Cs in das Sediment und der Tiefenverteilung im Sediment werden Diffusions-Dispersions Modelle, die auch Fixierungs- und Rücklösungsprozesse beinhalten, bevorzugt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Wie vorgesehen, soll im Sommer 2014 die ^{137}Cs -Tiefenverteilung im Sediment des Vorsees sowie die ^{137}Cs -Bindung an das Sediment untersucht werden. Im Porenwasser des Sedimentes werden die K^+ - und NH_4^+ -Konzentrationen bestimmt. Proben der Makrophyten Tausendblatt und Weiße Seerose wurden bereits dem Vorsee entnommen und werden gamma-spektrometrisch untersucht. In der ganzen Projektlaufzeit werden monatlich die ^{137}Cs Aktivitätskonzentration in Wasser und Schwebstoffen, die Konzentration der Cs-Konkurrenzen K^+ und NH_4^+ sowie O_2 -Konzentration, pH-Wert und Temperatur des Wassers bestimmt.

Die Analyse von mathematischen Modellen hinsichtlich einer einfachen Anwendung auf den Vorsee und hinsichtlich der Verfügbarkeit der benötigten Parameter wird fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 031A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 851.064,00 EUR	Projektleiter: 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

Im Berichtszeitraum wurden am Rasterionenmikroskop SNAKE speziell designte und gefertigte Mikroschlitze installiert mit dem Ziel die Brillanz der Multi-Cusp Protonenquelle mit nur möglichst kleinen Verlusten durch den Tandembeschleuniger zu SNAKE zu transportieren. Eine höhere Brillanz an SNAKE erlaubt höhere Teilchenraten und damit Bestrahlungsraten oder bei gleicher Teilchenrate eine Reduktion von sphärischen Aberrationen und somit eine Verbesserung der Strahlauflösung. Die höhere thermische Belastbarkeit des neuen Schlitzsystems wurde erfolgreich getestet und erlaubt nun die Injektion von 5-10 μA Protonen in den Tandembeschleuniger.

Die gezielte Variation der Strahlfleckgröße an SNAKE, als weiteren Parameter zur Modifikation der Dosisverteilung, wurde implementiert. Die Methodik nutzt die Kleinwinkelstreuung der Ionen im Vakuumaustrittsfenster des Bestrahlungsaufbaus. Die Winkelstreuung transformiert sich durch den präzise einstellbaren Abstand zur Probe in eine gut kontrollierbare Ortsaufstreuung. Zur Kalibrierung wurde die Aufstreuung mittels fluoreszierenden Kernspurdetektoren vermessen und erwies sich in zwei Strahlzeiten als sehr reproduzierbar und erlaubt nun eine definierte, stufenlose Variation der Strahlfleckgröße. Die Methodik wurde in Zusammenarbeit mit Teilprojekt B bereits für erste Bestrahlungen zur Messung von Chromosomenaberrationen eingesetzt (AP2).

Zur Vermessung der Strahlfleckgröße des Protonenmikrostrahls werden fluoreszierende Kernspurdetektoren eingesetzt. Zur detaillierten Interpretation der Messergebnisse wurde die Antwortfunktion der Detektoren, die Fluoreszenz als Funktion der Bestrahlungsfluenz, vermessen. Diese ist im Wesentlichen proportional zu $(1 - \exp(-F/F_0))$, wobei die kritische Fluenz bei etwa $250 \mu\text{m}^{-2}$ liegt. Ein möglicher Einfluss auf die Messung der Strahlfleckgröße ist noch zu eruieren.

In zwei Strahlzeiten (31. Januar – 9. Februar und 29. April – 5. Mai) wurden Bestrahlungen für strahlenbiologische Experimente durchgeführt (AP4).

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Auswirkung der nichtlinearen Antwortfunktion der fluoreszierenden Kernspurdetektoren auf die Vermessung der Strahlfleckgröße soll im nächsten Halbjahr durch die Simulation des Messprozesses analysiert werden (AP2).

Das neue Mikroschlitzsystem soll weiter charakterisiert werden. Insbesondere ist die Verwendung als Regelschlitze zur Energiestabilisierung des Tandembeschleunigers zu untersuchen (AP2).

