

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

PTE-N Nr. 10

BMBF geförderte FuE zu
„Nukleare Sicherheitsforschung“

Berichtszeitraum: 1. Juli - 31. Dezember 2014

Projektträger Karlsruhe
Wassertechnologie und Entsorgung
PTKA-WTE

April 2015

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	13
2.1	Sicherheitsforschung für Kernreaktoren	13
2.2	Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung.....	63
2.3	Strahlenforschung.....	103
3	Verzeichnis der Forschungsstellen	215

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	📖 14
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	📖 16
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	📖 18
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	📖 20
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	📖 22
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	📖 24
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	📖 26

- 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.** 28
- 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** 30
- 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)** 32
- 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** 34
- 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** 36
- 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.** 38
- 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** 40

- 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**  42
- 02 NUK 028A** Verbundprojekt WASA-BOSS: Weiterentwicklung und Anwendung von Severe Accident Codes – Bewertung und Optimierung von Störfallmaßnahmen; Teilprojekt A: Analyse von Containment-Phänomenen zur Optimierung von Störfallmaßnahmen **Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen**  44
- 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.**  46
- 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**  48
- 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)**  50
- 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)**  52
- 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)**  54
- 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**  56

- 02 NUK 040A** Verbundprojekt UNSCHRO: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Beschreibung der Schädigung metallischer Rohrleitungen bei turbulenter Durchströmung im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen, Teilprojekt A: Mischnähte, Ausströmen **Universität Stuttgart**  58
- Otto-Graf-Institut -
- 02 NUK 040B** Verbundprojekt UNSCHRO: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Beschreibung der Schädigung metallischer Rohrleitungen bei turbulenter Durchströmung im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen, Teilprojekt B: Numerische Simulation turbulenter Strömung **Universität Stuttgart**  60

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.	📖 64
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)	📖 66
02 NUK 019B	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt B	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 68
02 NUK 019C	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 70
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.	📖 72
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	📖 74
02 NUK 019F	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt F	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn	📖 76
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)	📖 78
02 NUK 020B	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	📖 80
02 NUK 020C	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	📖 82

02 NUK 020D	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt D	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg	📖 84
02 NUK 020E	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 86
02 NUK 021A	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 88
02 NUK 021B	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 90
02 NUK 021CX	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt C	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V.	📖 92
02 NUK 021D	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt D	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	📖 94
02 NUK 021E	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	📖 96
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	📖 98
02 NUK 021G	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G	Leibniz Universität Hannover	📖 100

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	📖 104
02 NUK 005A	Verbundprojekt Bidosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbidosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität	Forschungszentrum Jülich GmbH	📖 106
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	📖 108
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	📖 110
02 NUK 015G	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G	Verein für Kernverfahrentechnik und Analytik Rossendorf e. V., Dresden	📖 112
02 NUK 017A	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt A	GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt	📖 114
02 NUK 017B	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt B	TU Darmstadt	📖 116
02 NUK 017C	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt C	TU Darmstadt	📖 118
02 NUK 017D	Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt D	TU Darmstadt	📖 120

- 02 NUK 017E** Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt E **TU Darmstadt**  122
- 02 NUK 017F** Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt F **Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main**  124
- 02 NUK 017G** Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dichtionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt 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 Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt C	Friedrich-Schiller-Universität Jena	📖 160
02 NUK 030D	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D	Leibniz Universität Hannover	📖 162
02 NUK 030E	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt E	TU München	📖 164

02 NUK 030F	Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionuklid- 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
02 NUK 034A	Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt A	TU Darmstadt	📖 182
02 NUK 034B	Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt B	TU Darmstadt	📖 184
02 NUK 034C	Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt C	GSI Helmholtzzent- rum für Schwerio- nenforschung GmbH, Darmstadt	📖 186
02 NUK 034D	Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt D	Friedrich-Alexander- Universität Erlan- gen-Nürnberg	📖 188
02 NUK 035A	Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA- Reparaturfoci als Maker der individuellen Strahlen- empfindlichkeit, Teilprojekt A	Universität des Saar- landes	📖 190
02 NUK 035B	Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA- Reparaturfoci als Maker der individuellen Strahlen- empfindlichkeit, Teilprojekt B	Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf	📖 192
02 NUK 035C	Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA- Reparaturfoci als Maker der individuellen Strahlen- empfindlichkeit, Teilprojekt C	TU Dresden	📖 194

02 NUK 035D	Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Maker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt D	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter	📖 196
02 NUK 035E	Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Maker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt E	Medipan GmbH, Dahlewitz	📖 198
02 NUK 036A	Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt A	Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Heidelberg	📖 200
02 NUK 036B	Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt B	Elbe Kliniken Stade-Buxtehude	📖 202
02 NUK 036C	Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt C	IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	📖 204
02 NUK 036D	Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt D	TU Darmstadt	📖 206
02 NUK 037A	Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt A	GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt	📖 208
02 NUK 037B	Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt B	Universitätsklinikum Essen	📖 210
02 NUK 037C	Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt C	TU Darmstadt	📖 212

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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: Der Versuchsstand *NICoLe* zur Nachbildung kernschmelztypischer Gammastrahlungsverteilungen wurde aufgebaut und anschließend in Betrieb genommen. Bei der Inbetriebnahme wurden zunächst alle Hauptkomponenten (Quellenverfahrssystem, veränderliche Materialbarriere, veränderliche Wasserbarriere mit Druckluftsystem, Messsystem, Steuersystem) auf eine korrekte Funktionsweise getestet. Anschließend erfolgte die Funktionsprüfung des gesamten Versuchstandes. Während bzw. zum Teil im Vorfeld der Inbetriebnahme wurden die notwendigen Steuerungs- und Regelungsalgorithmen sowie die grafische Benutzeroberfläche mittels *LabView* in den Versuchsstand integriert. Aus sicherheitstechnischen Gründen (Verwendung von acht Cäsium (Cs)-137-Quellen (Restaktivitäten jeweils einer Quelle: ca. 21,0 MBq) zur Nachbildung des radioaktiven Kernmaterials eines Kernreaktors) wird der Versuchsstand im Strahlungstechniklabor der Hochschule Zittau/Görlitz betrieben.
- Erste Inbetriebnahmeversuche (V01 und V02) beinhalteten die Kalibrierung der Szintillationszähler sowie die Ermittlung der unteren und oberen Fensterdiskriminatorschwellen für die verwendeten Cs-137-Quellen. Ein weiterer Inbetriebnahmeversuch (V04) diente dem Funktionsnachweis der automatisiert ablaufenden Einstellung und Messung verschiedener Gammastrahlungsverteilungen am Versuchsstand während eines Versuchsdurchlaufes.
- AP1.4: Die entwickelten Methoden zur Klassifikation von Gammastrahlungsverteilungen für die Kernzustandsdiagnose sowie Algorithmen zur Kompensation von Sensorausfällen wurden in den Simulationswerkzeugen *Matlab/Simulink* und *RStudio* umgesetzt und hinsichtlich der Kriterien „Identifikationsgenauigkeit“ und „Robustheit“ analysiert. Zur Erstellung sowie Analyse aller Methoden bzw. Algorithmen diente eine Datenbasis, welche mit Hilfe der Ergebnisse aus Monte-Carlo-Simulationen mit vereinfachten Kernzuständen beim Projektpartner erzeugt wurde.
- Da die Entwicklung bzw. Erstellung der Methoden bzw. Algorithmen des Kernzustandsdiagnoseverfahrens auf der Definition einzelner Kernzustände (Kühlmittelfüllstand, Phänomene bei der Kernmaterialverlagerung) sowie der MCNP-Simulation dieser Kernzustände zur Erzeugung von Datenbasen basiert (keine reellen Messdaten aus erfolgten Kernschmelzen verfügbar), wurde ein Validierungskonzept erarbeitet. Dabei werden kernschmelzähnliche Zustände am Versuchsstand definiert. Für diese kernschmelzähnlichen Zustände sind MCNP-Simulationen zum Strahlungstransport durchzuführen, um mit den Simulationsergebnissen ein Zustandsdiagnoseverfahren für den Versuchsstand zu erstellen. Nachfolgend werden die definierten kernschmelzähnlichen Zustände in gleicher bzw. leicht abgeänderter Form am Versuchsstand eingestellt und die gemessenen Gammastrahlungsverteilungen dem Verfahren zur Zustandsdiagnose zugeführt. Können die eingestellten Zustände am Versuchsstand durch das Diagnoseverfahren richtig ermittelt werden, ist davon auszugehen, dass die Entwicklung des Verfahrens basierend auf MCNP-Simulationen durchführbar ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.3: Im weiteren Projektverlauf sind auf Basis der beim Projektpartner erzielten Ergebnisse von MCNP-Simulationen zum Strahlungstransport für reale Kernreaktoren kernschmelzähnliche Zustände für den Versuchsstand zu definieren. Zur abschließenden Validierung des Diagnoseverfahrens werden diese Zustände in gleicher bzw. leicht abgeänderter Form am Versuchsstand eingestellt und die gemessenen Gammastrahlungsverteilungen dem Zustandsdiagnoseverfahren zugeführt.
- AP1.4: Die Methoden zur Kernzustandsdiagnose sind anhand der MCNP-Simulationsergebnisse des Projektpartners für einen realen Reaktor sowie zu den angesprochenen Validierungszwecken für den Versuchsstand zu erstellen, zu analysieren (Kriterien „Identifikationsgenauigkeit“ und „Robustheit“) und weiterzuentwickeln.
- Des Weiteren sollen Parameter entwickelt werden, mit denen sich Aussagen zur Qualität der Datenbasen für die Erstellung der Methoden zur Kernzustandsdiagnose treffen lassen.
- AP1.5: Erstellung der Dokumentation zu durchgeführten Arbeiten und Projektergebnissen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Schmidt, S.; Fiß, D.; Kratzsch, A.: Analysis of a Concept for the Diagnosis of the Core State during Severe Accidents in Pressurized Water Reactors. 22. International Conference on Nuclear Engineering (ICONE22), Prag, 07.-11. Juli 2014

Schmidt, S.: An Experimental Rig for Validation of a Core State Diagnosis System. Doktorandenseminar Kompetenzzentrum Ost für Kerntechnik 2014, Zittau, 4. Dezember 2014

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: Auf Grundlage der Recherchen zu schweren Störfällen beim Projektpartner wurden 10 Reaktorzustände definiert, wie der Verlauf eines schweren Kühlmittelverluststörfalls auftreten kann und verschiedene, relevante Phänomene beinhalten, wie z. B. die Entstehung eines Hohlraums im Kern. Für diese Zustände wurden insgesamt 22 Simulationsmodelle für das Programm MCNP erzeugt, wobei einige Zustände in 3 verschiedenen Variationen vorhanden sind. Für alle Modelle wurde per Monte Carlo-Simulation die ortsabhängige, spektrale, richtungsaufgelöste Gammaflussdichte an der RDB-Außenwand sowie an der Innenseite des biologischen Schilts mit berechnet.
- AP1.4: Es wurde erarbeitet, wie sich aus den in AP1.3 berechneten Daten Rückschlüsse auf die Detektorpositionen und -konfigurationen ziehen lassen, die ein größtmögliches Unterscheidungsvermögen zwischen den einzelnen Reaktorzuständen bieten.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.4: Anwendung der erarbeiteten Methoden auf den Datensatz aus den Monte Carlo-Simulationen, um daraus die optimalen Detektorkonfigurationen zu erhalten.
- AP1.5: Erstellung der Dokumentation zu durchgeführten Arbeiten und Ergebnissen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Konferenzbeiträge:

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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 in unterschiedlichen Maßstäben geplant, errichtet und genutzt. 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 16. September 2014 zu einem eintägigen Projekttreffen in Jülich. Hier wurden die bisherigen Fortschritte der einzelnen Projektpartner dargestellt, Absprachen für die Durchführung der weiteren Qualifizierungsversuche im verbleibenden Projektzeitraum getroffen und das weitere Vorgehen für den kommenden Berichtszeitraum abgestimmt.
- AP2: Die Qualifizierung des Zweikomponenten-Referenzaerosols (TPA-EA 2.1) bestehend aus Zinndioxid und Cäsiumiodid konnte abgeschlossen werden.

Im Berichtszeitraum ist die Ertüchtigung des Hallenbodens erfolgt und der Bauantrag für den Versuchsstand wurde durch die Kreisverwaltung genehmigt. Die Fundamentarbeiten wurden abgeschlossen. Mit dem Aufbau des Behälters konnte jedoch noch nicht begonnen werden, da die Genehmigung erst gegen Ende des Berichtszeitraums eingegangen ist und damit die Fundamentnutzung erst ab Ende Januar 2015 möglich ist.

Termine für die Nutzung des REKO-4 Behälters (TPA-EA 2.4) wurde mit dem Forschungszentrum Jülich und den Projektpartnern abgesprochen. Für die Nutzung im Projekt steht der Behälter für zwei Zeiträume im ersten Halbjahr 2015 zur Verfügung.

Wegen des Umbaus der ThAI-Versuchsanlage ist zu befürchten, dass entgegen der ursprünglichen Planung kein geeigneter Versuch in 2015, bei dem die neuen Geräte eingesetzt werden können, durchgeführt wird.

AP3: Im Berichtszeitraum wurden weitere Versuche zum Einfluss von Störspektren bei der Aerosolmessung (TPA-EA 3.1) und Online-Tests des erweiterten FASP (TPA-EA 3.4) durchgeführt. Dabei wurden Versuche mit Ag, CsI und SnO₂ im Strömungskanal des Kleinversuchsstandes ausgeführt. Die Versuche sollen seitens des MathCCES dazu genutzt werden, die komplexen Berechnungsindizes zu bestimmen. Dabei ist eine leichte Verschmutzung der Spiegeloberfläche trotz Nutzung des maximal möglichen Spühhluftmassenstroms aufgetreten. Eine Untersuchung der Verschmutzung von den Projektpartnern vom MathCCES und IPM hat bisher noch keine Erkenntnisse gebracht.

Die Durchführung von Stresstests von Einzelkomponenten (TPA-EA 3.3) für die zu qualifizierenden Feuchtesensoren wurde im Berichtszeitraum abgeschlossen. Hierfür wurden die Systeme in selbigen Autoklaven wie das erweiterte FASP mit gleichen Randbedingungen getestet. Die Temperatur-, Druck- und Dampfbeständigkeit konnte bei beiden Sensoren nachgewiesen werden. Beim TDLAS waren jedoch die Durchführungen nicht druckbeständig. Zusätzlich wurden die Sensorköpfe einer konstanten Aerosolatmosphäre im Strömungskanal ausgesetzt. Bei beiden Köpfen konnten die benötigten Spiegeloberflächen nicht ausreichend freigehalten werden. Hierdurch wird eine Anpassung der einzelnen Sensorköpfe notwendig.

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 und erweitert (siehe TPA-EA 3.3) wird. Für aktive Qualifizierungstests steht es daher noch nicht zur Verfügung. Selbiges gilt für die Durchführung von Online-Tests des TDLAS (TPA-EA 3.6). Für die Qualifizierungsversuche im Reko-4 sollen sie aber zur Verfügung stehen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Da der Bauantrag im Berichtszeitraum genehmigt und das Fundament gegossen wurde, wird der Aufbau des Kleinversuchsstandes im ersten Quartal 2015 beginnen. Nach der Inbetriebnahme werden die Qualifizierungsversuche im Kleinversuchsstand durchgeführt.

Für die zu qualifizierenden optischen Feuchtesensoren sind für das erste Quartal die ersten Qualifizierungsversuche im REKO-4 Behälter in Atmosphären ohne Partikel geplant. Anfang des zweiten Quartals werden Untersuchungen mit allen zu qualifizierenden Messgeräten im REKO-4 Behälter stattfinden. Hierbei werden dann auch Atmosphären mit Partikeln untersucht. In diesen Versuchen wird neben Druckluft, Stickstoff und Dampf auch Wasserstoff verwendet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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:

Zur Verringerung der entstehenden Datenmenge bei längeren Tests wurde die Abspeicherung der Daten im Binärformat implementiert. Nach Versuchen mit hoher Aerosolkonzentration wurden Verunreinigungen von Spiegelflächen des Messkopfes festgestellt. Der Einsatz von Spülluft konnte das nicht verhindern. Die Auswertung der Messdaten ergab, dass es zu keinem Zeitpunkt zu einem Ausfall der Spülluft gekommen war. Die Spülluft wurde im IPM überprüft und für voll funktionsfähig befunden. Anschließend wurde der Messkopf gereinigt. Da der Wirkmechanismus nicht bekannt ist, soll bei weiteren Versuchen verstärkt auf Spiegelverunreinigungen während und nach den Tests geachtet werden. Zusätzlich wurde bei Versuchen festgestellt, dass es Schwankungen im Detektorsignal für die kurzen Wellenlängen gibt. Diese werden im ersten Quartal 2015 näher untersucht.

Entwicklung eines Systems zur Feuchtemessung SteamFASP:

Anfang des Jahres wurden Messungen mit dem Demonstrator durchgeführt. Dafür wurde eine druckdichte und beheizbare Messzelle konstruiert. Parallel dazu wurden der Systemzusammenbau und die Konstruktion des Messkopfes vorangetrieben. Nach der Fertigstellung des Systems konzentrierte man sich auf die Kalibrierung und die Demonstratorversuche wurden eingestellt. In KW29 wurde ein Autoklaventest mit dem Feuchtemesssystem durchgeführt. Ziel war es, die grundsätzliche Eignung des Systems unter den Randbedingungen hohe Temperatur, hohem Druck und Aerosolen zu überprüfen. Das Ziel wurde erreicht. Da die Auswertung der Daten hinsichtlich Feuchte zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen waren, konnten keine relativen Feuchtegehalte gemessen werden. Die Plausibilität der Signale ließ sich durch Korrelation von bestimmten Ereignissen (Einspeisung Wasserdampf, Druckentlastungen,...) nachweisen. Details sind dem Jahresbericht 2014 zu entnehmen.

Die Einsatzdauer des passiven Messkopfes wurde überprüft, indem er einer 8-stündigen hohen Aerosolbelastung ausgesetzt wurde. Eine Messung war danach nicht mehr möglich.

Es wurden Temperaturtests mit dem Gesamtsystem durchgeführt, um Temperaturabhängigkeiten von Einzelkomponenten (Messkopf, Elektronik,...) zu überprüfen. Dabei stellte sich heraus, dass die verwendeten Fasern nicht die zugesagte Temperaturbeständigkeit haben. Sie wurden mit der Bitte um Ersatz an den Hersteller zurückgeschickt.

Unter Zuhilfenahme eines Kalibriergasgenerators wurden Kalibriermessungen mit dem System durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfolgt Anfang 2015. Notwendige Temperatur- und Druckwerte werden durch eine zusätzlich ins System integrierte Sensorik erfasst.

4. Geplante Weiterarbeiten

Streulichtphotometers:

Überprüfung der Schwankungen des kurzwelligen Messkanals.

Beobachtung der Spülluft in weiteren Versuchen.

Feuchtemesssystem SteamFASP:

Anfang 2015 sind weitere Kalibriertests im IPM geplant. Im Februar findet dann eine vergleichende Feuchtemessung ohne und im April mit Aerosolen in Jülich statt. Parallel dazu soll der Auswertalgorithmus entwickelt und weiter verbessert werden.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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. 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. Dazu werden allgemeine Vorgehensweisen aus der Theorie inverser Probleme angewendet.

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

Anfang August 2014 wurden dem MathCCES vom LRST Messergebnisse übermittelt, die im Vormonat mit dem FASP-Gerät aufgezeichnet worden waren. In dem zu Grunde liegenden Experiment wurden Aerosole aus den beiden Bestandteilen H_2O und CsI erzeugt, wobei das Mischungsverhältnis bekannt war. Es wurde bei den FASP-Messungen in vorher festgelegten Zeitintervallen zwischen kurzer und langer Messstrecke gewechselt, um auf diese Weise die Lichtextinktion auf der Differenzstrecke bestimmen zu können. Die Messergebnisse wurden sowohl in Binärdateien als auch wie bisher in Textdateien abgespeichert. Das Binärformat erlaubte nun eine wesentlich effizientere Datenauswertung.