In zwei Strahlzeiten (6. – 12. August und 2. – 12. Oktober) sollen strahlenbiologische Experimente mit fokussierten Ionenstrahlen durchgeführt werden (AP4).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Ismaninger Str. 22, 81675 München		Förderkennzeichen: 02 NUK 031B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 333.636,00 EUR	Projektleiter: 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

In zwei während des Berichtszeitraumes durchgeführten Strahlzeiten (31. Januar – 6. Februar und 29. April – 4. Mai 2014) wurden Mikrobestrahlungen mit 20 MeV Protonen und 55 MeV Kohlenstoffionen am Strahlplatz SNAKE in Garching durchgeführt. Zur Bestimmung der RBW wurden Chromosomenaberrationen (AP2), das Zellüberleben (AP3) und Genexpressionsveränderungen (AP5) untersucht. In diesen experimentellen Arbeit konnten wir zeigen, dass die RBW für die Induktion von Chromosomenaberrationen und für das klonogene Zellüberleben durch fokussierte Protonen in Matrixbestrahlung signifikant erhöht ist und zudem eine Korrelation mit der Anzahl der fokussierter Teilchen pro Punkt vorliegt. Die Ergebnisse der Genexpression von an der Apoptose (programmierter Zelltod) beteiligter Gene bestätigten unsere Ergebnisse aus dem klonogenen Zellüberleben.

4. Geplante Weiterarbeiten

In zwei bereits geplanten Strahlzeiten am MLL-Beschleuniger in Garching (06. August – 12. August und 02. Oktober – 13. Oktober 2014) sollen weitere strahlenbiologische Experimente mit dem fokussierten Protonenstrahl und dem fokussierten Kohlenstoffionenstrahl durchgeführt werden. Hier werden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt A auch Experimente mit einer definierten Verbreiterung des Strahlflecks durch Aufstreuung in einer dünnen Folie verwendet. Dazu werden weitere Zellüberlebensexperimente (AP3) durchgeführt und die Anzahl der Chromosomenaberrationen, insbesondere der dizentrischen Chromosomen (AP2) quantitativ bestimmt. Weiterhin sind Untersuchungen der DNS Reparaturkinetik nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu homogener Bestrahlung geplant (AP4), um den Einfluss der hoch-fokussierten Teilchen auf die beiden Hauptreparaturwege von DNS Doppelstrangbrüchen zu analysieren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Ein erstes Manuskript mit den Ergebnissen unseres Teilprojektes B wird in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten A und C derzeit erstellt und soll im Herbst 2014 eingereicht werden. Die Ergebnisse werden auf dem 41. Annual Meeting (14.-19.09.2014) der European Radiation Research Society (ERR) in einem Vortrag und einem Poster präsentiert.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 031C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017		Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 238.179,00 EUR		Projektleiter: 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 Bestrahlungsgeometrie im biophysikalischen Programmpaket PARTRAC wurde neuen Messungen mit fokussierten Protonenbündeln an der Ionenmikrostrahlanlage SNAKE angepasst. Die Modellerweiterung gegenüber früheren Rechnungen betrafen unterschiedliche Halbwertsbreiten in x- und y-Richtung sowie eine zufällige Orientierung der bestrahlten Zellkerne mit ihrer DNA hinsichtlich Rotation um die Strahlachse (z-Achse).

Simulationsrechnungen wurden für unterschiedliche Anzahlen von 20 MeV Protonen je Bündel bei entsprechender Variation der Matrixgröße durchgeführt, so dass über die Fläche gemittelt jeweils die gleiche Fluenz von 4 Protonen je μm^2 appliziert wurde. Die Fokusgröße wurde mit $0.4 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ FWHM angesetzt. Für je 100 Matrixbestrahlungen wurden aus dem Spektrum an biologischen Endpunkten in PARTRAC Einzel- und Doppelstrangbrüche der DNA (SSB und DSB), DNA Fragmente in verschiedenen Längenbereichen, korrekte und inkorrekte Verbindung von DNA-Enden bei der Reparatur von sowie die Ausbeuten von dizentrischen Chromosomen analysiert.

Die Modellrechnungen lieferten für alle Protonenmatrizen die gleiche Ausbeute an SSB und DSB je Dosis im Targetvolumen. Die DNA-Fragmentverteilungen zeigten bei kleineren Fragmenten ($< 3 \text{ kbp}$) keine relevanten Unterschiede, jedoch bei längeren Fragmenten eine mit ansteigender Protonenzahl je Bündel zunehmende Abweichung von einer zufälligen Bruchverteilung, dabei nahm der Anteil von DNA-Fehlverbindungen bei der Reparatur zu. Hingegen nahmen die berechneten dizentrischen Chromosomen – anders als die Messungen - bei den höchsten Protonenzahlen je Bündel wieder ab. Diese Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Ergebnisse liefern Hinweise im Hinblick auf eine Verbesserung des DNA-Reparatur- und Chromosomenaberrationsmodells.