Unverzüglich nach Erhalt der Ergebnisse wurde am MathCCES mit der Auswertung der Ergebnisse begonnen. Dabei fiel auf, dass die zur Mie-Inversion benötigten Brechungsindizes in der Literatur nicht oder nicht hinreichend genau vorhanden sind. Daher wurden mittels Mischformeln berechnete Brechungsindizes benutzt. Dies ermöglichte eine qualitative Mie-Inversion aus den Messungen. Die rekonstruierten Partikelgrößenverteilungen wurden in Histogrammen mit den Ergebnissen der parallel zu den FASP-Messungen durchgeführten SMPS- und APS-Messungen verglichen. Es wurden hierbei gemäß den Zielspezifikationen für den aerodynamische Partikeldurchmesser 13 logarithmisch äquidistante Größenklassen für den Bereich 0.1 bis 10.0 μm verwendet und es konnte eine qualitativ gute Übereinstimmung festgestellt werden (AP2.4).

Weiterhin wurde mit der Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche für den Auswertalgorithmus begonnen, der in der Folgezeit weiterhin verfeinert wurde. Die Störeinflüsse wurden dabei mittels statistischer Schätzer in die Inversion aufgenommen (AP3.2).

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten zum Inversionsalgorithmus (AP2.4) sollen mit Validierungen abgeschlossen werden. Dazu sollen weitere Messdaten ausgewertet werden, insbesondere auch im niedrigen Wellenlängenbereich.

Ferner soll der Inversionsalgorithmus für die Rekonstruktion der Partikelgrößenverteilungen dahingehend erweitert werden, dass zusätzlich ein im Vorfeld nicht bekanntes Mischungsverhältnis der beiden Bestandteile eines Zweikomponentenaerosols bestimmt werden kann.

Schließlich sollen für den Inversionsalgorithmus Fehlerabschätzungen gefunden werden, um mathematisch fundierte Aussagen über die Qualität der Inversionsergebnisse treffen zu können.

Entscheidend für eine genaue Rekonstruktion von Partikelgrößenverteilungen mittels optischer Extinktion ist die Kenntnis der Brechungsindizes der reinen Aerosolkomponenten. Diese liegen nicht für alle Stoffe vor, die in Zukunft für Experimente zur Aerosolklassifizierung am LRST herangezogen werden sollen. Aus diesem Grund soll ein Auswertalgorithmus entwickelt werden, der es ermöglichen soll, die Brechungsindizes aus FASP-Messungen mit Hilfe monodisperser Aerosole zu bestimmen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 427.668,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Dreizler	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die TU Darmstadt entwickelt 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 geplanten Autoklaventests bei Becker Technologies wurden erfolgreich durchgeführt. Hierbei konnte festgesellt werden, dass der entwickelte Lasermesskopf für die Randbedingungen im Prozess - hohe Temperaturen, Drücke und Partikelbeladung – ausreichend robust ist und über die gesamte Messzeit Daten erfasst werden konnten. Hieraus konnten erste Messunsicherheiten ermittelt werden, die im Folgenden weiter reduziert werden, um das Vorhabensziel zu erreichen. Als wichtige Funktion des neuen TDL-Sensors stellt sich die Möglichkeit zur Spiegel- und Faserspülung heraus. Insbesondere bei hohen Partikelbeladungen ist eine optimierte, die Messströmung nicht veränderte Spülung der optischen Komponenten notwendig, um eine dauerhafte Messtätigkeit sicherzustellen. Das von uns entwickelte Konzept zur Durchführung der Sende- und Empfangsfaser durch die Kammerwände hat sich ebenfalls als vielversprechend erwiesen und wird in weiteren Entwicklungsstufen auf die finale Anwendung in den Behältern des FZJ und von Becker Technologies optimiert. Für die Tests der Faserdurchführung und der Sensoranbindung war ein Zweistufensystem umgesetzt worden, um bei Leckagen das Austreten der Containmentatmosphäre zu verhindern. Zur Reduzierung des Bauraums kann hier zukünftig eine direkte Anbindung umgesetzt werden.

Zusätzlich zu den Autoklavenversuchen wurde der Sensorkopf (ohne Spektrometerfunktion) in einer Kammer des FZJ einer „Worst-Case“-Atmosphäre mit hohen Feuchten und Partikelbeladungen ausgesetzt, um die Notwendigkeit einer Spülung zu überprüfen. Die Spülung konnte hierbei zuverlässig die Partikelanlagerung an die Optiken verhindern. Eine Optimierung des Spülströmungsverlaufs und der -geschwindigkeit ist jedoch notwendig. Hierzu wurden Untersuchungen begonnen, die mittels modellbasierter Simulationen eine optimale Strömungsgeometrie und -geschwindigkeiten sowie die Dicke der Spülströmung auf dem Spiegel ermittelt.

Derzeit wird auf Basis der beiden Messkampagnen eine bauraumreduzierte Lösung der Sensorankopplung (direkte Flanschdurchführung) konstruiert. Hierbei sollen die Druck-, Temperatur- und Faserdurchführungen besser gebündelt werden. Zusätzlich wird in den Laserkopf eine Heizung eingebaut, deren Versorgungsleitung ebenfalls in die Flanschdurchführungen zu integrieren ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

Beim Laserkopf wird mittels „Proof-of-Concept“ der Verzicht auf eine Spiegeljustage untersucht und Heizelemente integriert. Auf Basis der modellbasierten Strömungssimulationen wird die Spüleinrichtung angepasst und die Spülströme optimiert. Die Sensorankopplung wird auf eine bauraumreduzierte Lösung umgestellt.

Weiterhin laufen die Arbeiten zur verbesserten Datenauswertung der Messsignale unter den stark transienten Bedingungen in den verschiedenen Containments.

Im Frühjahr 2015 soll das Hygrometer in der RECO IV Anlage in Jülich zum Einsatz kommen und weiter für den Einsatz am 1 m³ Behälter des FZJ optimiert werden.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

- Installation einer Vakuumpumpe zur Entlüftung der Rohrleitung

DN15-Vorversuchsanlage

- Umbau der Anlage zur endoskopischen Highspeed-PIV Messung durch den Reaktorboden mit horizontalem Lichtschnitt
- Installation einer frequenzgeregelten Pumpe aus dem Bestand der TUHH

Durchgeführte experimentelle Arbeiten:

- DN200/DN15: Ermittlung der Luftkernlängen und Wirbeltypen an ausgesuchten Ansauggeometrien unter Variation der Froudezahl
- DN15: Ermittlung der Tangentialgeschwindigkeit und Fluidgeschwindigkeit in Ablaufrichtung sowie der Strömungsstruktur mittels Highspeed-PIV
- DN15: Messung von Stationarität und Einflussgrößen auf die Wirbelbildung

Numerische Arbeiten:

- Simulationen auf Basis der DN15-Vorversuchsanlage
- Variation der Ansauggeometrien (eckig/abgerundeter Trichter)
- Untersuchungen mit den RANS Turbulenzmodellen k-omega und k-epsilon in Verbindung mit dem Solver simpleFoam bei Massenströmen von $200 - 280 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Vergleich mit den Ergebnissen von Simulationen ohne Turbulenzmodellierung sowie den PIV-Messungen
- Generierung von CFD-Gittern mit Verfeinerungen im Bereich der zu erwartenden Phasengrenze (mit snappyHexMesh)
- Erste Berechnungen mit dem zwei-Phasen-Solver interFoam

4. Geplante Weiterarbeiten

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

- DN 200: Einbau einer Laserschutzverkleidung
- DN200/DN15: Ermittlung des Gasgehaltes unter Variation der Froudezahl in der Saugleitung
- DN200/DN15: Ermittlung des Dralls in der Saugleitung mittels Dopplersonographie
- DN200: Ermittlung der Tangentialgeschwindigkeit und Fluidgeschwindigkeit in Ablaufrichtung sowie der Strömungsstruktur mittels Highspeed-PIV
- DN200/DN15: Ermittlung der Tangentialgeschwindigkeit und Radialgeschwindigkeit in horizontaler Richtung sowie der Strömungsstruktur mittels Highspeed-PIV und Unterwasser-PIV
- Simulationen auf Basis der DN200 Anlage
- Untersuchen von URANS Turbulenzmodellen (Anwendung von RANS Turbulenzmodellen unter Verwendung von Solvern für die instationäre Navier-Stokes-Gleichung)
- Simulationen auf Basis der DN15-Modellanlage mit anderen Einlaufgeometrien und somit anderen Reynolds- und Froudezahlen (entsprechend der geplanten und durchgeführten Experimente)
- Weitere Simulationen mit dem zwei-Phasen Solver interFoam und Vergleich mit den Einphasen-Simulationen

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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

- AP3: Die Vorbereitungen für die Durchführung der Messkampagne zur Untersuchung der Zulaufströmung der Pumpe in der großskaligen Technikumsanlage der TUHH wurden weitestgehend abgeschlossen. Die dafür entsprechend notwendigen Gittersensoren wurden ausgelegt und befinden sich derzeit in der Fertigung.
- AP4: Die experimentellen Untersuchungen an der Kreiselpumpe im industriellen Maßstab wurden abgeschlossen. Es wurden zunächst die für die Auswertung notwendigen Referenzmessungen durchgeführt und ausgewertet. Anschließend wurden die Messserien mit den einzelnen tomographischen Messungen an der Pumpe durchgeführt. Dabei wurden die jeweiligen Versuchsbedingungen gemäß der erarbeiteten Testmatrizen eingestellt. Der Versuchsaufbau und die Vorbereitungen zur Durchführung der röntgentomographischen Untersuchung an einer kleinskaligen Kreiselpumpe (Modellkreiselpumpe) und zur Durchführung der Versuchsserien an der Armatur wurden weitestgehend abgeschlossen. Erste Testmessungen wurden in beiden Fällen jedoch noch nicht durchgeführt.
- AP6: Es erfolgte die Rekonstruktion der Datensätze, so dass alle bisher gewonnenen Datensätze für die weitere Aufbereitung und Auswertung zur Verfügung stehen. Mit der weiteren Auswertung der rekonstruierten Datensätze wurde begonnen. Dabei wurde unter anderem der Einfluss der Pumpendrehzahl, des Gegendruckes im angedrosselten Betrieb sowie des Gasgehaltes und des Dralls in der Zulaufströmung auf die Charakteristik der Pumpe ausgewertet. Einzelne Ergebnisse wurden bereits publiziert bzw. zur Publikation eingereicht. Weitere Veröffentlichungen sind in Arbeit.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP3: Durchführung einer Messkampagne zur Untersuchung der Zulaufströmung der Pumpe in der großskaligen Technikumsanlage der TUHH.
- AP4: Zunächst ist die Durchführung von Testmessungen an einer kleinskaligen Kreiselpumpe (Modellkreiselpumpe) und an der Armatur geplant. Anschließend soll mit den röntgentomographischen Untersuchungen an einer kleinskaligen Kreiselpumpe (Modellkreiselpumpe) und der Durchführung der Versuchsserien an der Armatur begonnen werden. Außerdem ist die Vorbereitung weiterer experimenteller Untersuchungen an der industriellen Kreiselpumpe geplant, um die für die Auswertung und Modellbildung bislang vorhandene Messdatenbasis um weitere (zusätzliche) interessante Betriebspunkte zu erweitern.
- AP6: Weitere Auswertung der Ergebnisse aus den bisher durchgeführten Versuchsreihen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- Bieberle, A.; Schäfer, T.; Hampel, U. Gamma-ray CT for multi-phase flow investigation, Vortrag (Konferenzbeitrag) und Beitrag zu Proceedings, 5th International Workshop on Process Tomography (IWPT-5), 16.-18.09.2014, Jeju, Korea
- Schäfer, T.; Bieberle, A.; Neumann, M.; Hampel, U. Undesired air entrainment by vortex formation - experimental investigations on the resulting phase fraction distributions in a centrifugal pump using gamma-ray computed tomography, Poster, East German Centre of Competence in Nuclear Technology Workshop of Doctoral Candidates, 04.12.2014, Zittau, Deutschland

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

- AP2: Im Berichtszeitraum fanden mehrere Versuchsreihen mit der skalierten Versuchsanlage der TUHH statt, an deren Auswertung und Interpretation der TÜV NORD beteiligt gewesen ist. Mit der Versuchsanlage im Labormaßstab wurden u. a. die Auswirkungen unterschiedlicher Ansauggeometrien (abgerundeter und scharfkantiger Stutzen sowie Blende und Sieb) auf die Ausbildung von Oberflächenwirbeln untersucht. Dabei wurde zusätzlich der Ansaugmassenstrom variiert. Außerdem wurde untersucht, wie sich die Variation des Anstellwinkels der Einströmröhre auf die Oberflächenwirbel auswirkt. Bei mehreren Treffen und Telefonkonferenzen zwischen TUHH und TÜV NORD wurden die Ergebnisse und die weitere Vorgehensweise diskutiert. Insbesondere wurden die Versuchsrandbedingungen für die große Versuchsanlage konkretisiert.
- AP7: Schwerpunktmäßig wurden im Berichtszeitraum CFD-Simulationen zu den Versuchen in der skalierten Versuchsanlage der TUHH durchgeführt. Da sich die Geometrie und die Randbedingungen der Versuche seit dem letzten Bericht verändert haben, wurde die dort aufgeführte Gitterstudie wiederholt. Der höhere Wasserstand im Versuchsbehälter führte dabei bei unstrukturierter Vernetzung zu

einer unverhältnismäßig großen Anzahl von Gitterelementen, ohne dass gitterunabhängige Simulationsergebnisse erzielt werden konnten, so dass im Folgenden auf eine aufwendigere Vernetzungsstrategie gesetzt wurde. Es wurden neue Gitter erstellt, die diesmal weitestgehend strukturiert sind und aus Hexaeder-Gittern bestehen. Lediglich der Bereich um die Einströmröhre besteht weiterhin aus unstrukturierten Tetraeder-Gittern. Diese Strategie hat die erforderliche Elementanzahl deutlich verringert. Außerdem wurden von diesen Gittern Versionen für zweiphasige CFD-Simulationen erstellt, die derzeit durchgeführt werden. Obwohl die zweite Gitterstudie nicht die erwünschten gitterunabhängigen Resultate erbracht hat, konnten einige grundsätzliche Erkenntnisse aus den Simulationen gewonnen werden. Zunächst einmal homogenisiert sich die Strömung zur Behältermitte hin, so dass in der Umgebung des Zentrums eine rotationssymmetrische Strömung vorliegt. Außerdem weist die Strömung in diesen Bereichen näherungsweise Merkmale einer Potenzialströmung auf, d. h. grundsätzliche Voraussetzungen für die Anwendung von analytischen Wirbelmodellen wie dem Burgers-Rott-Modell sind näherungsweise erfüllt. Allerdings deuten die vorläufigen CFD-Simulationen darauf hin, dass eine andere Voraussetzung für das Burgers-Rott-Modell nicht erfüllt ist. Die Tangentialgeschwindigkeiten sind in den Simulationen nicht unabhängig von der axialen Koordinate, d. h. von ihrer vertikalen Entfernung zum Ansaugstutzen. Sollte sich dies bestätigen (z. B. durch entsprechende Messungen), muss das bisher zur Berechnung der Luftkernlängen angewendete kombinierte Verfahren ggf. angepasst werden. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen von den analytischen Modellen ist die bei den Versuchen auftretende starke Zirkulation, die erschwerend zu verhältnismäßig großen Überdeckungen führt. Es zeigte sich, dass daran auch der bisher recht erfolgversprechende vom TÜV NORD entwickelte Potenziallöser für rotationssymmetrische Strömungen scheitert (siehe vorherige Berichte). Für diesen sind daher auch Anpassungen für stark rotierende Strömungen geplant. Über die CFD-Simulationen hinaus wurde beim TÜV NORD eine umfangreiche Studie verschiedener mathematischer Kriterien zur Lokalisierung von Wirbeln in einer Strömung durchgeführt. Der Vergleich mit den anderen Kriterien hat ergeben, dass das bisher verwendete Q-Kriterium für unsere Zwecke gut geeignet ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die TÜV NORD SysTec wird die Ausarbeitung und Auswertung der Experimente auch weiterhin unterstützen. Insbesondere die Auswertung der Messungen und der Vergleich mit den CFD-Simulationen, sei es OpenFOAM oder CFX, geschieht im engen Austausch zwischen TUHH und TÜV NORD.
- AP7: Zunächst bleibt der Schwerpunkt auf CFD-Simulationen für die skalierte Versuchsanlage. Zurzeit laufen eine Gitterstudie mit den neuen hybriden Gittern und sowohl transiente als auch stationäre zweiphasige Simulationen. Am Ende der Gitterstudie sollen gitterunabhängige Resultate stehen, die den mit den alten Gittern begonnen Prozess der qualitativen Auswertung der Strömungsverhältnisse im Versuchsbehälter vervollständigen sollen. Die zweiphasigen Simulationen sollen den Vergleich zwischen einphasigen und zweiphasigen CFD-Modellen ermöglichen. Dabei sollen die Unterschiede in den jeweiligen Ergebnissen und deren Auswirkungen auf die Berechnung der Luftkernlängen herausgearbeitet werden. Zudem werden wir bei weiteren CFD-Simulationen die Ansauggeometrie variieren (zunächst konzentrieren wir uns dabei auf den abgerundeten und den scharfkantigen Ansaugstutzen). Im Anschluss sollen die CFD-Simulationen für die große Versuchsanlage unter weitgehender Ausnutzung der bei den Simulationen der skalierten Anlage gewonnenen Erkenntnisse begonnen werden. Alle von uns durchgeführten CFD-Simulationen werden zudem mit den entsprechenden Messdaten aus den TUHH-Anlagen verglichen und validiert. Neben den CFD-Simulationen sollen die bereits unter 3. beschriebenen Anpassungen des kombinierten Verfahrens zur Berechnung der Luftkernlängen und des Potenziallösers erfolgen. Außerdem arbeiten wir noch an der Entwicklung eines eigenen Wirbelmodells.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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:

- Alle 6 Versuchsträger sind fertig gestellt, geprüft und befinden sich auf dem Prüffeld in Erlangen. Die statischen Tests sind abgeschlossen. Die erste Testschleife für die Zyklustests (4 Armaturen) ist aufgebaut und steht kurz vor der Inbetriebnahme
- Der Schmutzpartikeltest für das absperrbare Rückschlagventil DN 200 ist erfolgreich abgeschlossen
- Das Kleinventil DN 25 ist auf dem Seismik-Prüffeld und wird für die Rütteltests im Januar vorbereitet
- Parallel läuft die Vorbereitung der weiteren Versuche

4. Geplante Weiterarbeiten

Nachstehend sind die nächsten Schritte zusammengefasst:

- Durchführung der oben genannten Belastungstests

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Brennstabbindel von Brennelementen (BE) als auch in den Zwischenräumen zwischen den BE liefern, um damit die Entwicklung der axialen und radialen Stabtemperaturprofile bei unterschiedlichen Störfallszenarien prognostizieren zu können. Dafür soll ein Integralexperiment aufgebaut werden, welches die thermohydraulischen Vorgänge in einem repräsentativen Ausschnitt des BE-Lagerbeckens ganzheitlich umfasst. Aufbauend auf den Experimenten soll ein Lagerbecken-Modul für den Thermohydraulikcode ATHLET entwickelt werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP0: Bestimmung der Randbedingungen an der Bilanzgrenze Oberkante BE-LB (mit HSZG): Der Versuchsaufbau des Integralexperimentes sieht eine nach oben offene, drucklose Anlage vor. Der Kondensator der ADELA-II Versuchsanlage wird weiter zur Dampfabfuhr durch Kondensation genutzt. Es erfolgte eine Anpassung auf die

Abmessungen der Versuchsanlage (VA) ALADIN. Das Volumen oberhalb des Stabbündels und die davon abhängigen Strömungsbedingungen können durch die Versuche an der VA ALADIN nicht abgebildet werden. Dies soll an der VA der HSZG realisiert werden. Arbeitspaket 0 wurde erfolgreich abgeschlossen.

AP1: Nach Festlegung der geometrischen und thermohydraulischen Auslegungsparameter durch alle Projektpartner erfolgte die konstruktive Planung der Versuchsanlage mit der 3D-CAD Konstruktionssoftware SolidWorks. Die Fertigungszeichnungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Labor- und Versuchsfeldverbund Mollier-Bau der TU Dresden aus dem CAD-Modell der Versuchsanlage erstellt. Die Beschaffung der Halbzeuge für die Versuchsanlage wurde durchgeführt.

Zur Messung der Oberflächen- und Fluidtemperaturen wurden die axial angeordneten Messebenen und die exakte Positionierung der Thermoelemente auf den Heizpatronen- und Kanaloberflächen festgelegt. Es wurde eine Nadelsonde entwickelt, um gleichzeitig den Füllstand und die Temperatur im Außenkanal zu erfassen. Die Füllstandmessung erfolgt leitfähig, während die Temperaturmessung mittels Messung der Thermospannung mit Thermoelementen erfolgt. Die Beschaffung der Thermoelemente und der Komponenten der Nadelsonde wurde bereits vorgenommen.

AP2/3: Hier erfolgt keine Beteiligung von TUD-WKET.

AP4: Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes wurde noch nicht begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Planung, Errichtung und Inbetriebnahme

- Fertigung und Errichtung der Versuchsanlage: Aufbau der Komponenten und des elektrischen Anschlusses der Heizpatronen
- Implementierung der Messtechnik und Programmierung der Messwerterfassung mit der Software LabVIEW
- Inbetriebnahme der Versuchsanlage mit Anlagendokumentation
- Erstellung der Versuchsmatrix für die Szenarien „Ausdampfen“, „Wasserschloss“ und „trockenes Lagerbecken“

AP4: Bestimmung der Parameter für ein neues ATHLET-Modul

- Einarbeitung in ATHLET
- Erarbeitung der Anforderungen und der Verknüpfungsstellen des System-Codes mit den Messdaten der integralen Versuchsanlage ALADIN

5. Berichte, Veröffentlichungen

Für die Nureth-16 in Chicago/USA wurde ein Abstract zu folgendem Beitrag eingereicht: „Experimental investigations on the behavior of BWR fuel elements inside spent fuel pools under accident conditions“.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 (02NUK027D) 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 (02NUK027C), während dort durchgeführte Simulationen des Containments als Randbedingungen in die eigenen Simulationen zurückfließen. Simulationen des am WKET durchgeführten Integralexperimentes (IE) (02NUK027A) an einem für Siedewasserreaktoren typischen Brennelements dienen zur Verifizierung der dort gewonnenen Daten und als Basis für die Weiterentwicklung der Integralcodes (02NUK027A).

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

Im zweiten Halbjahr wurde der Austausch mit der HS Zittau-Görlitz in mehreren Treffen fortgesetzt. Dabei wurden mögliche Aufbauten sowie die geplanten Experimente im Rahmen von SINABEL diskutiert (BED1).

Die numerischen Simulationen des Brennelementunterkanals (BE-UK) dienen der Generierung der für die Modellierung des Brennelementes (BE) als porösen Körper notwendigen Parameter (02NUK027C). Dies sind der Rohrreibungsbeiwert und die Nußelt-Zahl. Zusätzlich dienen diese Werte als Vergleichsdaten für Simulationen des BE-UK mit Einbauten.

Im Rahmen erster Referenzmessungen des EE mit unterschiedlichen Komponenten in der Messstrecke konnten diese Daten mit experimentell bestimmten Werten der Geometrie des EE verglichen und damit validiert werden. Es zeigte sich gute Übereinstimmung.

Der geplante Aufbau des IE erforderte detaillierte Untersuchungen der vorgesehenen vereinfachten Abstandhalter (AH), um den Unterschied gegenüber kommerziell eingesetzten Bauformen zu quantifizieren. Dazu wurden im Arbeitspaket BED2 zwei mögliche Bauformen für SINABEL und zwei kommerzielle Bauformen untersucht. Grundlegende Unterschiede hinsichtlich der Strömungsbeeinflussung konnten im Parameterbereich des ausdampfenden Lagerbeckens nicht festgestellt werden. Eine Transition zu Turbulenz durch die AH konnte nicht beobachtet werden. Die Nachlaufängen im relevanten Reynolds-Zahl Bereich sind stets kleiner als die Abstände zwischen den AH, so dass es zu keiner Interaktion mit nachfolgenden AH kommt. Dadurch ist es möglich, weitere Untersuchungen auf den Bereich zwischen zwei AH zu beschränken. Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden eingesetzt, um an der Auslegung des IE (INT1) mitzuwirken. Sie boten die Möglichkeit, die geplante Anordnung der Messtechnik im BS-UK zu beurteilen.

Die Auswirkungen der eingebrachten Messtechnik auf Strömung und Wärmeübergang werden gegenwärtig untersucht. Ziel ist die Quantifizierung des Einflusses der eingebrachten Sensoren und der Messmethoden. Im Falle nicht vernachlässigbarer Wechselwirkungen sind Korrekturfaktoren oder -funktionen zu bestimmen, mit denen die gemessenen Werte später auf die ungestörte Strömung umgerechnet werden können.

An der Modellierung der im IE eingesetzten Heizpatronen mit anschließender Abbildung und Analyse des Kopfbereiches der geplanten Anlage wird gegenwärtig ebenfalls gearbeitet. Geplant sind Simulationen dieses Bereiches als Vorbereitung für die gezielte Vorbereitung und Durchführung der Experimente.

In Vorbereitung der Modulentwicklung (MOD1, MOD2) wird aktuell die Wärmestrahlung zwischen den BS in einer vereinfachten Konfiguration untersucht. Nach Kombination mit axialer und radialer Wärmeleitung sollen die Anteile einzelner Transportmechanismen am Gesamtwärmetransport für die verschiedenen Phasen des Ausdampfvorgangs quantifiziert werden. Auf dieser Grundlage können außerdem die Modellkomplexität und damit der Berechnungsaufwand für weitere Analysen zweckmäßig reduziert werden.

An den geschilderten Teilaufgaben sind aktuell drei Studenten beteiligt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geschilderten begonnen studentischen Arbeiten zur Messtechnik, dem Strahlungsaustausch und dem Aufbau des IE werden voraussichtlich im Frühjahr 2015 abgeschlossen werden.

Die Geometriemodellierung und Simulation des IE (INT2&3) wird damit zügig vorangetrieben und dient der Bereitstellung numerischer Daten zum Vergleich mit ersten, experimentell gewonnenen Messwerten.

Nachdem die eingesetzten Bauteilgeometrien des Kopf- und Fußbereiches des EE geklärt werden konnten, wird auch dieser Arbeitspunkt (BED2) zügig vorangetrieben. Ziel sind dabei die Parameter des porösen Modelles dieser Komponenten für Lagerbeckensimulationen im Teilprojekt 02NUK027C und der Vergleich mit experimentell gewonnenen Daten.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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, Kaltgaseinbruch, 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

Für den Berichtszeitraum sieht der Arbeitsplan die CFD-Modellierung eines einzelnen Brennelementes, basierend auf dem Ansatz des porösen Körpers vor. Der Grundgedanke besteht darin, auf die geometrische Auflösung von Unterkanälen zu verzichten und lediglich gemittelte Geschwindigkeitsfelder zu berechnen. Die bisher durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich auf SWR-Brennelemente und die Übertragung auf DWR-Brennelemente steht noch bevor. Ziel der Modellierung ist es, die relevanten physikalischen Aspekte auf der Brennelementebene zu identifizieren und ein effizientes Modell für anschließende Berechnungen im Lagerbeckenmaßstab bereitzustellen. Die Berechnungen auf der Brennelementskala können ihrerseits noch keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern, weil die Lagerbeckenatmosphäre als Wärmesenke hierbei noch nicht mit in das Rechengebiet einbezogen wird und somit die Randbedingungen an der Oberkante des Brennelementes unbekannt sind, stellen aber eine notwendige Vorstufe dar und dienen der Kalibrierung von Modellparametern. Die bisherigen Untersuchungen haben zum Ergebnis, dass für den Fall eines partiell ausgedampften Lagerbeckens aufgrund der geringen Querschnittsabmessungen der Unterkanäle und niedrigen Dampfgeschwindigkeiten, eine überwiegend laminare Strömung zu erwarten ist. Dies ermöglicht die Anwendung von einfachen, berechenbaren Druckverlust- und Wärmeübergangsbeziehungen zwischen Brennstäben und Kühlmedium. Die Dampfgeschwindigkeiten und damit das Strömungsregime werden von der Verdampfungsrate bestimmt, die wiederum von der Nachzerfallswärmeleistung und dem vorliegenden Siederegime abhängt. Die zu erwartenden Wärmestromdichten an der Brennstaboberfläche unter Lagerbedingungen sind aber im Allgemeinen zu gering, um Blasensieden hervorzurufen. Die Folge ist, dass die in der Wasserphase freigesetzte Wärme überwiegend durch einphasige Konvektion an die Wasseroberfläche transportiert wird, wo schließlich die Verdampfung stattfindet. Hierbei spricht man von stillem Sieden. Die Verdampfungsrate lässt sich direkt aus der Verdampfungsenthalpie und der unter Wasser freigesetzten Wärme ermitteln. Voraussetzung hierfür ist, dass das Wasser bereits Sättigungstemperatur erreicht hat. Liegt der Wasserpegel im Lagerbecken innerhalb der aktiven Zone der Brennelemente, so ist ein zusätzlicher Wärmetransportmechanismus zu berücksichtigen, welcher einen entscheidenden Einfluss hat. Der aufsteigende Dampf wird beim Vorbeiströmen an den freigelegten Brennstäben überhitzt. Da sich aufgrund der großen Wärmeübergangsfläche die Stabtemperatur generell nur geringfügig von der Temperatur des Kühlmediums unterscheidet, bildet sich zwischen der Staboberfläche unter Wasser und in der Dampfphase ein Temperaturgradient aus, welcher zu einem zusätzlichen axialen Wärmetransport im Brennstab führt. Dies bewirkt wiederum eine höhere Wärmefreisetzung unter Wasser, was wiederum in einer erhöhten Verdampfungsrate resultiert, welche ihrerseits wieder zu einer stärkeren Kühlung der Brennstäbe in der Dampfphase führt. Um die Lage des sich einstellenden Gleichgewichtes und damit die zu erwartenden Hüllrohrtemperaturen bestimmen zu können, muss das CFD-Modell die Wärmeleitung im Brennstab möglichst genau abbilden. Der axiale Wärmetransport kann ggf. auch dazu führen, dass sich die Wärmestromdichte nahe der Phasengrenze zwischen Wasser- und Dampfphase stark erhöht und Blasensieden auftritt. Dieser physikalische Aspekt bedarf noch genauerer Untersuchung mittels räumlich aufgelöster CFD-Rechnungen.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Für die CFD-Modellierung der Projektpartner (TUD-ISM, HZDR) im AP3 ist es notwendig, Geometrieigenschaften des eingesetzten DWR-BE-Dummy und deren Auswirkungen auf die Strömung schon bei Erstellung der Gitternetzstruktur zu kennen. Weiterhin ist die Kenntnis der Eigenschaften

strömungsbeeinflussender lokaler Unstetigkeiten in Strömungsrichtung, wie z. B. der Abstandshalter (AH), auch für die Auswahl der Instrumentierung der vorgesehen Einzeleffektexperimente notwendig. Aus diesen Gründen wurden nach Absprache mit den Verbundprojektpartnern zwei prinzipielle Experimentierphasen im AP2 festgelegt:

- Einzeleffektexperimente mit Modellfluiden zur Analyse des Verhaltens gerichteter, isothermer Durchströmungen im DWR-Brennelement (BE)-Dummy und
- Einzeleffektexperimente mit Modellfluiden zur Analyse der Wechselwirkungen (Überström- und Austauschprozesse) zwischen dem oberen BE-Dummy-Bereich im Lagerbecken und dem darüber liegenden Raum sowie dessen Atmosphäre/Lüftung.

Im Berichtszeitraum wurden gerichtete isotherme Durchströmungsversuche mit dem DWR-Brennelement (BE)-Dummy vom Typ Focus $16 \times 16-20$ mit drei Abstandshaltern (AH), BE-Kopf und BE-Fuß für große Reynolds (Re)-Zahlen durchgeführt, strömungsrelevante Parameter für die Modellierung, wie Druckverlustbeiwerte und Rohrreibungszahlen, bestimmt und mit den Angaben aus der Literatur verglichen. Dabei kamen als Modellfluide für die niedrigen Re-Zahlen Wasser und Luft zum Einsatz.

Die Ergebnisse stimmen gut mit den Angaben aus der Literatur überein.

Bei den Untersuchungen mit kleinen Re-Zahlen wurde mittels eines invasiven Messverfahrens (Staurohr) die lokale Strömungsgeschwindigkeit im Zentrum eines nicht von Steuerabführungsrohren beeinflussten Kühlkanals zwischen den Brennstäben gemessen. Die Gegenüberstellung zwischen sehr kleinen Re-Zahlen ($Re = 1$ bis 4) und der lokalen Geschwindigkeit im Kühlkanalzentrum ergab eine quadratische Abhängigkeit.

Für die zweite Experimentierphase wurden konstruktive Details der Versuchsanordnung festgelegt und notwendige Zusatzausrüstungen bestimmt.

Analysen zur Modellierung des radialen Strahlungsverhaltens für AP4 ergaben, dass insbesondere der Emissionsgrad der Materialien und die Einstrahlzahl von Bedeutung sind. Für SWR-BE-Bedingungen liegen Einstrahlzahlberechnungen vor, die auf geometrischen Analysen beruhen und innerhalb eines BE mit Wasserkasten zur Anwendung kommen können.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die gerichteten, isothermen Durchströmungsversuche werden für weitere Randbedingungen fortgesetzt, um die Datenbasis zu erweitern und die experimentellen Ergebnisse abzusichern. Die Ergebnisse dienen der Validierung der bei den Projektpartnern durchgeführten Berechnungen, insbesondere zum Vergleich mit den nachgewiesenen Druckverlusten über die AH mit Druckrückgewinnung im Nachlauf.

Im Folgezeitraum wird die Errichtung und Inbetriebnahme des Versuchsstandes der Experimentierphase 2 erfolgen.

Die Ergebnisse zum radialen Strahlungsverhalten in SWR-BE werden auf die Verhältnisse in DWR-BE angewendet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum fanden im Rahmen des Projektes folgende Arbeitstreffen statt:

Arbeitstreffen am 28.10.2014 an der Hochschule Zittau/Görlitz, zur Vorstellung des Arbeitsstandes aller Projektpartner

Arbeitstreffen am 18.11.2014 an der TU-Dresden ISM, zur Bestimmung der Randbedingungen der geplanten Versuchsreihen

Arbeitstreffen am 02.12.2014 an der TU-Dresden ASP, zur Präsentation des Arbeitsstandes der Projektpartner

Es wurde ein Vortrag aus Anlass des Doktorandenseminars des Kompetenzzentrums Ost für Kerntechnik am 04.12.2014 in Zittau gehalten: Chahi, H., Kästner, W., Alt, S.: "System analysis of Experiments for specific measurements and modeling of boundary conditions at the balance limits"

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

AP2: Als Primärmessverfahren wird die thermische Anemometrie im Gittersensorprinzip angesehen. Das Alternativkonzept beruht auf der time-of-flight Methode. Diese kann sowohl thermisch durch Messung der Laufzeit eines Wärmeimpulses als auch durch Messung der Laufzeit von sinkenden Partikeln zwischen zwei Laserebenen umgesetzt werden.

AP3: Eine speziell für die Anwendung im Gittersensor entwickelte Einkanal-Elektronik für den CTA Betrieb konnte erfolgreich getestet werden. Weiterhin wurde die Zeitkonstanten-Methode erfolgreich auf deren Anwendbarkeit mit PT100-Sensoren untersucht.

In Simulationsrechnungen zur Anwendbarkeit der verschiedenen Betriebsmoden (CTA, CCA, CVA, TTA) zur thermischen Anemometrie im Gittersensorprinzip wurden CTA und CCA als ungeeignet bewertet, da durch den notwendigen Schaltzyklus zum Multiplexen unerwünschte Potentialdifferenzen auftreten, welche ein Übersprechen und eine Verfälschung des Messergebnisses zur Folge haben. Derzeitiger Arbeitsstand in der Elektronikentwicklung ist ein Schaltplan, mit welchem sowohl die CVA als auch TTA Methode umgesetzt werden können.

Weiterhin wurden kommerziell verfügbare Platin-Temperatursensoren auf ihre Beständigkeit gegenüber überhitzten Wasserdampf getestet. Im Versuchszeitraum konnte keine Veränderung festgestellt werden, welche die Temperaturmesseigenschaften einschränken.

Für den Sensorträger und die Integration der Instrumentierung in den Integralversuchsstand an TUD-WKET wurden verschiedene Konzepte entwickelt und Musterstücke für den Sensorträger angefertigt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3: In der Elektronikentwicklung ist der nächste Schritt das PCB Design und Aufbau einer mehrkanaligen Elektronik. Diese soll an einer geeigneten Versuchseinrichtung mit einstellbarem Volumenstrom an jeden Messpunkt im Gitter untersucht werden.

Seitens des Gittersensors ist die Verbindungstechnik ein zentrales Thema. Neben der Kontaktierung der Sensoren auf den Sensorträger sind Verbindungen für die Messleitungen aus dem Integralversuchsstand heraus vorzusehen. Weiterhin wird ein Beschichtungsmaterial ausgewählt bzw. in Voruntersuchungen getestet, welches als elektrischer Isolator und Korrosionsschutz auf die Instrumentierung aufgetragen werden soll.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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

Seitens des AP1 hat im Berichtszeitraum ein Fachgruppentreffen zu den Arbeiten am Unteren Plenum am 24.11.2014 bei der GRS in Garching stattgefunden. Weiterhin wurde zum Meilensteinbericht M31 von RUB-LEE ein Review durchgeführt.

Der Unterauftragnehmer GRS hat in AP2, AP4 und AP6, der LRST in AP3 und AP5 folgende Arbeiten durchgeführt:

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

Ein 2D-Gleichungssystem mit explizitem Lösungsverfahren für das Schmelze-/Kruste-Gebiet wurde entwickelt, als Modell „LHEAD“ in ATHLET-CD (direkt in ECORE) implementiert und anhand von SWR-Anwendungsrechnungen auf Plausibilität getestet. Die Arbeiten wurden LRST-RWTH sowie IKE, KIT, RUB im November 2014 beim Treffen in Garching vorgestellt und diskutiert. Weitere Arbeitspunkte sind die Erstellung der Modellbeschreibung zu LHEAD sowie mittelfristig die Untersuchung einer möglichen Berücksichtigung der Segregation zwischen oxydischer und metallischer Phase der flüssigen Schmelze. Insgesamt sind die geplanten Arbeiten weitestgehend abgeschlossen, ggf. können durch Anwenderrückfluss kleinere Arbeiten notwendig sein.

UA-AP2.1: Datensatzbereitstellung

Im 1. Halbjahr 2014 wurde das seinerzeit bereits vorhandene DWR-Sample als Ausgangsbasis für einen Datensatz festgelegt. Der Basisdatensatz inkl. der Modelle für den Kern wurden nun erstellt und HZDR sowie IKE zur weiteren Bearbeitung im Juli übergeben. Die Implementierung der thermohydraulischen Modelle wurde in Zusammenarbeit mit HZDR abgeschlossen und der Datensatz an IKE für SAMG-Untersuchungen sowie KIT-IKET als Grundlage für einen MELCOR-Datensatzes übergeben. Auf dem Projekttreffen im November in Garching wurden der Datensatz bzw. die implementierten Modelle diskutiert und letzte Arbeiten bis Ende 2015 festgelegt. Darüber hinaus wurde HZDR bei der Dokumentation des Datensatzes unterstützt.

Der generische, 80 Zonen umfassende KONVOI-Datensatz für Containmentanalysen wurde fertig gestellt, getestet und RWTH-LRST übergeben. Die Ergebnisse der gekoppelten Analysen sowie die Reduzierung des COCOSYS-Datensatzes wurden beim Treffen im November 2014 präsentiert und mit den Projektpartnern diskutiert. Nach dem Meeting ist am 19.12.2014 die Entwicklerversion von ATHLET-CD inkl. des neuen Spätphasenmodells für das untere Plenum „LHEAD“ an RUB, IKE, KIT-INR und HZDR ausschließlich zur Testnutzung im Rahmen des Verbundvorhabens WASA-BOSS verteilt worden.

UA-AP2.2: Programmunterstützung

Die ATHLET-CD Anwender wurden von der GRS bei der Erstellung des Datensatzes und der Implementierung des Moduls AIDA unterstützt. Fortlaufend erfolgte eine Unterstützung der Anwender bei auftretenden Programmabbrüchen und programmspezifischen Fragestellungen.

UA-AP3.1: Auswahl AM-Maßnahmen

Für den vom IKE verfassten Meilensteinbericht M41 wurde ein Review durchgeführt.

AP3: Im Rahmen der Kopplung von COCOSYS und CoPool fand am 29.07.2014 ein Treffen zwischen den COCOSYS-Entwicklern (GRS Köln) und RWTH-LRST in Köln statt, bei dem wichtige Punkte zur Schnittstelle zwischen beiden Programmen besprochen wurden. Intensiver Austausch zu unterschiedlichen Fragestellungen fand in den folgenden Monaten immer wieder telefonisch statt und für die 1. Februarwoche 2015 ist ein weiteres Treffen mit der GRS Köln geplant.