4. Geplante Weiterarbeiten

Derzeit werden Modellrechnungen zu weiteren Messungen mit Protonenbündeln und auch Lithiumionenbündeln anderer Rasterweiten und Teilchenzahlen je Bündel durchgeführt, für die Messungen hinsichtlich dizentrischer Chromosomen vorliegen. Bei der Analyse sollen auch die Unterschiede zwischen Experiment und Modellrechnungen hinsichtlich der chromosomalen Organisation der Zellen im Modell (menschliche Fibroblasten) und im Experiment (A_L Hybrid-Zellen) berücksichtigt werden. Ferner soll eine spurstrukturbasierte Modellierung der Zellinaktivierung konzipiert und getestet werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Rahmen von eingeladenen Vorträgen wurden Projekt-Ergebnisse präsentiert bei International Workshop ‚Challenges in micro- and nanodosimetry for ion beam cancer therapy‘, Wiener Neustadt, 7.-9. Mai 2014

NaRaP(NanoRadiationProcesses)-II Meeting, Edinburgh, 23. Mai 2014

Eine gemeinsame Publikation mit den Teilprojekten A und B über die derzeit laufenden Rechnungen ist in Arbeit.

Zuwendungsempfänger: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 031D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2013 bis 31.05.2017	Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 30.06.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 264.450,00 EUR	Projektleiter: 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

Bereits im Vorfeld des letzten Halbjahres wurden exemplarische Berechnungen zur Schadensverteilung fokussierter Protonenstrahlung durchgeführt. Aus der dabei gewonnenen Erfahrung konnte mittlerweile der Programmcode des lokalen Effekt Modells (LEM) erweitert werden, sodass nun beliebige Teilchenverteilungen in die Berechnung des biologischen Effekts nach Ionenbestrahlung mit einbezogen werden können. Insbesondere ist es mit diesem Modus nun auch möglich, den Effekt einer wählbaren Anzahl gebündelter Protonen, die in gaußförmiger Verteilung mit einstellbaren Halbwertsbreiten in zwei Dimensionen den Zellkern treffen, vorherzusagen. Somit wird die Strahlanwendung des Münchner Microbeams „SNAKE“ nachsimuliert. Die Programmentwicklung und -dokumentation, Codekommentierung und -lesbarkeit sind somit schon weit fortgeschritten. Mit dem erweiterten LEM Programm wurden dann erste systematische Berechnungen durchgeführt. Hierzu wurden die Protonenzahl und die Fokusgröße variiert, die Statistik der dadurch in Zellkerne induzierten Schäden ausgewertet und letztlich davon der biologische Effekt abgeleitet. Aus diesen Untersuchungen konnten Einblicke gewonnen werden, wie mit zunehmender Fokussierung der Übergang von einzelnen niedrig-LET Protonen hin zu gebündelten Protonen mit quasi-hoch-LET Eigenschaften geschieht. Es zeigt sich hierbei, dass sich im biologischen Effekt Spuren der Mikro- und Nanometerskala der Schadensinteraktion wiederfinden, und wir konnten Vorhersagen machen, bei welchen Strahlparametern das geschieht. Das ist enorm wichtig, zumal wir bei diesen Parametern mit den angegangenen Experimenten direkte Hinweise auf die für den Strahlenschaden relevanten Größenskalen der Schadenswirkung bekommen könnten. Die Ergebnisse wurden beim letzten Projektmeeting eingehend diskutiert und führten zu Vereinbarungen über das weitere Vorgehen. Erste Vergleiche mit den von den experimentellen Gruppen gemessenen Daten sind vielversprechend. Weiterhin wurden mit der neuen Implementation Simulationen zur DNA Rejoining-Kinetik gestartet. In diesem Punkt treffen PARTRAC und LEM verschiedene Vorhersagen und die Rechnungen zeigen, dass die erwartete experimentelle Auflösung hinreichend sein dürfte, um den Simulationen zu Grunde liegende Konzepte zu prüfen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Zunächst sollen nun, ausgehend von den Strahlenantworten auf Röntgen- und Gammastrahlung, die die Kollegen von der UniBW und der TUM gemessen haben, präzise Vorhersagen für die Strahlenantwort nach Bestrahlung mit gebündelten Protonen angefertigt werden. Hierzu muss die Geschwindigkeit der Berechnungen optimiert werden. Zudem sollen auch Vergleiche mit dem Effekt nach Bestrahlung mit anderen Ionen und bei verschiedenen Energien durchgeführt werden. Im Kontakt mit den experimentellen Gruppen können dann die Experimente mit den Parametereinstellungen durchgeführt werden, die unseren Modellsimulationen entsprechend am interessantesten erscheinen. Es sind weiterhin Vergleiche zwischen PARTRAC und LEM bezüglich der Schadensverteilung um Ionenspuren geplant, zumal hiervon ausgehend jegliche biologische Wirkung abgeleitet wird.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Friedrich et al., Simulation of DSB yield for high LET radiation, eingereicht zu Radiation Protection Dosimetry (2014).