Seitens des Quellcodes des COMO-Modells wurde an der Refaktorisierung gearbeitet, durch die eine flache Abfrage-Hierarchie im Quellcode für Fallunterscheidungen erreicht wird. Zudem wurden Änderungen durchgeführt, die dem Anwender ermöglichen, die Nodalisierung des Gebäudekondensators individuell an die Umgebungsmodalisierung im Datensatz anzupassen.

AP5: Die Ergebnisse der UaSA für den 20-Zonendatensatz wurden analysiert, wobei nicht unbedingt zu erwartende Ergebnisse bezüglich der Menge an Aerosolen und deren chemische Zusammensetzung gefunden wurden. Dieser Sachverhalt wurde mit dem Unterauftragnehmer GRS im Anschluss an das Fachgruppentreffen im November in Garching ausgiebig diskutiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP2: Die Fertigstellung der Entwicklung eines SWR-Modells für das untere Plenum unter Einbezug des Informationsrückflusses durch Anwender ist vom Unterauftragnehmer GRS für den nächsten Berichtszeitraum geplant.
- AP3: Die Arbeiten am Quellcode des COMO-Modells sollen fortgesetzt und abgeschlossen werden, so dass im Anschluss daran der geänderte Quellcode sowohl durch RWTH-LRST als auch den COCOSYS-Entwickler GRS getestet werden kann. Zudem wird die Detailabstimmung der Kopplungsstrategie mit dem COCOSYS-Entwickler GRS erfolgen.
- 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 weiter auszuwerten. Zudem soll mit der UaSA für den im Juni 2014 übergebenen 80-Zonendatensatzes begonnen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Gemeinsam mit RUB-LEE (Prof. Koch) wurde eine eigene technische Session für Arbeiten aus den Verbundprojekten WASA-BOSS und CESAM bei der Jahrestagung Kerntechnik 2015 organisiert.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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-INR), der Ruhr-Universität Bochum - Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft (RUB-LEE) und der RWTH Aachen - Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und -technik (RWTH-LRST) durchgeführt und ist über einen Kooperationsvertrag mit den weiteren Teilvorhaben des Projektverbundes 02NUK028 verbunden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Rahmen des Verbundprojekts beteiligt sich HZDR an den Arbeitspaketen 3.2, 4.1 und 4.2.

Entsprechend dem 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

Gemeinsam mit GRS und IKE wurden die Arbeiten am generischen KONVOI Datensatz abgeschlossen. Seitens HZDR wurden das Thermohydraulik-Modell sowie GCSM-Modelle für Reaktorschutz, Sicherheitssysteme und Notfallmaßnahmen verbessert bzw. neu implementiert. Die störfallspezifische GCSM-Steuerung wurde soweit verbessert, dass die KONVOI typischen Maßnahmen aus Reaktorschutz und Regelungen/Begrenzungen für die zu simulierenden Störfälle abgebildet werden. Für die primärseitige Bleed&Feed Strategie wurden Modelle für die primärseitige Druckentlastung (PDE) und die Bespeisung mit einer Feuerlöschpumpe entwickelt. Das Kernzerstörungsmodul ECORE wurde für Simulationen mit unterschiedlichen Kernzuständen (BOC, EOC) weiterentwickelt. Der Datensatz wurde mit einer neuen stationären Rechnung für eine höhere Reaktorleistung von 3850 MWth abgeglichen. Mit dem ATHLET-CD Datensatz wurden Simulationen für ausgewählte Leckstörfälle und Station Blackout (SBO) Szenarien mit und ohne Anwendung von Notfallmaßnahmen durchgeführt:

- 50 cm² Leck im kalten Strang mit und ohne 100 K/h Abfahren sowie mit und ohne Berücksichtigung der HD- und ND-Notkühleinspeisung,
- SBO ohne und mit PDE sowie Rechnungen mit Einspeisung einer Feuerlöschpumpe.

Für die Einspeisung mittels Feuerlöschpumpe beim SBO wurden Variationsrechnungen bezüglich Einspeisezeitpunkt und Nullförderhöhe der Pumpe durchgeführt. Alle Ergebnisse wurden auf Plausibilität und bezüglich der zu erwartenden Phänomenologie der Störfallabläufe geprüft. Die wesentlichen Ereignisse und Phänomene sowie die Ergebnisse bezüglich der Wirksamkeit der Notfallmaßnahmen wurden in einer technischen Notiz und im Bericht zum Meilenstein M32 dokumentiert und allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt. HZDR beteiligte sich an der Erstellung des Berichts zum Meilenstein M42a. Für die Entwicklung des KONVOI Datensatzes und ausgewählter Simulationen wurde ein Beitrag für die Jahrestagung Kerntechnik 2015 eingereicht. HZDR beteiligte sich an einem Meeting am 25.11.2014 zur Diskussion offener Fragen zur Datensatzentwicklung. Es wurde ein Vergleich zwischen ATHLET-CD und ATHLET Rechnungen aus der Parameterstudie durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

In den nächsten 6 Monaten sind folgende Arbeiten geplant:

- Auf Basis der ATHLET Parameterstudie wird anhand ausgewählter Szenarien ein Vergleich mit ATHLET-CD Simulationen für das 50 cm² Leck durchgeführt
- Die SBLOCA und SBO Simulationen werden mit der Ende Dezember 2014 freigegebenen Codeversion ATHLET-CD 3.0B wiederholt, die Ergebnisse werden geprüft und bewertet
- Es werden Testrechnungen mit den Modulen OREST und FIPISO durchgeführt
- Die Simulationen zur Anwendung von Notfallmaßnahmen werden weitergeführt
- Erstellung einer PIRT Tabelle und erste Testrechnungen für die Unsicherheitsanalysen

5. Berichte, Veröffentlichungen

F. Schäfer, P. Tusheva, Y. Kozmenkov, S. Kliem, T. Hollands, M. Buck, A. Trometer, 2014. Technical Note. ATHLET-CD model for a generic KONVOI reactor and test simulations for selected SBO and SBLOCA scenarios. 28.10.2014 (projektinterner Bericht).

P. Tusheva, F. Schäfer, Y. Kozmenkov, S. Kliem, T. Hollands, A. Trometer, M. Buck, 2014: Simulation of postulated accidents/severe accidents in German NPPs. December 2014. (Meilensteinbericht M32, 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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 Entwicklung des von GRS, HZDR und IKE gemeinsam erstellten und überprüften generischen ATHLET-CD-Datensatzes für DWR-Konvoi wurde abgeschlossen.
- AP1.2: Der ATHLET-Eingabedatensatz für eine generische Anlage des Typs SWR-72 wurde weiter entwickelt und um die Modellierung des unteren Plenums ergänzt. Hierfür wurden Varianten sowohl für das bisherige AIDA-Modul als auch für das von der GRS im Rahmen des WASA-BOSS-Projekts neu entwickelte LHEAD-Modul realisiert.
- AP1.4: Die Rechnungen mit ATHLET-CD zu ausgewählten Störfallszenarien ohne Simulation von AM-Maßnahmen wurden fortgesetzt. Für DWR-Konvoi konzentrierten sich die Arbeiten auf die Störfallszenarien mittleres Leck im heißem Strang und großes Leck (Abriss einer Hauptkühlmittelleitung). Es wurde jeweils der Ausfall der aktiven Notkühlsysteme unterstellt. In den Rechnungen wurde der Störfallablauf mit Kernschmelzen bis hin zum Versagen des Reaktordruckbehälters simuliert. Im Fall des mittleren Lecks tritt das Behälterversagen in der unteren Kalotte infolge eines durch die dort angesammelte Schmelze thermisch induzierten Kriechversagens nach ca. 23000 s auf. Zu diesem Zeitpunkt haben sich ca. 14 m³ Schmelze im unteren Plenum angesammelt. Im Störfallszenario mit großem Leck treten Behälterversagen etwas früher nach 22400 s auf, das Volumen der im unteren Plenum akkumulierten Schmelze ist mit ca. 15 m³ geringfügig höher. Für SWR-72 wurde als Basisszenario ein Station-Blackout untersucht. Hierbei konnten die Rechnungen noch nicht bis zum Behälterversagen fortgesetzt werden, da es aufgrund numerischer Probleme zu Programmabbrüchen kam.
- AP3.2: Für die Szenarien „mittleres Leck“ und „großes Leck“ in DWR-Konvoi wurden die systematischen Untersuchungen zur Wirksamkeit später Wassereinspeisung bei unterschiedlichem Kernschadenszustand mit Variation von Einspeiserate, -ort und Zeitpunkt fortgeführt. Als wesentliche Hindernisse für eine erfolgreiche Kühlung erwiesen sich der Druckaufbau durch starke Verdampfung, der zeitweilig die Einspeiseraten stark reduziert, die Aufheizung durch verstärkte Hüllrohroxidation bei hohem Dampfangebot sowie Blockaden durch verlagerte und angefrorene Schmelze.
- AP4: Die Untersuchungen zur Schüttbettbildung und -kühlung im Steuerstabsantriebsraum von SWR wurden fortgeführt. Als Eckpunkte wurden Szenarien mit frühem Versagen des RDB (z. B. an Durchführungen) und geringer Ausfließrate von Schmelze sowie spätes Versagen nach Bildung eines Schmelzesees in der unteren Kalotte und hoher Ausfließrate untersucht. Im ersten Fall wird laut den Simulationsergebnissen die Schmelze in der Wasservorlage ausreichend fragmentiert und abgeschreckt, so dass sich ein kühlbares Schüttbett aus losen Partikeln bildet. Im zweiten Fall kann unvollständige Fragmentierung bei ausreichend großen Ausfließraten zu unkühlbaren Konfigurationen führen.
- AP6.1: Ein Beitrag zum Meilensteinbericht M32 „Simulation postulierter Störfälle/Unfälle in deutschen Anlagen“ wurde erstellt. Der Meilensteinbericht M42 „Zwischenergebnisse zu Störfalluntersuchungen“ wurde im Entwurf fertiggestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.4: Fortsetzung der Untersuchungen zu Störfallszenarien ohne AM-Maßnahmen für mittleres und großes Leck sowie Station Blackout für DWR und Station Blackout für SWR-72.
- AP3.2: Abschluss der 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: Fortsetzung der Untersuchungen zur Schüttbettbildung und -kühlung im Steuerstabsantriebsraum von SWR.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- A. Trometer, M. Buck, J. Starflinger: Investigation on cooling possibilities of a degraded core in a MBLO-CA scenario for a German PWR with ATHLET-CD, Proceedings of 19th Pacific Basin Nuclear Conference PBNC 2014, Vancouver, Canada, August 24-28, 2014.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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. Die Vorgänge oder Parameter die im neuen Modell berücksichtigt werden, sind Wasserfilmdicke, Abbruch des Films und Struktur des Filmrinnens. Als Randbedingung wird auch die Schubspannung an der äußeren Oberfläche des Films herangezogen.
- 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 des europäischen generischen Sicherheitsbehälters sowie des PCCS von AP1000.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Berichtszeitraum sind folgende Arbeiten durchgeführt:

- Erweiterung des Modells unter Berücksichtigung des Hysterese-Effekts;
- Validierung des Modells anhand zusätzlicher Versuchsdaten;
- Anwendung des Modells auf dem europäischen generischen Sicherheitsbehälter, um den Effekt des Modells auf das Verhalten des Sicherheitsbehälters zu überprüfen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Verbesserung des Modells anhand Validierung durch weitere Versuchsdaten;
- Anwendung des modifizierten COCOSYS Programms auf den AP1000 Sicherheitsbehälter;
- Vergleich der Ergebnisse aus COCOSYS mit denen aus MELCOR.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Huang X, Cheng X. Modification and application of water film model in COCOSYS for PWR's passive containment cooling. Nuclear Engineering and Design, 2014, 280: 251-261.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 01.01.2014 - 30.06.2014 im Punkt „geplante Weiterarbeiten“ aufgeführte Kopplung des PECM an MELCOR wurde erfolgreich abgeschlossen. (Dazu wird auf KTG-Tagung im Mai 2015 in einer Präsentation berichtet). Mit dieser neuen Software wurde das Experiment LIVE-L1 nachgerechnet und mit den Ergebnissen der bereits zuvor im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Rechnung mit Standard-MELCOR verglichen. (Darüber wird im Mai 2015 auf der ICONE-23 berichtet).

Weiterhin wurde mit der Modellierung eines generischen deutschen DWR nach der Vorgabe durch einen durch die GRS gelieferten ATHLET-CD-Datensatz begonnen.

AP2: Da über US-NRC (US-Nuclear Regulation Commission) bereits ein MELCOR-Datensatz für das KKW Peach Bottom verfügbar war, dessen Containment mit dem von Fukushima 3 vergleichbar ist, wurden auf der Grundstruktur dieses Datensatzes ein neuer Datensatz für Fukushima 3 aufgebaut. Die Unterschiede ergaben sich im Wesentlichen aus den unterschiedlichen thermischen Leistungen (Peach Bottom: 1171 MW, Fukushima: 2381 MW). Dadurch ändern sich der Aufbau des Kerns und damit auch die geometrischen Dimensionen verschiedener anderer Komponenten. Es wurde mit diesem Datensatz eine erste Rechnung durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: Es werden weitere Datensätze zur Nachrechnung von Experimenten in der LIVE-Anlage erstellt.

Es wird ein LIVE-Experiment durchgeführt und nachgerechnet, bei dem im Gegensatz zu früheren Experimenten das Kühlwasser an der Außenseite siedet.

Der MELCOR-Datensatz des generischen deutschen DWR wird weiterentwickelt. Diese Arbeiten sollen bis Ende 07/15 abgeschlossen sein.

AP2: Die durchgeführte MELCOR-Rechnung wird detailliert ausgewertet und mit der Rechnung von der Ruhr-Universität-Bochum verglichen. Danach werden eine Analyse bezüglich der Datenunsicherheiten und deren Einfluss auf die Ergebnisunsicherheit durchgeführt.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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. Dieses Arbeitspaket wurde abgeschlossen.

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

- Für einen generischen deutschen Siedewasserreaktor wurde mit ATHLET-CD 3.0A ein auslegungsüberschreitender Unfall mit einem kleinen Leck in der Frischdampfleitung innerhalb des Sicherheitsbehälters simuliert. Dabei wird angenommen, dass die vorhandenen Sicherheitssysteme versagen.
- Ausgehend von dieser Simulation, in der es zu einer Freilegung und damit in Folge zu einer Zerstörung des Kerns kommt, wurden Simulationen durchgeführt, in denen der Kern in unterschiedlichen Schädigungsstufen (z. B. 17 t bzw. 70 t geschmolzenes Kernmaterial) geflutet wird. Dabei wurde eine Niedrigdrucknoteinspeisung von maximal 600 kg/s bei einer Temperatur von 40 °C angenommen.
- Das Fluten des trockenen und teilweise geschmolzenen Kerns führt zu einer starken Freisetzung von Wasserstoff (140 kg) in wenigen Minuten. Der integrale Wert des produzierten Wasserstoffs liegt für beide Fälle nur 20 % unterhalb der Menge, die entsteht, wenn nicht geflutet wird.
- In der gleichen Zeit wird die maximale Temperatur des Hüllrohrmaterials um mehr als 1000 °C abgesenkt und ein weiteres Schmelzen des Kerns verhindert.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Weitere Verbesserung des Anlagenmodells zur Simulation der Verlagerung der Schmelze in das untere Plenum und des Versagens des Reaktordruckbehälters sowie Berechnungen zur Flutung nach Versagen des Druckbehälters.
- Erarbeitung einer optimierten Strategie beim Fluten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Vorbereitet:

WASA-BOSS: Investigation of the coolability of partly-damaged BWR core by water injection into the RPV, Jahrestagung Kerntechnik 2015, 7 – 8 Mai, Berlin

ATHLET-CD analysis of water injection into a partly-damaged BWR core for accident management improvement, ICONE-23, May 17-21, 2015, Chiba, Japan

Zuarbeit zum Bericht (Milestone M42): Kühlbarkeit eines zum Teil zerstörten Kerns durch Einspeisung von kaltem Wasser in den Reaktordruckbehälter (RDB), September 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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: Der Technische Fachbericht zum Meilenstein M31 wurde nach dem internen Review überarbeitet und den Projektpartnern zugänglich gemacht. Aktuelle, kürzlich veröffentlichte Analysen zum Ausfall des RCIC-Systems in Block 3 wurden zur Ergänzung der Datenlage aufgenommen.
- AP2: Das simulierte Anlagenverhalten in Fukushima-Daiichi Block 3 wurde hinsichtlich der für eine plausible Simulation erforderlichen Annahmen überprüft. Fehlende Daten zu den Einspeiseraten konnten durch Sensitivitätsrechnungen abgeschätzt werden. Die vorläufigen Simulationsergebnisse zeigen eine gute Wiedergabe des thermohydraulischen Anlagenverhaltens, so dass der simulierte Anlagenzustand zu Beginn der Kernzerstörungsphase adäquat abgebildet wird. Ausgewählte, vorläufige Simulationsergebnisse wurden in einem Beitrag zur atw veröffentlicht. Weiterhin wurde die Kernmodellierung anhand von anlagenspezifischen Daten weiter anpasst. Eine Berichtsstruktur für den Technischen Fachbericht zum Meilenstein M33 wurde erstellt und zusammen mit relevanten Daten für die Fukushima-Simulation sowie den vorläufigen ATHLET-CD-Ergebnissen an den Projektpartner KIT-IKET gesendet, um die Zusammenarbeit und jeweiligen Beiträge zum Fachbericht zwischen den beteiligten Projektpartnern RUB und KIT-IKET zu koordinieren.
- AP4: Ein in FORTRAN programmierter Ansatz zur Abbildung der Schmelzeverlagerung ins untere Plenum des Reaktordruckbehälters wurde zunächst als „Stand-Alone-Version“ erstellt und in die Codestruktur von ATHLET-CD implementiert. Erste Rechnungen zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Modells wurden anhand einer Simulation des TMI-2-Unfalls erfolgreich durchgeführt und zeigten plausible Ergebnisse hinsichtlich des Verlagerungsverhaltens der Schmelze. Das entwickelte Verlagerungsmodell wurde am 24.11.2014 den Codeentwicklern der GRS vorgestellt und hinsichtlich einer engeren Kopplung an ATHLET-CD diskutiert.

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: Weitere Anpassungen des Datensatzes auf die BWR4-Auslegung werden erarbeitet. Ein Technischer Fachbericht (mit Beiträgen von KIT-IKET) wird erstellt.
- AP3: Der Einfluss der Einspeiseraten auf die Kernkühlbarkeit im Unfallablauf von Block 3 soll anhand der Fukushima-Simulation zunächst detaillierter analysiert werden.
- AP4: Das entwickelte Verlagerungsmodell wird weiter überprüft und gezielt erweitert. Anhand der Fukushima-Simulation soll die Spätphasenmodellierung von ATHLET-CD überprüft und bewertet werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Hoffmann, M.; Koch, M. K.: Harmonisierung der Datenlage zum Unfall in Fukushima-Daiichi, Technischer Fachbericht zum Meilenstein M31 des Verbundvorhabens WASA-BOSS (BMBF 02NUK028G), LEE-90, April 2014.

Brähler, T.; Gremme, F.; Hoffmann, M.; Koch, M. K.: Application Of Severe Accident Analysis Codes For Plant Calculations, Erschienen in: atw – International Journal for Nuclear Power, Vol. 59(2014), Issue 08/09, pp. 518-521 August/September 2014.

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart – Otto-Graf-Institut – Materialprüfanstalt, Pfaffenring 32, 70569 Stuttgart		Förderkennzeichen: 02 NUK 040A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UNSCHRO: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Beschreibung der Schädigung metallischer Rohrleitungen bei turbulenter Durchströmung im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen, Teilprojekt A: Mischnähte, Ausströmen		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2014 bis 30.09.2017	Berichtszeitraum: 01.10.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 541.890,00 EUR	Projektleiter: Schuler	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Verbesserung des Verständnisses und der Grundlagen zur quantitativen Beschreibung der Wechselwirkungsvorgänge zwischen dem Wandwerkstoff druckbeaufschlagter Komponenten und der turbulenten Durchströmung bei hohen Drücken bis zu 75 bar. Zum einen soll die thermische Wechselbelastung einer Rohrumfangsschweißnaht (Mischschweißnaht) untersucht werden, welche sich stromab einer Einspeisestelle warm/kalt (T-Abzweig) befindet. Zum anderen soll kontrolliert eine Leckstelle (wanddurchdringender Fehler/Leck definierter Größe in Rohrbauteil) eingebracht werden, deren Verhalten unter dem Einfluss des Innendruckes, der Temperaturverteilung und der turbulenten Strömung untersucht wird. Das Vorhaben baut direkt auf dem Vorhaben 02NUK009A auf und nutzt den im Rahmen dieses Vorhabens aufgebauten Versuchskreislauf. In diesem Zusammenhang werden vom Institut für Kernenergetik (IKE) Universität Stuttgart und der Materialprüfanstalt (MPA) Universität Stuttgart experimentelle und numerische Untersuchungen von LWR-spezifischen Rohrleitungselementen durchgeführt. Ziel ist die gekoppelte dreidimensionale Simulation und experimentelle Validierung der Vorgänge bei im Rohrleistungssystem auftretenden Rohrumfangsschweißnähten und rissartigen Lecks. Zur Charakterisierung des mechanischen Verhalten von Mischweißnähten werden Laborproben im Ermüdungsversuch an Luft und bei Bedingungen des LWR-Mediums geprüft sowie Rohrstücke mit Rohrumfangsschweißnaht unter realen Bedingungen (75 bar, 280 °C) im Versuchskreislauf untersucht. Experimentelle Untersuchungen zum Ausströmverhalten aus rissartigen Lecks sollen den bisherigen Kenntnisstand verfügbarer Berechnungsmodelle prüfen und erweitern. Das IKE-Teilprojekt (02NUK040B) umfasst die messtechnische Erfassung der Strömungsvorgänge im Versuchskreislauf sowie die strömungsmechanische Modellierung (Thermofluiddynamik) mit entsprechenden Simulationsrechnungen. Das MPA-Teilprojekt (02NUK040B) beinhaltet den Umbau der bestehenden FSI-Versuchsanlage entsprechend den Vorhabenszielen, die Durchführung von Ermüdungsversuchen an Laborproben sowie die Durchführung von Ermüdungsversuchen an geschweißten Rohrmodulen bzw. Ausströmversuchen an Leckmodulen. Strukturmechanische Berechnungen werden eingesetzt um Werkstoffmodelle anhand von Ermüdungsversuchen mit Laborproben aufzubauen um das mechanische Verhalten der Mischschweißnaht- bzw. Leckmodule numerisch abzubilden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP: Untersuchungen an einer Mischschweißnaht, im Einzelnen: Werkstoffcharakterisierung (AP1.1), Strömungstechnische Untersuchungen (AP1.2), Versuchskreislauf und Versuchsdurchführung (AP1.2.1), Durchführung der Messungen (AP1.2.2), Auswertung der Messergebnisse (AP1.2.3), Gekoppelte Simulation (AP1.3)

AP2: Ausströmverhalten aus einem Leck, im Einzelnen: Teststrecke und Versuchsdurchführung (AP.2.1), Messung der Leckströmung (AP2.2), Gekoppelte numerische Simulation (AP2.3), Bewertung der Messergebnisse (AP2.4)
AP3: Berichtswesen

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1.1: Mit der Fertigung von Laborproben zur Durchführung der Ermüdungsversuche wurde begonnen.
AP1.2: Die Planung der Umbaumaßnahmen am Versuchsstand für AP1 wurde durchgeführt. Das Konzept für die Fertigung der Mischnahtmodule wurde erstellt.
AP1.2.1: Noch nicht begonnen.
AP1.2.2: Noch nicht begonnen.
AP1.2.3: Noch nicht begonnen.
AP2.1: Noch nicht begonnen.
AP2.2: Noch nicht begonnen.
AP2.4: Noch nicht begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1.1: Weiterführung der Fertigungsarbeiten von Proben und Beginn der Ermüdungsversuche.
AP1.2: Umbau des Versuchsstands und Fertigung der Mischnahtmodule.
AP2.1: Planungsarbeiten für den Umbau des Versuchsstands und die Gestaltung der Leckmodule.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart, Keplerstr.7, 70174 Stuttgart		Förderkennzeichen: 02 NUK 040B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt UNSCHRO: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Beschreibung der Schädigung metallischer Rohrleitungen bei turbulenter Durchströmung im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen, Teilprojekt B: Numerische Simulation turbulenter Strömung		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Reaktorsicherheit		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2014 bis 30.09.2017		Berichtszeitraum: 01.10.2014 bis 31.12.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 840.216,00 EUR		Projektleiter: Prof. Dr. Laurien

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Forschungsvorhaben ist als Verbundprojekt zusammen mit der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart angelegt. In diesem Zusammenhang sollen im Rahmen des Teilprojekts B Untersuchungen an einer Rohrrundschweißnaht (ausgeführt als Mischschweißnaht) unter thermisch fluktuierender Beanspruchung stromab einer Vermischungsstelle (T-Abzweig) durchgeführt werden.

Des Weiteren sollen rissartige Lecköffnungen in die Rohrwand kontrolliert eingebracht und Leckströmungen sowie deren Umgebung bei unterschiedlichen Temperaturen, Drücken und Strömungsbedingungen vermessen werden.

Für genannte Untersuchungen werden im modular aufgebauten Rohrleitungsversuchsstand (Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) Versuchskreislauf) Messungen der turbulenten Strömungsgrößen und der Temperaturverteilung in der Rohrwand in der Nähe einer Mischschweißnaht sowie einer rissartigen Leckstelle bei realitätsnahen Versuchsbedingungen ($p_{\max} = 75 \text{ bar}$, $T_{\max} = 280 \text{ °C}$) durchgeführt.

Die ein- und zweiphasige Strömungs-Struktur-Wechselwirkung wird außerdem mit zeitabhängig gekoppelten numerischen CFD-Simulationen unter Zuhilfenahme der Large-Eddy-Simulation untersucht sowie mit den erhaltenen experimentellen Ergebnissen verglichen.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundprojekt ist in 2 Arbeitspakete (AP) unterteilt.

AP1: Untersuchungen Mischschweißnaht
 AP1.2: Strömungstechnische Untersuchungen
 AP1.3: Gekoppelte numerische Simulation

AP2: Untersuchungen zum Ausströmverhalten aus einem Leck
 AP2.2: Messung der Leckströmung
 AP2.3: Gekoppelte numerische Simulation
 AP2.4: Bewertung der Messergebnisse

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Ein Versuchsstand zur Konditionierung des eingesetzten Particle-Image-Velocimetry (PIV)-Verfahrens wurde aufgebaut. An diesem Versuchsstand wird das Hintergrundschlieren (BOS)-Verfahren geprüft. Mit dem BOS-Verfahren kann die optische Störung in PIV-Messungen, die durch eine Brechungsindexänderung in der Strömung verursacht wird, reduziert werden. Zur Prüfung des BOS-Verfahrens wird in diesem Versuchsstand eine Brechungsindexstörung künstlich erzeugt, die den Störungen an der FSI-Anlage entsprechen können.
- AP2: Es wurde ein Versuchsstand zur Entwicklung und zum Testen der Messtechnik zur Bestimmung von Leckmassenströmungen bei erodierten Umfangsrissen entworfen. An diesem Versuchsstand werden bei gleichem Rohrdurchmesser und –wandstärke, bei niedrigerem Druck ($p_{\max} = 10 \text{ bar}$) und niedrigerer Temperatur ($T_{\max} = 180 \text{ °C}$) als an der FSI-Versuchsanlage, Messungen durchgeführt. Mit diesem Versuchsstand wird zudem die Leckeinströmung an der Rohrinneinnenseite mit Hilfe eines Endoskops und Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Im nächsten Schritt werden am BOS-Versuchsstand Messungen durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit des BOS-Verfahrens zu überprüfen.
Außerdem wird ein weiterer Versuchsstand konstruiert und aufgebaut, mit dem das dynamische Verhalten von Mikrothermoelementen bestimmt werden soll.
- AP2: Die Konstruktion des Versuchsstands wird abgeschlossen. Im Anschluss werden die Bauteile beschafft und der Versuchsstand aufgebaut. Erodierete Schlitze in Absprache mit der MPA werden in die Rohrleitung eingebracht.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 an der nELBE Photoneutronenquelle zwei Messzeiten durchgeführt. Vom 15.-21.09. wurde die inelastische Streuung an ^{56}Fe mit einem neuen Versuchsaufbau zur Messung der Winkelverteilung der emittierten Gammastrahlung untersucht. Dazu wurden 5 LaBr_3 Szintillatoren und 5 HPGe Detektoren eingesetzt. Diese Daten sollen von einem neuen Masterstudenten (Mirko Dietz) ausgewertet werden. Mit der ^{242}Pu Spaltkammer wurde vom 10.-16.11. eine Messung des Spaltquerschnitts relativ zur H19 Spaltkammer der PTB durchgeführt. Die Diskriminatoren der Messelektronik wurden optimiert, um auch Signale mit langen Anstiegszeiten zuverlässig zu messen.

Die Daten zu totalen Neutronenquerschnitten sind ausgewertet. Beim ^{238}U hat sich leider gezeigt, dass das ^{238}U Transmissionstarget kein reines Uran enthält, sondern 6 % Nb beige-mischt sind. Die Daten von ^{197}Au , $^{\text{nat}}\text{W}$ und $^{\text{nat}}\text{Fe}$ passen mit einer Abweichung von weniger als 1 Prozent zu den Messungen bei höheren Neutronenenergien am LANL und zu den Messungen bei niedrigeren Neutronenenergien am IRMM.

Dr. Roland Beyer hat seine Dissertation an der TU Dresden am 24.11.2014 mit „magna cum laude“ abgeschlossen und ist nun als „beam line scientist“ an der Photoneutronenquelle tätig.

Dr. Ralf Massarczyk hat seine Dissertation an der TU Dresden am 16.10.2014 mit „magna cum laude“ abgeschlossen und ist nun als Postdoc am Los Alamos National Laboratory, USA.

Roland Hannaske hat seine Dissertation am Fachbereich Physik TU Dresden eingereicht, das Rigorosum ist für das Frühjahr 2015 geplant. Inzwischen hat er bereits eine Stelle am Umweltministerium des Landes Brandenburg in Potsdam angetreten.

Das Fifteenth International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics (CGS15) wurde vom HZDR und der TU Dresden vom 25.-29.08.2014 von Ronald Schwengner und Kai Zuber organisiert. Vor 170 Teilnehmern wurden u. a. die Ergebnisse des TRAKULA Projekts vorgestellt. Bei der Sommerschule „Neutrons and Nuclei“ Ecole Joliot-Curie in Frejus, Frankreich vom 28.09.-03.10.2014 waren Arnd Junghans und Ralf Nolte eingeladene Lecturer. Toni Kögler und Roland Beyer haben an der Schule teilgenommen und ihre Arbeit in Postern vorgestellt. Toni Kögler hat einen Vortrag auf dem Fission-Theory III Workshop in Opatia, Kroatien, organisiert vom JRC-IRMM, Geel, gehalten. Am HZDR hat der Internationale Workshop on elastic and inelastic neutron scattering vom 3.-5.12. als Expertentreffen zur Streuung schneller Neutronen stattgefunden. Neben Ergebnissen aus dem TRAKULA Projekt wurde auch die neue Flugzeitneutronenanlage des HZDR vorgestellt. Die Veröffentlichung R. Beyer et al., Inelastic scattering of fast neutrons from excited states in ^{56}Fe , Nuclear Physics A 927 (2014) 41–52 war von April – Juni 2014 der *am meisten gelesene* Artikel der Zeitschrift Nuclear Physics A.

4. Geplante Weiterarbeiten

Fertigstellung der Analyse der ^{242}Pu Spaltexperimente, Abschluss der Promotion von Toni Kögler bis 30.06.2015.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Grosse, E., Junghans, A.R., Massarczyk, R.: Broken axial symmetry as essential feature to predict radiative capture in heavy nuclei, Phys. Lett. B 739 (2014) 425–432

<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2014.10.051>

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 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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:

- AP1: Dreiwertige Actinide Pu, Am, Cm (Einbau in und Wechselwirkung mit Phosphaten, Carbonaten, Eisen(hydr)oxiden)
- AP2: Vierwertige Actiniden Th, U, Np, Pu (Einbau in und Wechselwirkung mit Silicaten, Sulfaten, Carbonaten, Phosphaten, Sulfiden, Eisen(hydr)oxiden, LDH-Phasen)
- AP3: 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.

AP1: *Status*: Es wurden AFM-Messungen mit Nanometer-Auflösung an Calcit-Einkristallen in Gegenwart von NaNO_3 , Na_2SO_4 und NaClO_4 in Zusammenarbeit mit der Universität Durham zur Aufklärung des Mechanismus der Oberflächenveränderungen durchgeführt. Zusätzliche TRLFS-Untersuchungen mit Eu(III) in Calcit konnten den zeitlichen Verlauf des Einbaus durch Rekristallisation näher beleuchten. Quantitative analytische Untersuchungen zur Gd- Aufnahme von Calcit als Funktion der Zeit mit NaNO_3 , NaCl und Na_2SO_4 als Hintergrundelektrolyten wurden beendet. Die Bestimmung von Rekristallisationsraten in Anwesenheit verschiedener Elektrolyte wurde mit Hilfe von Ca-45 als radioaktivem Tracer untersucht und liefert einen Beitrag zur systematischen Erklärung der elektrolytbedingten Effekte.

AP2: *Status*: Thermodynamische Testrechnungen ergaben, dass ein Einbau vierwertiger Actiniden in Calcit nicht zu erwarten ist. Daher wurden die Arbeiten zu An(IV) in Calcit zugunsten vertiefter Arbeiten im An(III) Calcit System eingestellt.

AP3: *Status*:

Mit Hilfe kalorimetrischer Messungen wurde eine neue Methode erprobt die reaktive Oberfläche von Baryt Partikeln in einem wässrigen Medium zu bestimmen. Ein Manuskript zum Blei Einbau in Baryt-Celestin Mischkristalle wurde vorbereitet und wird Januar 2015 eingereicht.

Se(-II) Sorptionsisothermen wurden an C-S-H Phasen mit verschiedenen Ca/Si Verhältnissen sowie an AFm-CO₃ und AFm-OH-CO₃ Phasen gemessen. AFm-Phasen mit verschiedenen Se(IV) – CO₃ Verhältnissen sowie AFm Phasen mit verschiedenen Se(-II) – CO₃ Verhältnissen wurden synthetisiert und charakterisiert. Die Langzeit-Batch-Sorptionsexperimente mit Se(IV) unter wechselnden Redoxbedingungen dauern noch an. Eine 3. EXAFS Messzeit wurde durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1: (a) Abschließende Arbeiten zur Rekristallisation mit Ca-45 (b) Publikation der AFM/CTR-Messungen zum NaNO₃-System und der CTR/RAXR-Messungen zur Sorption und Oberflächenfällung von Y(III).

AP2: Publikation der vorhandenen Daten.

AP3: Neue Experimente zur Synthese von Baryt-Celestin-Anglesit Mischkristall-Einkristallen werden durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Experimente sowie die Ergebnisse der kalorimetrischen Untersuchungen sollen veröffentlicht werden. Abschließend sollen die Ergebnisse zum Blei Einbau in Baryt-Cölestin Mischkristalle mit den Jülicher Ergebnissen zum Radium Einbau in Baryt-Cölestin Mischkristalle verglichen werden. Die Sorptionsisothermen an C-S-H Phasen mit verschiedenen Ca/Si Verhältnissen, an AFm-CO₃ und AFm-OH-CO₃ Phasen werden fertig gestellt. Die Strukturcharakterisierung der Se(IV)-AFm Phasen wird abgeschlossen. Eine 4. EXAFS Messzeit ist geplant und die EXAFS Daten werden abschließend ausgewertet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Peer-reviewed publiziert:

H. Rojo, J. Tits, E. Wieland: Selenium uptake by C-S-H phases under anoxic and reducing conditions. Calcium Silicate Hydrates Containing Aluminium: C-A-S-H Workshop. May 5-6, 2014, Dübendorf, Switzerland.

H. Rojo, X. Gaona, Th. Rabung, M. Garcia-Gutierrez, T. Missana, M. Altmaier: Nd(III)/Cm(III) complexation with gluconate in NaCl and CaCl₂ alkaline solutions: solubility and TRLFS studies. NUWCEM 2014 Conference. June 3-6, 2014, Avignon, France.

H. Rojo, J. Tits, A.C. Scheinost, E. Wieland: Retention of selenium by cementitious materials under reducing radioactive waste repository conditions. GOLDSCHMIDT 2014 Conference. June 8-13, 2014, Sacramento, USA.

H. Rojo, J. Tits, A.C. Scheinost, E. Wieland: Retention of selenium by cementitious materials under anoxic and reducing conditions. IGDTP - Geodisposal 2014 Conference. June 24-26, 2014, Manchester, GB.

H. Rojo, J. Tits, A.C. Scheinost, E. Wieland: Retention of selenium by cementitious materials under oxidizing and reducing conditions. SELEN 2014 Workshop. October 13-14, 2014, Karlsruhe, Germany.

M.E. Arroyo-de Dompablo, M.A. Fernández-González and L. Fernández-Díaz (2014): "Influence of tetrahedral oxyanions (sulfate, selenate and chromate) on the stability of calcium carbonate polymorphs: An ab initio modelling study" (submitted to GCA).

A. Jiménez, M. Prieto (2014): Thermal stability of ettringite under ambient atmospheric conditions: implications for the uptake of harmful ions by cement (submitted to ES&T)

A.L. Letellier, A. Fernández-González, A. Jiménez (2014): "Influencia del Se (IV) en el polimorfismo de CaCO₃" *Macla* 19 (in prep.).

R.M. Rodriguez-Galán, J. Carneiro, M. Prieto: "Uptake of Pb²⁺_(aq) by baryte-celestine solid-solution crystals: implications for the uptake of Ra²⁺" (in prep.)

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 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 zweiten Halbjahr 2014 wurden die Untersuchungen mittels Ramanspektroskopie zur Charakterisierung der synthetisierten Mineralphasen weitergeführt. Diese Ergebnisse wurden genutzt, um geeignete Proben für weiterführende Untersuchungen zur Stabilität der Mineralphasen auszuwählen. Mit Hilfe von Kalorimetrie-Untersuchungen erlangte man zudem Informationen über die Wärmekapazitäten der

Mineralphasen. Des Weiteren wurden Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung und der Bindungsverhältnisse der Mineraloberflächen durchgeführt, die mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) am Institut eines ImmoRad-Projektpartners (KIT-INE) stattfanden. Die hierbei gewonnenen Resultate geben sowohl Aufschluss über den Oxidationszustand des gebundenen Selen als auch über die allgemeine Zusammensetzung und Stabilität der Eisenmineraloberfläche.

Mittels Ramanspektroskopie konnte die hohe Reinheit der synthetisierten selenhaltigen Eisenminerale nachgewiesen werden. Sowohl bei den Pyrit-Proben als auch bei den untersuchten Eisenoxiden Hämatit und Magnetit fanden sich keine Hinweise auf die Anwesenheit weiterer eisenhaltiger Mineralphasen und auch die Gegenwart von elementarem Schwefel konnte im Falle der Pyrit-Proben ausgeschlossen werden. Ausgewählte Proben zur Untersuchung der Mineralstabilität wurden Ende des Halbjahres einer kalorimetrischen Analyse unterzogen. Eine Auswertung erfolgte bislang jedoch noch nicht, da die Analysedaten derzeit noch nicht vorliegen. Mittels XPS konnten die Selen-Spezies an der Oberfläche eines nicht oxidierten Se-dotierten Pyrits und eines Se-haltigen Hämatits und Magnetits festgestellt werden. Im Falle des Pyrits konnte trotz der Schwierigkeit der geringen Selenkonzentrationen und der spektralen Überlagerung der wichtigen Hauptlinien von Se, S und Fe die Spezies Se^{2-} an der Mineraloberfläche identifiziert werden. Des Weiteren bestätigte die XPS-Analyse vorherige Resultate zur Wechselwirkung von Selen und Hämatit bzw. Magnetit. Im Falle von Hämatit führen Interaktionsprozesse zwischen Se(IV) und Hämatit zu keiner Veränderung des Se(IV) -Oxidationszustandes, wohingegen es beim Kontakt von Se(IV) und Magnetit zu einer Selen-Reduktion und dadurch zur Fällung von elementarem Selen kommt.