3 Verzeichnis der Forschungsstellen

02 NUK 024A	Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1	128
02 NUK 024E	Charité - Universitätsmedizin Berlin, Hindenburgdamm 30, 14195 Berlin Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5	136
02 NUK 003A	Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese	98
02 NUK 005A	Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität	100
02 NUK 015E	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E	108
02 NUK 019C	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C	64
02 NUK 020E	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E	80
02 NUK 021A	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A	82
02 NUK 022B	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27 c, 80686 München 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	18
02 NUK 017G	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen 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	126

- 02 NUK 020C Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C  76

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fürstengraben 1, 07743 Jena

- 02 NUK 030C Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C  160

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt

- 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  114
- 02 NUK 025A Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 1  138
- 02 NUK 031D Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt D  180

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden

- 02 NUK 013A Verbundprojekt Transmutationsrelevante kernphysikalische Untersuchungen mit Einsatz moderner technologischer und numerischer Methoden; TP: Neutroneninduzierte Spaltung und andere transmutationsrelevante Prozesse  58
- 02 NUK 019D Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D  66
- 02 NUK 021B Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B  84
- 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  26
- 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  44
- 02 NUK 030F Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt F  166
- 02 NUK 027C Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Codes; Teilprojekt C: Analyse und CFD-Modellentwicklung der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen  36

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  104
- 02 NUK 024B Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 2  130
- 02 NUK 026A Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt A  144
- 02 NUK 030A Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C  156
- 02 NUK 031C Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A  178

Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Anton-Günther-Str. 51, 72488 Sigmaringen

- 02 NUK 025BX Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2  140

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  142

Hochschule Ravensburg-Weingarten, Doggenriedstr., 88250 Weingarten

- 02 NUK 030I Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt I  172

Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

- 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  12

IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf

- 02 NUK 027D Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegetriebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten  38

Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Senckenberganlage 31, 60325 Frankfurt am Main

- 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  124

02 NUK 019E Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt E  68

02 NUK 021F Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F  92

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

02 NUK 019B Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B  62

02 NUK 020B Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B  74

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  48

Klinikum der Universität München, Lindwurmstr. 2a, 80333 München

02 NUK 024C Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 3  132

Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Ismaninger Str. 22, 81675 München

02 NUK 026F Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt F  154

02 NUK 031B Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt B  176

KSB Aktiengesellschaft, Johann-Klein-Str. 9, 67227 Frankenthal (Pfalz)

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  30

Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover

02 NUK 015D Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt D  106

02 NUK 021G Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G  94

02 NUK 030D Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D  162

Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Templergraben 55, 52062 Aachen
--

- 02 NUK 021D Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D  88
- 02 NUK 021E Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E  90
- 02 NUK 022A Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie  16
- 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  20
- 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  42

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  70

Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
--

- 02 NUK 028G Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt G: Simulation des Unfalls in Fukushima-Daiichi zur Bewertung von ATHLET-CD (SUBA)  54

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Grabengasse 1, 69117 Heidelberg

- 02 NUK 020D Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D  78

Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

- 02 NUK 015A Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt A  102
- 02 NUK 019A Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A  60
- 02 NUK 020A Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A  72

- 02 NUK 021C** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C  86
- 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  50
- 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  52
- 02 NUK 030B** Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt B  158

Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt
--

- 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  116
- 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  118
- 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  120
- 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  122
- 02 NUK 022D** Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt D: TDLAS basiertes In-situ-Hygrometer  22

Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden
--

- 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  14
- 02 NUK 027A** Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt A: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Nachwärmeabfuhr von Brennelementen in ausdampfenden Nasslagern  32

02 NUK 027B Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt B: Simulation von Strömung und Wärmetransport unter den Bedingungen eines Lagerbeckens  34

02 NUK 027E Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt E: Ortsaufgelöste Temperatur- und Gasphasengeschwindigkeitsmessung zur Analyse der Strömungszustände in ausdampfenden Brennelementen  40

Technische Universität Hamburg-Harburg, Schwarzenbergstr. 95, 21073 Hamburg

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  24

Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München

02 NUK 030E Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E  164

TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg

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  28

Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen

02 NUK 015H Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt H  112

02 NUK 030H Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt H  170

Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

02 NUK 031A Verbundprojekt LET: Simulation von Hoch-LET-Effekten mittels fokussierter Niedrig-LET-Strahlung; Teilprojekt A  174

Universität Leipzig, Ritterstr. 26, 04109 Leipzig

02 NUK 026E Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt E  152

Universität Stuttgart, Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart

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  46

- | | | | |
|-------------|---|--|-----|
| 02 NUK 026C | Universität Ulm, Helmholtzstr. 16, 89081 Ulm | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C | 148 |
| 02 NUK 024D | Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen | Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4 | 134 |
| 02 NUK 026B | Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B | 146 |
| 02 NUK 026D | Universitätsmedizin Rostock, Schillingallee 35, 18057 Rostock | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D | 150 |
| 02 NUK 015G | Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 128, 01328 Dresden | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G | 110 |
| 02 NUK 030G | | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G | 168 |