Der aktuelle Stand der Arbeiten wurde internationalem Fachpublikum während des SELEN 2014-Workshops in Karlsruhe präsentiert und die Ergebnisse diskutiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten erfolgen nach Arbeitsplan. In der ersten Hälfte des Halbjahres 2015 werden Untersuchungen der chemischen Zusammensetzung und der Bindungsverhältnisse der Mineraloberflächen mittels XPS abgeschlossen. Der Fokus liegt hierbei auf oxidierten Proben, die unterschiedlichen hydrochemischen Bedingungen ausgesetzt waren.

Die Auswertung der Wärmekapazitätsmessungen wird ebenso wie die Struktur-Verfeinerungen der bereits aufgenommenen Diffraktogramme durchgeführt.

Weiterhin sollen die Strukturuntersuchungen der synthetisierten Präparate an einer Synchrotronquelle ergänzt und erweitert werden, um den Bindungsmechanismus des Selen im Detail zu charakterisieren und um die hydrochemisch behandelten Proben auf ihre Stabilität hin zu untersuchen.

Im April ist die Vorstellung der Themen während des „ImmoRad-Meetings“ in Villingen, Schweiz, geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Börsig, N., Potsch, S., Diener, A., Neumann, T. (2012): Incorporation and stability of Se doted iron minerals (Poster). Selen Workshop 2012, KIT-IMG

Potsch, 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

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

Potsch, S., Neumann, T. (2014): Efficiency of the selenium retention by incorporation in pyrite during fast precipitation (Presentation). Selen Workshop 2014, KIT-IMG

Börsig, N., Neumann, T. (2014): Retention of selenium by hematite and magnetite during the mineral formation (Presentation). Selen Workshop 2014, KIT-IMG

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 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: Ra-Sorptionsexperimente mit Ba-Sr-SO₄ Mischkristallen wurden fortgeführt.
AP3, 4, 5: Die Position von Zr(IV) in den Zr(IV)-haltigen MgAl-LDHs konnte spezifiziert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass Zr(IV) in der Zwischenschicht als anionische Species und in der Brucit-Schicht als Kation eingebaut wird.
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: Fortführung der Ra-Sorptionsexperimente mit Ba-Sr-SO₄-Mischkristallen und Auswertung der experimentellen Ergebnisse.
AP3, 4, 5: Arbeiten sind abgeschlossen.
AP6: Fortlaufende geochemische Modellierungen synthetisierter Verbindungen (GEMS) sind geplant.
AP7: Noch nicht begonnen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Konstantin Rozov, Hilde Curtius, Dirk Bosbach: Preparation, characterization and thermodynamic properties of Zr-containing Cl-bearing layered double hydroxides (LDHs), *Radiochimica Acta*, 2014, in press.

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 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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)-Sorptionskomplexe und Festphasen zu bestimmen. Zwei entsprechende Proben, die seit Anfang 2010 equilibriert werden, ermöglichen auch Zeitskalen jenseits von 2 Jahren.
- B) *Reduktive Reaktion von Np(V)* mit Mackinawit (FeS) und Magnetit. Die Reaktionsprodukte werden mit Np(IV)/Fe(II)/S(-II) und Np(IV)/Fe(II)/Fe(III)/O(-II) Kopräzipitaten verglichen. Durch die Reaktion mit Mackinawit kann auch die bisher vorwiegend bei tieferen Redoxstufen beobachtete Sulfidkoordination von Np(IV) verifiziert werden. Untersuchung der möglichen Inkorporation von Np(IV) durch die Fe(II)-Carbonate Siderit oder Chukanovit, sowohl im Langzeit-Sorptionsexperiment (2 Jahre) als auch an Actinid/Fe(II)/Karbonat Kopräzipitaten. Wie oben werden die Struktur und Oxidationsstufe der mit der Festphase assoziierten Np-Spezies spektroskopisch (XAFS, eventuell auch XPS) untersucht und die Lösungsbedingungen (Eh, pH, gelöste Ionen) werden sorgfältig erfasst, um Stabilitätskonstanten der Sorptionskomplexe und Festphasen zu bestimmen.
- C) Das IRE wird die von *PSI-LEG hergestellten „solid solutions“* zwischen Se(IV/VI) und LDH und Tc(VII) und LDH sowie die von KIT-IMG hergestellten „solid solutions“ zwischen Se und Eisensulfiden mittels der eigenen XAFS-Beamline ROBL auf Oxidationsstufen und Nahordnung untersuchen.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

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

Synthese und Charakterisierung der oben genannten Mineralphasen. Für die vollständige Bewertung der EXAFS Ergebnisse wurde zusätzlich die Np(V) Hydrolyse in Gegenwart und Abwesenheit von Carbonat mittels UV/Vis Spektroskopie untersucht. Dabei erfolgte auch die Messung des Redoxpotentials in dem wässrigen Referenzsystem.

Magnetit-System:

Die XAFS-Messungen zeigten eine deutliche pH- und Zeit-Abhängigkeit der mit der Festphase assoziierten Np-Spezies. Die XAS-Messungen der Kopräzipitate zeigten eine unvollständige Reduktion von Np(V) zu Np(IV), die derzeit nicht verstanden ist und daher detailliert untersucht werden muss.

Mackinawit-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-Retentionkoeffizienten zu erwarten war. Die XANES-Messungen zeigten eine vollständige Reduktion von Np(V) zu Np(IV); die Bestimmung der Nahordnung durch shell-fit der EXAFS-Spektren wird demnächst durchgeführt.

Bearbeitung des Programmpaketes C:

Weitere Se-LDH-XAS-Messungen für PSI-LES wurden am 12.-14.11.2014 erfolgreich durchgeführt; ebenso wurden die Daten ausgewertet.

4. Geplante Weiterarbeiten

Programmpaket A:

- Erarbeitung einer Publikation der Pu-Magnetit-Kopräzipitationsdaten

Programmpaket B:

- Erarbeitung von Publikationen zu den betrachteten Np-Mineralphasen-Systemen
- Teilweise Untersetzung der Ergebnisse mit TEM-Untersuchungen

Programmpaket C:

- Auswertung der Se-LDH-EXAFS-Messungen des PSI. XAFS-Messungen der Se-Sulfid-Solid-Solutions des KIT-IMG sind für Mai 2015 geplant

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

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

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

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Grüneburgplatz 1, 60323 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 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 268.598,00 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. An den von FZJ IEK-6/HZDR hergestellten Pulvern der Mischkristallreihe $(\text{Th, Zr})\text{SiO}_4$ wurden Ramanspektren gemessen. Im Rahmen der Messunsicherheit zeigen die Ramanbanden einen linearen Verlauf zwischen den Endgliedern. Die im letzten Berichtszeitraum eingereichte Publikation über die druckinduzierte strukturelle Phasentransformation von USiO_4 wurde akzeptiert und ist veröffentlicht, die Ergebnisse werden als Vortrag auf der Jahrestagung der DGK vorgestellt.

Der Projektpartner KIT-IMG hat uns weitere pulverförmige Proben von Pyrit (FeS_2), Hämatit (Fe_2O_3), Magnetit (Fe_3O_4) und eine Eisenselenidphase zur Verfügung gestellt. Die Eisenoxide liegen in reiner Form sowie aus Kopräzipitations- und Adsorptionsexperimenten mit Selenid- (SeO_3^{2-}) und Selenat- (SeO_4^{2-}) haltigen Lösungen vor. In den Selenid-haltigen Hämatit Proben ist eine zusätzliche Bande gegenüber reinem Hämatit vorhanden, die Intensität dieser Bande nimmt mit steigendem Se-Gehalt zu. Die Proben aus den Selenat-Experimenten ha-

ben laut KIT einen sehr geringen Se-Gehalt (sub wt. %). In den Raman Spektren konnte kein Einfluss des Selenats nachgewiesen werden. Bevor mikrokalorimetrische Messungen durchgeführt werden, sollen die dafür sinnvollen Proben erneut mit Röntgenpulverdiffraktometrie untersucht werden, um Verunreinigungen auszuschließen.

Die Pyritpulver sind im Vergleich zu den früheren Proben nicht oxidiert und damit frei von elementarem Schwefel. In den Ramanspektren der Se-haltigen Proben ist eine minimale Verschiebung einiger Banden erkennbar. Dies deutet auf eine Substitution des Schwefels durch Selen. Die ersten mikrokalorimetrischen Messungen an den Proben wurden durchgeführt. Die Ergebnisse lassen bislang noch keine eindeutigen Schlüsse zu.

Modellierungen mit der „double defect“ Methode und quantenmechanischen Rechnungen an den binären Systemen (Ba, Sr)SO₄, (Ba, Ra)SO₄ und (Ra, Sr)SO₄ haben gezeigt, dass in diesen Systemen keine geordneten Mischphasen auftreten. Bei der Ausweitung der Modellierungen auf das ternäre System (Ba, Sr, Ra)SO₄ zeigte sich, dass in der Mischungsenthalpie zusätzlich zu den paarweisen Wechselwirkungen der Kationen eine weitere Komponente auftritt, die von der Wechselwirkung der drei Kationen abhängt. Die Untersuchung von quasi-zufälligen Strukturen ergab, dass der ternäre Parameter mit einer „Größen-Kompensation“ verbunden ist, die bei der Betrachtung der binären Mischungen nicht berücksichtigt wird. Eine Veröffentlichung dieser Ergebnisse befindet sich in Vorbereitung. Im System (Ba, Pb, Ra)SO₄ sind die ternären Wechselwirkungen ersten Untersuchungen zufolge von vergleichbarer Bedeutung.

Die Veröffentlichung zu mikrokalorimetrischen Untersuchung der Endglieder BaSO₄, SrSO₄ und PbSO₄ befindet sich in Vorbereitung und soll im nächsten Berichtszeitraum eingereicht werden. Da die Mikrokalorimetrie der Mischkristallreihe (Ba, Sr)SO₄ im letzten Berichtszeitraum gezeigt hat, dass in dem System keine Exzesswärmekapazität auftritt, muss entschieden werden, ob dieses Ergebnis publikationswürdig ist.

Die Arbeit in der Kooperation mit dem KIT-INE zur Präparation orientierter Calcit Platten, mit einigen cm² großen (104) Flächen, wurde abgeschlossen. Die Proben wurden an die Projektpartner übergeben.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Weiterarbeiten werden wie im Projektantrag beschrieben durchgeführt. Die mikrokalorimetrischen Messungen der Se-dotierte Eisenoxid bzw. Eisensulfid Phasen aus der Kooperation mit dem KIT-IMG sollen abgeschlossen werden. Aus der Kooperation mit UO-DG erwarten wir im Laufe des nächsten Berichtszeitraums Proben der Mischkristallreihe (Ba, Sr, Pb)SO₄, die mit dem Mikrokalorimeter untersucht werden sollen. Die Zusammenarbeit mit PSI bezüglich der dort hergestellten LDH Phasen soll begonnen werden. Die Modellrechnungen der ternären Systeme (Ba, Sr, Ra)SO₄ und (Ba, Pb, Ra)SO₄ sollen abgeschlossen und die Ergebnisse publiziert werden. Die Ergebnisse der Wärmekapazitätsmessungen der Endglieder BaSO₄, SrSO₄ und PbSO₄ sollen im nächsten Berichtszeitraum publiziert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

J.D. Bauer et al.: High-pressure phase transition of coffinite, USiO₄, J. Phys. Chem C 2014, **118**, 25141-25149

I. Alencar et al.: In-situ Resonant Ultrasound Spectroscopy during irradiation of solids with relativistic heavy ions, Acta Materialia, akzeptiert

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, Juli 2014, Bonn

J.D. Bauer et al.: The high pressure structural phase transformation of coffinite, USiO₄ studied by experimental and computational methods. Jahrestagung DGK März 2015, Beitrag eingereicht

I. Alencar: Radiation effects in solids, 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning as well as Supramolecular, Intermolecular, Interaggregate Interactions, Juli 2014, Bonn

I. Alencar et al.: Raman spectroscopy studies of calcium fluoride irradiated with swift Au ions, 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids, Juli 2014, Debrecen

I. Alencar et al.: Heat capacity and electron paramagnetic resonance measurements of ionic crystals irradiated with swift heavy ions, 9th International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter, Mai 2015, Darmstadt

D. Bosbach et al.: Radium Solubility Control in Solid Solution - Aqueous Solution Systems, MRS Fall Meeting, November 2014

Y. Li et al.: Characterization of nuclear waste materials by a novel computational approach EMRS Spring Meeting, May 2015, Lille, Beitrag eingereicht

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 wieweit die zuvor im Glas eingebetteten Radionuklide in die Kieselerde-Sekundärphase eingebaut werden. Abhängig von physiko-chemischen Bedingungen und Glaszusammensetzung können weitere Korrosionsprodukte (Phyllosilikate, Zeolithe, Karbonate) an der Oberfläche oder innerhalb der Kieselerde präzipitieren, die ebenfalls Radionuklide binden können. Ferner sollen diese Ergebnisse mit Befunden an korrodierten archäologischen Gläsern abgeglichen werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- (A) Synthese und chemische/strukturelle Charakterisierung von 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) Durchflusseexperimente 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): Synthese abgeschlossen.
- (B): Batchexperimente laufend. In den Rissexperimenten hat sich (erwartungsgemäß) gezeigt, dass die Glasauflösung mit der Risttiefe zunimmt (Entkopplung von der Chemie der Gesamtlösung).
Ein weiteres Raman In-situ-Echtzeitexperiment zum Alterationsverhalten wurde erfolgreich mit ternärem Borosilikatglas ($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$) in einer alkalischen Lösung durchgeführt. Es zeigt sich, dass auch die (primäre) Ausbildung der Kieselerdestruktur deutlich vom pH-Wert abhängig ist.
- (C-D): Werden im Anschluss an Batchexperimente (B) durchgeführt.
- (E): Nach Reparatur (Ablagerungen von Si-angereicherte Lösungen haben die Pumpenmechanik beeinträchtigt) wurden erfolgreich Durchflussversuchsreihen mit unterschiedlichen (NaCl-)Lösungen und reinem Wasser durchgeführt. Hohe NaCl-Konzentrationen (> 13 Gew. %) hemmen demnach die Glasauflösung, wohingegen in der Literatur niedrige Konzentrationen eine gegenteilige Wirkung aufweisen (Icenhower & Dove, 2000). Ferner kam es trotz Si-Untersättigung der Gesamtlösung zur Ausfällung von Kieselerde auf den Glaskörpern.
- (F): Keine weiteren Ergebnisse bisher.
- (G): Keine weiteren Ergebnisse bisher.

4. Geplante Weiterarbeiten

- (A): Abgeschlossen.
- (B): Fortsetzung und Weiterführung bisheriger Batchexperimente (mit weiteren Gläsern); In-situ-Echtzeitexperimente bei weiteren Bedingungen.
- (C-D): Im Anschluss an (B).
- (E): Weiterführung der bisherigen Durchflusseexperimente um den Übergang im Lösungsverhalten von reinem Wasser zu niedrigen und hohen Salzkonzentrationen zu ermitteln, Lösungsanalyse, Charakterisierung der angelösten Glasoberflächen und eventueller Alterationsprodukte.
- (F): Analysephase und Auswertung.
- (G): In Weiterentwicklung.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- Domen, L. (2013): Musterbildung in Korrosionszonen von U-führenden, archäologischen Silikatgläsern. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Bonn
- Dohmen L., Lenting C., Fonseca R.O.C., Nagel T., Heuser A. and Geisler T. (2013): Pattern formation in silicate glass corrosion zones. *Int. J. Appl. Glass Sci.*, 4, 357-370
- Lenting C. and Geisler T. (2014): A real-time, in situ Raman spectroscopic study on borosilicate glass corrosion. 92. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Jena, Kurzfassungen, S. 297.
- Gref, E. (2014): Bestimmung der Vorwärtsauflösungsraten von Borosilikatgläsern mithilfe von Durchflusseexperimenten. Unveröffentlichte M.Sc.-Arbeit, Universität Bonn.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

- 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: „Nachwuchsförderung“

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1:

Im vergangenen Berichtszeitraum wurde Synthesen zur partiellen ^{15}N -Isotopenmarkierung von *iPr*-BTP durchgeführt. Diese sind Teil der Diplomarbeit von Viktoria Rohde und erlauben die Detektion von ^{15}N -Kernen in 1D NMR Experimenten. Dadurch werden Temperaturreihen der (^{15}N -)Verschiebungen in Lanthanid- und Actinid-Komplexen zugänglich, wodurch zusätzliche Informationen über den Bindungscharakter der Stickstoff-Metallion-Bindung erhalten werden können. Die Optimierung von Schlüsselschritten zur vollständigen ^{15}N -Markierung des Pyridinrings stellt immer noch eine Herausforderung dar und wird im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt. Sie ist Teil einer Doktorarbeit am KIT-INE (C. Adam).

AP2:

Im vergangenen Berichtszeitraum wurde eine Diplomarbeit zum Thema „Synthese und NMR-spektroskopische Charakterisierung von partitioning-relevanten Lanthaniden- und Actiniden-*iPr*BTP-Komplexen“ von Viktoria Rohde erfolgreich angefertigt. Das *iPr*-BTP bildet erheblich stabilere Lanthaniden- und Actinidenkomplexe als

das *n*Pr-BTP (TRLFS-Untersuchungen durch den AK Panak, Uni HD). Es wurden NMR-Spektren von einer Reihe von Lanthanidenkomplexen des *i*Pr-BTPs sowie von ²⁴³Am(III) gewonnen. Besonderes Augenmerk liegt auf den Bindungseigenschaften zwischen den Stickstoffen des Softdonorsystems und dem Metallion. Mathematische Trennung der zugrundeliegenden Bindungsanteile ergaben jeweils signifikante Anteile an Kovalenz sowohl in den Lanthanid-Komplexen als auch im Am-Komplex.

Die Synthesen von ¹⁵N-markierten C5-BPP Komplexen mit stark paramagnetischen Lanthaniden und deren NMR-spektroskopische Charakterisierung wurden fortgesetzt. Die systematische Auswertung der erhaltenen Daten, besonders im Vergleich zu den komplementären *n*Pr-BTP-Daten, wurde in diesem Berichtszeitraum fortgesetzt. Die Arbeiten an den diamagnetischen und schwach paramagnetischen Komplexen des C5-BBP wurden abgeschlossen und erfolgreich zur Publikation bei Chemical Science eingereicht.

AP3: -----

AP4:

Die Vorbereitungen des „Second Joint Student Workshop on f-Element Chemistry“ (9.-10.06.2015) als Abschlussworkshop des f-Kom-Projekts wurden unter Federführung des KIT-INE im abgelaufenen Berichtszeitraum begonnen. Der Tagungsort wird das Akademie Hotel in Karlsruhe sein. Im Anschluss an den Workshop findet das abschließende Treffen des f-Kom-Konsortiums am 11.06.2015 ebenfalls im Akademie Hotel in Karlsruhe statt.

In Kurzvorträgen und einer Postersession können bis zu 60 Jungwissenschaftler des f-Kom-Projekts und der englischen Kollegen vom NNL, UC London und den verschiedenen Arbeitsgruppen der Uni Manchester ihre Arbeiten präsentieren, neue Kontakte knüpfen und bestehende Kontakte vertiefen. Einladungen werden zudem an Kollegen aus europäischen Projekten, z. B. in Frankreich und Schweden, verschickt. Das Vortragsprogramm wird aus vier Plenarvorträgen etablierter Wissenschaftler und ca. 20 ausgewählten Vorträgen von Nachwuchswissenschaftlern bestehen.

Als erfreuliches Ergebnis der ThUL School in Actinide Chemistry (Karlsruhe, 02.-06.06.2014) wurde eine Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Martin Kaupp, TU Berlin, vereinbart, die die quantenchemische Berechnung von paramagnetischen NMR-Parametern in f-Kom-relevanten Komplexen zum Ziel hat. Die bereits am KIT-INE gewonnenen Daten dienen dabei als Benchmark für die Entwicklungen von quantenchemischen Methoden und deren Genauigkeit der errechneten Elektronenkonfigurationen, da die Komplexe sich wegen ihrer Größe derzeit noch hochgenauen ab initio-Rechnungen entziehen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

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

AP2:

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

Untersuchungen zu einer möglich Übertragbarkeit der für Lanthaniden beschriebenen Methoden zur Quantifizierung von paramagnetischen Einflüssen werden auch im kommenden Berichtszeitraum fortgesetzt und eine Publikation der Ergebnisse der Lanthanidenreihe vorbereitet.

Die Ergebnisse der Arbeiten sollen in Publikationen und in die Dissertation von C. Adam Eingang finden.

Die im Rahmen der Diplomarbeit von V. Rohde an markierten *i*Pr-BTP-Komplexen gewonnenen Daten werden im kommenden Berichtszeitraum für die Lanthanidenreihe vervollständigt. Eine Publikation wird angestrebt.

AP3: -----

AP4: Der Termin für den „Second Joint Student Workshop on f-Element Chemistry“ in Karlsruhe steht bereits fest (Akademiehotel Karlsruhe, 09.-11.06.2015). Die technische Organisation ist im Wesentlichen bereits abgeschlossen, der Kostenrahmen wird voraussichtlich im projektierten Spielraum gehalten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Woodall, S., Swinburne, A., Banik, N., Kerridge, A., Di Pietro, P., Adam, C., Kaden, P., Natrajan, L.: Neptunyl(VI) Centred Visible LMCT Emission Directly Observable in the Presence of Uranyl(VI), Chem. Commun., 2014, accepted manuscript, DOI 10.1039/C4CC08718F.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 838.422,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Roesky	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das beantragte Projekt „Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen (f-Kom)“ hat zum Ziel, die Abtrennung langlebiger Radionuklide aus nuklearem Abfall auf grundlegender Ebene zu verstehen. Schwerpunkte liegen auf der Aus- und Weiterbildung junger Wissenschaftler in Forschungsthemen zur nuklearen Entsorgung sowie ihre Vernetzung in der europäischen Forschungslandschaft. Die im Berichtszeitraum erzielten Ergebnisse wurden in direkter Kooperation mit Uni HD (P. Panak), dem KIT-INE (H. Geckeis, A. Geist), Uni ER (K. Meyer) und dem FZJ-IEK-6 (G. Modolo) erhalten; siehe die entsprechenden Halbjahresberichte.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

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

- Synthese von f-Element-Komplexen mit den optimierten Liganden
- Charakterisierung der Komplexe, insbesondere per Einkristallröntgenstrukturanalyse

Die Untersuchungen erfolgten in den Bereichen:

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Publikation „6-(Tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridine: A Highly Selective Ligand for the Separation of Lanthanides(III) and Actinides(III)“ wurde veröffentlicht (*Inorg. Chem.*, 2014, 53, pp 8949–8958) und mit dem Titelbild der entsprechenden Ausgabe der renommierten Fachzeitschrift *Inorganic Chemistry* ausgezeichnet. Zusammen mit der Uni Er wurden die ersten Dithionit Komplexe der f-Elemente in zwei Publikationen dokumentiert.

Es wurde weiter daran gearbeitet, den 6-(Tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridin-Liganden mit tert-Butyl Gruppen zu funktionalisieren, um eine bessere Löslichkeit in aliphatischen Kohlenwasserstoffen zu erreichen. Die Synthese des modifizierten Liganden Tetrazol-5-yl-4,4'-di-t-butyl-2,2'-bipyridin (tBu-HN4bipy) wurde ausgearbeitet und reproduziert. Die Umsetzung mit Samarium(III)nitrat mit tBu-HN4bipy·HNO₃ liefert den ersten Komplex dieses Liganden, einen 1:1-Komplex mit drei Nitrat- und einem Wasser-Liganden, dessen Charakterisierung in Arbeit ist. TRLFS-Untersuchungen zum Komplexierungsverhalten werden durchgeführt.

Zudem wurde die Erprobung von Liganden, die Stickstoff-Donoratome mit einer P-S-Einheit studiert. Dazu wurde der Ligand Bis(6-Methylen-2,2'-bipyridyl)-phenylthiophosphan (PSbipy) hergestellt und in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern mittels TRLFS auf seine Fähigkeit zur Komplexierung von Europium und Curium untersucht. Es konnte nur in sehr hoher Konzentration die entsprechenden Komplexe beobachtet werden, auch in Zweiphasen-Experimenten in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern am Forschungszentrum Jülich konnte keine Extraktion beobachtet werden.

Der neue Ligand 2,6-Bis(1-(p-tolyl)-1H-1,2,3-triazol-4-yl)pyridine (BTTP) konnte als Variation des BTP-Systems hergestellt und charakterisiert werden. Mit Samarium(III)- und Europium(III)triflat konnten die entsprechenden 3:1-Komplexe isoliert und deren Festkörperstruktur untersucht werden. Das Komplexierungsver-

ten wurde bzgl. Cm und Eu mittels TRLFS untersucht. Ein Publikationsmanuskript befindet sich in Vorbereitung.

Die Darstellung der Dithiophosphinsäureanaloge (WP 1) des Tris(pyrazolyl)methans (Tpm) konnte mit den gewählten Syntheserouten bisher nicht erzielt werden. Daher wurden die Komplexierungseigenschaften eines leicht zugänglichen Analogons, nämlich einem mit einer CS₂-Funktion derivatisierten Tris(pyrazolyl)methans in Bezug auf dreiwertige Lanthanide untersucht. Die Bindungstasche erscheint jedoch zu klein zu sein, da keine Komplexierung zu beobachten ist. Eine Vergrößerung der Bindungstasche wird durch Einführung eines Spacers in den Apex des Liganden erreicht. Die Umsetzung des literaturbekannten Liganden Tpm^{CH₂OPPh₂O} mit einem Äquivalent La(OTf)₃ führte laut NMR zu einem symmetrischen Produkt.

Studien zur Auswirkung von nicht-kordinierten N-Donor-Funktionalitäten im Komplex auf die Koordinations-eigenschaften wurden mit Protonierungsreaktionen an einem Komplex des Pyrazinligandensystems [SP{N(CH₃)NC(H)pyz}₃] durchgeführt. Die Umsetzung mit einem Äquivalent Säure zeigt laut NMR-Spektroskopie Hinweise auf eine neue Verbindung, deren Kristallisation bisher jedoch noch nicht gelang. Bei der Umsetzung mit drei Äquivalenten Säure können im ¹⁵N-NMR Verschiebungen von bis zu 30 ppm im Vergleich zum Edukt nachgewiesen werden und geben somit vielversprechende Hinweise auf eine erfolgreiche Reaktion. Die Kristallstrukturbestimmung ist Gegenstand aktueller Forschung.

Die Charakterisierung der hydrazonbasierten Lanthanidkomplexe in Lösung mittels PGSE-Messungen sowie ⁸⁹Y-NMR-Messungen für die entsprechenden Yttriumkomplexe, wurde fortgeführt bzw. abgeschlossen. Die PGSE-Messungen der Lanthanidkomplexe mit den unterschiedlichen in diesem Projekt synthetisierten Liganden zeigen Diffusionskoeffizienten von etwa gleicher Größe und gleichem Trend wie die Komplexe des Stammsystems [SP{N(CH₃)NC(H)py}₃]. Ein Publikationsmanuskript befindet sich in Vorbereitung.

Mit den Mitteln des Nachwuchsförderungsprogramms (WP 4) konnte Herr S. Schäfer an der Konferenz *Terra Rarae 2014* vom 6.-8.7.2014 teilnehmen. Der wissenschaftliche Fortschritt wurde dort in Form eines Posters präsentiert, welches mit einem Preis ausgezeichnet wurde. Darüber hinaus wurde Prof. P. W. Roesky, S. Hohnstein und S. Schäfer die Teilnahme an der internationalen Tagung *ICCC41* vom 21.-25.7.2014 in Singapur ermöglicht. Beiträge über die aktuelle Forschung in diesem Projekt wurden dem Publikum in einem Vortrag sowie zwei Postern präsentiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

tBu-HN4bipy soll für die Synthese weitere Komplexe dienen, so z. B. für Europiumkomplexe. Außerdem soll der erhaltene Samariumkomplex reproduziert und charakterisiert werden. Weitere TRLFS Untersuchungen sowie Extraktionsexperimente sind geplant.

Da die TRLFS Experimente zur Komplexierung des Thiophosphanliganden PSbipy nur ein geringes Bestreben zur Bildung von Komplexen mit Europium und Curium festgestellt werden konnte, sollen andere Stickstoff-Heterozyklen in das Ligandrückgrat eingebaut werden. Erste Versuche, eine Pyrazolpyridineinheit mit der P-S-Funktionalität zu verknüpfen, verliefen vielversprechend und werden derzeit weiter bearbeitet.

Die Derivatisierung des Stammsystems [SP{N(CH₃)NC(H)py}₃] mit weiteren stickstoffreichen Aldehyden wird fortgeführt, um anschließend die Komplexierungseigenschaften der verschiedenen Liganden in Bezug auf Lanthanid(III)triflate vor und nach Protonierung nicht-kordinierter Stickstoff-Donorstellen zu untersuchen.

Die Einführung eines Spacers in die Apexfunktion der Tpm-basierten Liganden zeigen vielversprechende Ergebnisse in Bezug auf die erfolgreiche Komplexierung von Lanthaniden. Die entsprechenden Ligandensysteme werden weiterhin untersucht.

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, 53, 8949–8958.

S. V. Klementyeva, M. T. Gamer, A.-C. Schmidt, K. Meyer, S. N. Konchenko: Activation of SO₂ with [(η⁵-C₅Me₅)₂Ln(THF)₂] (Ln = Eu, Yb) Leading to Dithionite and Sulfinate Complexes, *Chem. Eur. J.* 2014, 20, 13497-13500.

A.-C. Schmidt, F. W. Heinemann, C. E. Kefalidis, L. Maron, P. W. Roesky, K. Meyer: Activation of SO₂ and CO₂ by Trivalent Uranium Leading to Sulfite/Dithionite and Carbonate/Oxalate Complexes, *Chem. Eur. J.* 2014, 20, 13501-13506.

P. W. Roesky: Main Group Molecules in 4f Metal Chemistry, XXVI. Tage der Seltenen Erden - *Terrae Rarae*, Köln, 2014.

S. Schäfer: 6-(Tetrazol-5-yl)-2,2'-bipyridine: Solid state structures and TRLFS-studies with Cm(III) and Eu(III), XXVI. Tage der seltenen Erden-Terra Rarae, Köln, 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 eines niedervalenten Uran(III)-Komplexes (tacn-Ankersystem und neopentyl-substituiertem Trisaryloxidligandensystem) gegenüber organischen Aziden in Gegenwart von CO₂, der in einer Metathesereaktion einen dinuklearen, bis(μ-oxo)-verbrückten U^V/U^V-Komplex $[\{((^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^V\}_2(\mu-O)_2]$ unter Abspaltung von organischen Isocyanaten liefert. Dieser dinukleare Komplex weist eine reiche Redoxchemie und interessante magnetische Eigenschaften auf. Außerdem konnten ausgehend davon, durch selektive Oxidation, die beiden mononuklearen Uran(VI)-

Oxokomplexe $[(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{VI}(O)eq(OTf)ax]$ und $[(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{VI}(O)eq]SbF_6$ generiert werden. Eine Veröffentlichung hierzu ist in diesem Berichtszeitraum erschienen (s. u.).

In einer weiteren Studie konnten, wiederum ausgehend von dem eben genannten U^{III} -Komplex $[(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{III}]$ durch Umsetzung mit Tritylazid und anschließender Reduktion bzw. Oxidation, eine Reihe von Urantritylimidokomplexen in den Oxidationsstufen U^{4+} bis U^{6+} mit analogen strukturellen Eigenschaften dargestellt werden. Darüber hinaus lieferte die Umsetzung dieser U^{III} -Verbindung mit Me_3SnN_3 den bis(μ -azido)-verbrückten U^{IV} -Komplex $[\{(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{IV}\}_2(\mu-N_3)_2]$. Die Charakterisierung dieser Komplexe mittels Röntgenstrukturanalyse, die anschließenden magnetochemischen und spektroskopischen Untersuchungen sowie DFT-Rechnungen zu diesen Verbindungen wurden in einer weiteren Veröffentlichung zusammengefasst (*Inorg. Chem.* 2014, 53, 13142–13153).

Da der Komplex $[(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{III}]$ im Vergleich zu den Ad- und *t*Bu-substituierten Derivaten neuartige Reaktivitäten gegenüber CO_2 aufweist, lag es nahe diesen Komplex auch mit SO_2 umzusetzen. Dabei wurde ein sehr seltenes Beispiel eines dinuklearen Dithionitkomplexes $[\{(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{IV}\}_2(\mu-S_2O_4)]$ erhalten, dem ersten bekannten Dithionitkomplex in der f-Elementchemie. Aufgrund der Oxophilie des Urans weicht der Koordinationsmodus stark von dem in der Übergangs- und Hauptgruppenmetallchemie bekannten ab, wo dieser Dithionitligand über die Schwefel- und nicht über die Sauerstoffatome gebunden ist. Zusätzlich konnte ausgehend von einem μ -oxo-verbrückten Uran(IV)-Komplex durch Umsetzung mit SO_2 der erste Sulfitkomplex des Urans $[\{(^{Neop,Me}ArO)_3tacn)U^{IV}\}_2(\mu-SO_3)]$ dargestellt werden. Die neu synthetisierten Komplexe wurden mittels Röntgenstruktur- und Elementaranalyse, UV/Vis-, IR- und 1H -NMR-Spektroskopie sowie magnetochemischen Untersuchungen zweifelsfrei charakterisiert. Diese Ergebnisse, zusammen mit DFT-Rechnungen zur Aufklärung des Reaktionsmechanismus, wurden erfolgreich in *Chemistry – A European Journal* publiziert (*Chem. Eur. J.* 2014, 20, 13501–13506; die Forschung erfolgte in Kooperation mit der AG Roesky).

Im vorletzten Berichtszeitraum stellten wir die Synthese und vollständige Charakterisierung der beiden zwei- bzw. dreiwertigen mesityl-geankerten Uranmonoarenkomplexe $[K(2.2.2-crypt)][\{(^{Ad,Me}ArO)_3mes)U^{II}]$ und $[\{(^{Ad,Me}ArO)_3mes)U^{III}]$ vor (*Angew. Chem.* 2014, 126, 7282–7285; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014, 53, 7154–7157 und *Angew. Chem.* 2014, 126, 7286–7290; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014, 53, 7158–7162). In einer weiterführenden Studie wurde die Reaktivität des Komplexes $[\{(^{Ad,Me}ArO)_3mes)U^{III}]$ gegenüber Oxidantien getestet. Wird dieser U^{III} -Komplex in THF in Kontakt mit Halogenverbindungen (AgF, Dichloromethan, 1,2-Dibromethan, I_2) gebracht, so werden die isostrukturellen C_3 -symmetrischen Uran(IV)-Halogenidkomplexe $[(^{Ad,Me}ArO)_3mes)U(X)]$ erhalten ($X = F, Cl, Br$ und I). Im Festkörper kristallisieren die Komplexe als $[(^{Ad,Me}ArO)_3mes)U(X)(thf)]$ aus, wobei das THF-Molekül in der Äquatorialebene zusammen mit den drei Aryloxidarmen gebunden ist. Die vollständige Charakterisierung dieser U^{IV} -Komplexe in Lösung als auch im Feststoff wurde in einem Beitrag für *Inorganic Chemistry* zusammengefasst (s. u.).

In einer weiteren BMBF-internen Kooperation bzgl. SO_2 -Aktivierung in der f-Elementchemie, unter der Federführung der AG Roesky, wurde Decamethylterbocen $[(\eta^5-C_5Me_5)_2Yb(thf)_2]$ mit SO_2 umgesetzt und die erhaltenen Ergebnisse der wissenschaftlichen Gemeinschaft in einer Veröffentlichung präsentiert (s. u.). Des Weiteren verweisen wir für eine genauere Beschreibung der Ergebnisse auf den Halbjahresbericht der AG Roesky.

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 U^{III-VI} -Komplexen ausgehend von tacn-, mes- und N-basierter O-, N,O-, N,N- bzw. N_xO_y - sowie sterisch abgeschirmter pyridin- bzw. aryloxidsubstituierten Liganden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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, 11980–11993.

Uranium(IV) Halide (F^- , Cl^- , Br^- , and I^-) Monoarene Complexes; D. P. Halter, H. S. La Pierre, F. W. Heinemann, K. Meyer, *Inorg. Chem.* 2014, 53, 8418–8424.

Activation of SO_2 with $[(\eta^5-C_5Me_5)_2Ln(THF)_2]$ ($Ln=Eu, Yb$) Leading to Dithionite and Sulfinate Complexes; S. V. Klementyeva, M. T. Gamer, A.-C. Schmidt, K. Meyer, S. N. Konchenko, P. W. Roesky, *Chem. Eur. J.* 2014, 20, 13497–13500.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 WP1 und WP2:

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 thermodynamische 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-BTPPhen 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: Der Ligand PSbipy vom KIT-CS (AK Roesky) wurde in verschiedenen Verdünnungsmitteln und mit Synergist getestet. Allerdings zeigte sich in keinem der Versuche eine Extraktion von Am(III) oder Eu(III).
- AP2: Im Rahmen der Masterarbeit von Denis Kardhashi wurden Kristalle von Komplexen von verschiedenen Lanthaniden mit kurzkettingen Diglycolamiden erhalten. In Kooperation mit KIT-CS (AK Roesky) konnten die Komplexstrukturen mittels Einkristallröntgenstrukturanalyse aufgeklärt werden. In Kooperation mit KIT-CS (AK Roesky) und Uni Erlangen werden chirale HPLC- bzw. NMR-Untersuchungen an modifizierten Diglycolamiden durchgeführt.
- AP2/AP3: An der INE-Beamline des ANKA-Synchrotrons in Karlsruhe wurden in Kooperation mit der Uni Heidelberg und KIT-INE XAFS-Messungen an Actiniden- und Lanthaniden-Komplexen mit langkettigen Diglycolamiden durchgeführt, die teilweise bereits in Abtrennprozessen eingesetzt wurden. Aus den erhaltenen Daten können die Komplexstrukturen in Lösung unter realen Extraktionsbedingungen abgeleitet werden.
- AP4: Die Masterarbeit von Steve Lange wurde erfolgreich abgeschlossen. Denis Kardhashi hat eine Masterarbeit zur Synthese von Diglycolamiden, Komplexierungsstudien mit Lanthaniden und Bestimmung der Komplexstrukturen mittels Einkristallstrukturanalyse begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

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

Die Untersuchungen zur Komplexbildung modifizierter Diglycolamide und die strukturelle Aufklärung werden fortgesetzt. Dazu werden weitere Lanthanidenkomplexe zur Kristallisation gebracht und mittels Einkristallstrukturanalyse untersucht. Die aufgenommenen EXAFS Daten werden weiter ausgewertet und mit theoretischen Modellen verglichen. Weitere EXAFS Messungen sind geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- A. Wilden et al., Solvent Extr. Ion Exch., 2014, Vol. 32 (2), S. 119-137
- G. Modolo et al., Progr. Nucl. Energ. 2014, Vol. 72, S. 107-114
- A. Wilden et al., Separ. Sci. Technol., eingereicht
- S. Lange, Abschluss der Masterarbeit, Fachhochschule Aachen, Campus Jülich
- A. Wilden et al., ISEC2014, Würzburg, 7.-11.09.2014, Vortrag und Proceedingsartikel S. 130-135
- A. Wilden et al., ISEC2014, Würzburg, 7.-11.09.2014, Vortrag und Proceedingsartikel S. 144-149
- A. Wilden et al., IEMPT13, Seoul, Südkorea, 23.-26.09.2014, Vortrag und Proceedingsartikel (noch nicht veröffentlicht)

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 den 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:* Es wurden Phosphat-Mischkristalle unterschiedlicher Morphologie und Mikrostruktur hergestellt. Die ersten Hafnate konnten erfolgreich hergestellt werden.
Materialtransfer: Ausgewählte Materialien wurden an RWTH-GHI, RWTH-IFK und HZDR-IRO geliefert. Die Zusammensetzungen wurden jeweils auf die speziellen Anforderungen der Versuche angepasst.
- AP2: In Zusammenarbeit mit dem RWTH-GHI wurden In-situ-HT-XRD-Untersuchung des Kristallisationsprozesses und der Phasenumwandlung (La,Eu)PO₄-Partikeln durchgeführt und ausgewertet.
Mit Hilfe des aus Projektmitteln finanzierten Einkristalldiffraktometers wurden systematische strukturelle Untersuchungen an dem ThO₂-P₂O₅ - A^I (A^I = Li, Na, K, Rb, Cs) System durchgeführt und neue Thoriumphosphatreihe mit der allgemeinen Summenformel A₂Th(PO₄)₂ (A = Li, Na, K, Rb, Cs) erhalten.
Für Monazit-Mischkristallreihen konnte der Wechselwirkungsparameter für die direkte und die gekoppelte Substitution berechnet werden. Es konnten auch die Wärmekapazitäten für eine Reihe von Actiniden und Lanthaniden-haltige Monaziten bestimmt werden. Die Defektbildungsenergie konnte für die Pyrochlorstruktur berechnet werden. Die Daten stimmen sehr gut mit dem Stabilitätsdiagramm für die Pyrochlorstruktur überein.

- AP3: Die Brenk Systemplanung GmbH hat im Auftrag des IEK-6 bis Ende Dezember 2014 weiterhin an der Erstellung einer Tabelle mit thermodynamischen Daten (Gleichgewichtskonstanten bei unterschiedlichen Temperaturen, Reaktionsenthalpien usw.) für diverse Monazite bzw. Rhabdophane gearbeitet. Weiterhin wurden unter Nutzung dieser Daten geochemische Modellrechnungen (mittels Geochemist's Workbench) zur Untersuchung der Auflösung von Monaziten (NdPO_4) und Rhabdophanen (z. B. $\text{LaPO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NdPO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) bei unterschiedlichen Temperaturen und Lösungszusammensetzungen durchgeführt. Im Ergebnis dieser Modellrechnungen wurden Spezieskonzentrationen bzw. Löslichkeiten der jeweiligen Phasen ermittelt.
Am Accelerator User Centre in Delhi, Indien konnte Strahlzeit für den Beschuss mit schweren Ionen erworben werden.
- AP4: Die Evolution der Mikrostruktur während des Sinterprozesses von $\text{La}_{0,5}\text{Eu}_{0,5}\text{PO}_4$ -Pulvern mit nadelförmigen Partikeln wurde mittels In-situ-Hochtemperatur-REM Messungen in Zusammenarbeit mit dem ICSM, Marcoule untersucht und die Kristallwachstumsrate ermittelt.
Ergänzend zu den am GUF-IFG durchgeführten Wärmekapazitätsmessungen wurden Simulationsrechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse für die Lanthaniden stimmen sehr gut mit den experimentellen Daten überein. Die Berechnungen zu den Actiniden weichen stark von experimentellen Literaturdaten ab.
- AP5: Der Einfluss der Temperatur wurde in dynamischen Auflösungsexperimenten an LaPO_4 -Monazit-Pulvern bei pH 1 und unterschiedlichen Temperaturen ermittelt. Zeitgleich durchgeführte, statische Langzeit-Auflösungsexperimente zur Ermittlung der Löslichkeiten des Monazits wurden erfolgreich beendet. Die Pulver aus den Langzeitexperimenten wurden ans RWTH-IFK gegeben, um mittels XRD-Untersuchungen die Bildung eventueller Korrosionsprodukte (Sekundärphasen) zu untersuchen.
- AP6: Die Ergebnisse wurden in einigen Artikeln veröffentlicht oder sind zur Veröffentlichung eingereicht. Des Weiteren wurden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen in Vorträgen und Postern vorgestellt. Im Juli hat eine BMBF Sommerschule zum Thema „Conditioning“ stattgefunden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die Synthese von Cm-dotierten Proben für die TRLFS-Messungen am HZDR-IRO ist vorgesehen. Eine größere Anzahl von Verbindungen sollen für verschiedene Untersuchungen hergestellt werden.
Die neuen Thoriumphosphat-Mischkristalle ($\text{ThO}_2\text{-P}_2\text{O}_5 - \text{A}^1$ ($\text{A}^1 = \text{Li, Na, K, Rb, Cs}$) und $\text{A}_2\text{Th}(\text{PO}_4)_2$ ($\text{A} = \text{Li, Na, K, Rb, Cs}$)) sollen phasenrein synthetisiert werden, um das thermische Verhalten untersuchen zu können.
- AP2: Ergänzend zur TRLFS sind EXAFS-Messungen an Eu-dotierten LnPO_4 -Monaziten ($\text{Ln} = \text{La, Gd, Lu, Sm, Nd, Pr}$) und LuPO_4 -Xenotime sowie an $\text{La}_{0,5}\text{Eu}_{0,5}\text{PO}_4$ -Rhabdophan-Mischkristallreihe geplant. Zusätzlich wurde zusammen mit dem RWTH-IFK ein Proposal für In-situ-HT-Neutronenbeugungsmessungen am MLZ in Garching eingereicht.
- AP3: Am Accelerator User Centre in Delhi, Indien werden Experimente zu Strahlenschäden durchgeführt.
Ergänzend zu den Experimenten sind umfangreiche Simulationsrechnungen der Strahlenschäden in der Monazit- und der Pyrochlorstruktur geplant. Vor allem soll der Schwellenwert der Verschiebungsenergien in den Strukturen ermittelt werden, die für die Verwendung in einer Simulationssoftware wie SRIM benötigt werden. Die Arbeiten zur Simulation von Strahlenschäden unter Verwendung des Programmsystems SRIM/TRIM-2011 werden von Brenk Systemplanung unterstützt.
- AP4: In Kooperation mit Prof. Navrotsky, University of California, Davis, USA sind calorimetrische Messungen an Phosphat-Mischkristallreihen geplant. Die Messzeit ist bereits für März 2015 arrangiert.
- AP5: Dynamische Auflösungsexperimente an Phosphat-Mischkristallen sind bei höheren Temperaturen (100-200 °C) geplant.
Die geochemischen Modellrechnungen der Brenk Systemplanung GmbH mittels Geochemist's Workbench zur Untersuchung der Monazit- bzw. Rhabdophanauflösung werden fortgesetzt. Weiterhin wird die thermodynamische Datenbasis weiter vervollständigt.
- AP6: Die Ergebnisse werden gemeinsam mit Projektpartnern auf verschiedenen Konferenzen präsentiert und zur Veröffentlichung eingereicht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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):

- Auswertung der XAS-Messungen am $\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x\text{PO}_4$ -System (Sm L_3 und Tb L_1 -Kanten); die Monazit-Struktur bleibt bis $< 85\%$ Tb erhalten; ab 85% Tb bildet sich eine Monazit/Xenotim-Mischphase.
- Auswertung der XAS-Messung des $\text{Lu}_{0.7-x}\text{La}_x\text{Eu}_{0.3}\text{PO}_4$ -Systems (Eu- und Lu- L_3 Kanten)
- Durchführung von hochaufgelösten XANES-Messungen mit Sekundärmonochromatisierung für das $\text{La}_{1-x}\text{Eu}_x\text{PO}_4$ -System (Eu L_3 - und La L_3 -Kanten); theoretische FEFF-Modellierungen zu diesem System.

4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit XAS):

- Durchführung weiterer XAFS-Messungen an Phosphat-Solid-Solutions im System La, Sm, Gd, Lu. Machbarkeitsstudie, um die Struktur von 500 ppm Eu in diesen Serien untersuchen zu können. Auswertung der Daten.
- Durchführung von XAFS-Messungen an La-Eu-Rabdophan-Solid-Solutions synthetisiert bei unterschiedlichen Temperaturen und Datenauswertung.
- Durchführung von XAFS-Messungen an Americium-Monaziten, vorausgesetzt dass die Proben am ITU synthetisiert werden können.
- Teilnahme am E-MRS Spring Meeting 2015 in Lille, France.
- Vorbereitung von 2 Publikationen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

M. Janeth Lozano-Rodriguez, A. C. Scheinost: The Rossendorf Beamline @ ESRF. Poster presented at: Separation Chemistry and Conditioning as well as Supramolecular, Intermolecular, Interaggregate Interactions. 8th European Summer School; 7-9 July, 2014; Bonn Germany.

Zuwendungsempfänger: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 021CX
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt CX		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Entsorgung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2014 bis 30.09.2015	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Immobilisierungsmatrices
- AP2: Strukturelle Charakterisierung
- AP3: Strahlenschäden
- AP4: Thermodynamik und physikalische Eigenschaften
- AP5: Korrosionsbeständigkeit unter Endlagerbedingungen
- AP6: Abschlussbericht, Publikationen

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit TRLFS)

- Site-selektive TRLFS Messungen von Lanthanidphosphaten (LnPO_4) wurden durchgeführt. Alle geplanten Eu^{3+} -dotierten Monazitproben sind jetzt gemessen. Die NdPO_4 und PrPO_4 -Proben zeigen keine Eu-Lumineszenz aufgrund des starken Quenchens der Wirtskationen. Die gemessene LaPO_4 , SmPO_4 und GdPO_4 -Proben zeigen, dass Eu^{3+} in Monazit Phasen eingebaut wird, unabhängig von der Größe des „host“ Lanthanidions. LuPO_4 -Phasen mit Xenotimstruktur zeigen hingegen viel geringeren Eu^{3+} -Einbau im Kristallgitter. Das heißt, die Struktur der Mineralphase spielt scheinbar eine große Rolle für den Einbaumechanismus dreiwertiger Fremdkationen. LuPO_4 ist jedoch die kleinste Xenotim und es gibt eine große Abweichung zwischen den Ionenradien von Lu^{3+} und Eu^{3+} . Deshalb sind zwei Eu^{3+} -dotierte Xenotimphasen mit Wirtskationen ähnlicher Größe wie Eu^{3+} synthetisiert worden. Diese werden demnächst mit TRLFS gemessen.
- Actiniddotierte Lanthanidphosphaten sind zurzeit in Vorbereitung. Das Kamerasystem für die Detektion der Cm-Fluoreszenz in Direktanregung muss noch installiert werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Bearbeitung des Programmpaketes AP2 (Strukturelle Charakterisierung mit TRLFS)

- Einrichtung der CCD-Kamera.
- Weitere TRLFS-Untersuchungen von Eu^{3+} -dotierten Xenotimphasen mit Wirtskationen ähnlicher Größe wie Eu^{3+} .
- Messung von actiniddotierten Monazit- und Xenotimproben zur Aufklärung des Einflusses des Ionenradius des Wirtskations und der Struktur (Monazit vs. Xenotim) auf den Aktineinbau.

Bearbeitung des Programmpaketes AP3 (Strahlenschäden)

- Beschuss von Eu^{3+} dotierten Monaziten mit Schwerionen ist geplant. Die beschossenen Proben werden mit TRLFS charakterisiert, um den Einfluss der induzierten Strahlenschäden auf den Einbauprozess zu untersuchen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Huittinen, N. et al.: Advanced Techniques in Actinide Spectroscopy (ATAS), Dresden, 3.-7.11.2014

Huittinen, N.: Zittau/Görlitz University of Applied Sciences, 04.12.2014

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 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

Im besagten Zeitraum wurden vom FZJ-IEK6 synthetisierte LaPO_4 -Pulver sowie ein CePO_4 -Pulver von Alfa Aesar verarbeitet und analysiert. Um stabilere Grünkörper herzustellen, wurden Pulverchargen vor dem uniaxialen Pressen mit organischen Additiven versetzt. Zwar ergab sich daraus eine bessere Verarbeitbarkeit, jedoch zeigte die anschließende Charakterisierung der gesinterten Körper einen deutlichen Anstieg der Porosität, trotz Entbinderung vor dem Sinterprozess. Da sich die Probenpräparation auf diesem Weg als bislang nicht reproduzierbar erwies, wurden die Pulver fortan kaltisostatisch verpresst. Das Ergebnis lieferte gute Grünfestigkeiten und Gründichten durch hohe Pressdrücke.

Analog zu LaPO_4 wurde für das CePO_4 -Pulver mit Hilfe von Dilatometer-Messungen und anschließenden Auswertungen ein geeignetes Sinterprofil erstellt. Beide Pulver wurden gemäß ihrer angepassten Sinterkurven wärmebehandelt und anschließend rasterelektronenmikroskopisch untersucht sowie deren Dichten über das Archimedische Prinzip bestimmt.

Bei LaPO_4 betragen die maximal erreichten Dichtewerte nach Sinterung $\sim 93\%$ der theoretischen Dichte. REM-Aufnahmen der kaltisostatisch verpressten Proben zeigten sogenanntes Riesenkornwachstum mit eingeschlossener Porosität.

Die gemessenen Dichtewerte der kaltisostatisch verpressten CePO_4 -Proben lagen bei $\sim 80\%$ der theoretischen Dichte. Bei diesen Proben ließ sich anhand der REM-Aufnahmen ein poröser Saum erkennen, der auf Entgasungsvorgänge hindeutet. Die Vermutung, dass während des Sinterns P_2O_5 abdampft, steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der Röntgenbeugungsanalyse, da sich neben CePO_4 die phosphatreichere CeP_3O_9 -Phase detektieren ließ. Letztere wurde ebenfalls im unbehandelten Pulver gefunden. Eine detaillierte XRD-Untersuchung der Kern- und Randbereiche der gesinterten Proben mittels X/Y-Tisch steht noch aus.

Um die Gefügeentwicklung und Verdichtungskinetik während des Sinterprozesses genauer verfolgen zu können, werden derzeit Sinterversuche nach bestimmten Zeitintervallen abgebrochen und anschließend Dichtemessungen durchgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen sollen Temperatur-Dichte-Diagramme für die verwendeten SE-Phosphate erstellt werden.

Das vierte Verbundprojekttreffen im Oktober in Fulda diente der Präsentation der aktuellen Ergebnisse und Planung der weiteren Schritte in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern.

4. Geplante Weiterarbeiten

Um der Gasentwicklung in den CePO_4 -Proben während des Sintervorgangs entgegen zu wirken, werden für die folgenden Sinterversuche niedrigere Maximaltemperaturen sowie kürzere Haltezeiten gewählt. Parallel soll eine Röntgenbeugungsanalyse unter Hochtemperatur Aufschluss über die Phasen- und Gasentwicklung geben.

Ein neuer Ansatz zur Verminderung der Restporosität in den LaPO_4 -Proben besteht in der Verwendung von mit $2\text{ mol}\%$ CaPO_4 dotiertem LaPO_4 (Synthese wird bereits im FZJ-IEK6 durchgeführt). Die Substitution mit 2-wertigen Kationen soll die Korngrenzen- und Volumendiffusion fördern.

Am RWTH-IFK synthetisiertes PrPO_4 -Pulver wird im Dilatometer und mittels XRD charakterisiert und verpresst. Die Proben werden mit einem geeigneten Sinterprofil wärmebehandelt und anschließend auf Dichte und Gefüge hin untersucht.

Das fünfte Verbundprojekttreffen wird im April in Dresden stattfinden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Die angekündigten Vorträge in Dresden und Darmstadt wurden von A. Wätjen präsentiert.

Geplant: C. Schausten (Sp), A. Wätjen, R. Telle, Y. Arinicheva, S. Neumeier, A. Hirsch, G. Roth: „Untersuchung des Sinterverhaltens und der Gefüge von Seltenerd-Phosphaten SEPO_4 (mit $\text{SE}=\text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}$)“, Vortrag bei der DKG-Jahrestagung in Bayreuth (16.-18.03.15).

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Im Juli 2014 wurden eine Summer School in Bonn und ein Workshop in Hamburg zum Thema Radionuklide, Actinoidenchemie u. ä. besucht. Die Ergebnisse der (La,Pr)PO₄-Mischkristallreihe wurden auf der Tagung der IUCr in Montréal (CA) präsentiert und auf dem Verbundtreffen in Bad Salzschlirf den Projektpartnern vorgestellt. In diesem Rahmen wurden weitere Kooperationsabsprachen getroffen.

Für das AP4 wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Gesteinshüttenkunde (Teilprojekt D) fünf Proben der Reihe (La,Pr)PO₄ zur Untersuchung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten mittels In-Situ-Hochtemperaturröntgendiffraktometrie präpariert. Für Dilatometrie-Messungen an der Goethe-Universität Frankfurt (Teilprojekt F) wurden drei Proben dieser Mischkristallreihe vorbereitet.

Proben aus Auflösungsversuchen des FZJ (Teilprojekt A) wurden zur röntgenographischen Charakterisierung in Bezug auf Korrosionsbeständigkeit (AP5) ans IfK übergeben und Messungen durchgeführt. Die Auswertung erfolgt Anfang 2015.

Versuche zur Einkristallzüchtung der Mischkristallreihe (La,Pr)PO₄ wurden mit unterschiedlichen Zusammensetzungen, verschiedenen Start- und Endtemperaturen sowie Variationen der Abkühlraten durchgeführt, um die Züchtung zu optimieren. Bei einer Starttemperatur von 1000 °C konnten keine Kristalle gefunden werden, wohingegen höhere Starttemperaturen ein größeres Zuchtintervall ermöglichen, was das Wachstum der Kristalle begünstigte.

An der Publikation zur (La,Pr)PO₄-Mischkristallreihe wurde weitergearbeitet.

Die Synthese von neuen Mischkristallreihen der Zusammensetzungen (Pr,Nd)PO₄ und (Pr,Tb)PO₄ wurde begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Publikation zum Thema (La,Pr)PO₄ soll fertig gestellt werden. Hierzu ist im Februar 2015 eine Fahrt nach Frankfurt geplant, um die Raman-Daten auszuwerten und in die Publikation einzubinden. Des Weiteren soll eine zweite Publikation über die Ergebnisse der Hochtemperaturdiffraktometrie- und Dilatometrie-Versuche erfolgen.

Die Züchtung der Einkristalle wird weiter optimiert, so dass auch Kristalle der Mischkristallreihe vorliegen. Die Einkristalle sollen dann sowohl in Jülich als auch in Garching strukturell charakterisiert werden.

Die Charakterisierung der (La,Tb)PO₄-Mischkristallreihe soll fortgeführt und um die Ergebnisse der Reihen (Pr,Nd)PO₄ und (Pr,Tb)PO₄ erweitert werden. Neue Mischkristallreihen der Zusammensetzungen (Pr,Sm)PO₄ und (Nd,Sm)PO₄ sind geplant.

Im März 2015 werden die Ergebnisse der Untersuchungen an Pulver und Einkristallen der (La,Pr)PO₄-Mischkristallreihe auf der Tagung der DGK in Göttingen präsentiert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

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

Eingereicht: 1 Abstract für die DGK (1 Poster)

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Grüneburgplatz 1, 60323 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Synchrotrondiffraktionsexperimente sowie Messung von Paarverteilungsfunktionen bei schlechtkristallinen Verbindungen durchgeführt werden. Diese Experimente werden durch theoretische Modellrechnungen (DFT) sowie Messungen von elastischen Eigenschaften und der thermischen Ausdehnung ergänzt.

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

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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde weiter an der Charakterisierung von Keramikproben gearbeitet. Die Untersuchungen mittels Ultraschallmessungen konnten für die Proben aus Jülich abgeschlossen werden. Aus diesen Messungen wurde deutlich, dass die Probenherstellung nicht

gut reproduzierbar ist und zu sehr unterschiedlichen Mikrostrukturen führt. Um die Keramiken mikrostrukturell zu untersuchen, wurden REM-Messungen in Zusammenarbeit mit den Partnern in Jülich sowie EBSD Messungen an der Goethe Universität Frankfurt durchgeführt. Die Messungen der Wärmekapazitäten wurden fortgeführt und sind für die Proben aus Jülich abgeschlossen. Dilatometrie-Messungen für den Temperaturbereich bis 500 °C wurden ebenfalls abgeschlossen. Zusätzlich wurden zwei Proben bis 1100 °C gemessen und ausgewertet. 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. Keramikproben sowie Vergleichsproben (Stahl, Glas) wurden mit relativistischen Schwerionen bestrahlt. Wie geplant, wurden dabei RUS-Messungen durchgeführt. Die Daten wurden ausgewertet und zum Teil in einer international sehr angesehenen Zeitschrift publiziert. Eine weitere Publikation ist in Vorbereitung. Auf der MSE in Darmstadt wurde ein Vortrag präsentiert. Zusätzlich wurde je ein Beitrag zur DKG in Bayreuth und zur ECERS in Toledo eingereicht, wobei der für die DKG bereits als Vortrag akzeptiert wurde. Ein Entwurf einer Veröffentlichung über die physikalischen Eigenschaften der (La,Eu)PO₄-Proben wurde im Berichtszeitraum fertig gestellt und ist bereit zur Einreichung. Eine Veröffentlichung zu den Mikrostrukturen der Keramiken befindet sich in Vorbereitung. Des Weiteren wurde auf der 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning ein Poster präsentiert sowie ein Vortrag zu Strahlenschäden gehalten. Das Projekttreffen im Oktober wurde erfolgreich und zufriedenstellend durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten werden wie geplant weiter durchgeführt. Im Februar und März 2015 werden die abschließenden SEM und EBSD Messungen stattfinden. Im Februar werden die Raman-Daten in Zusammenarbeit mit Frau Hirsch zusammengefasst und veröffentlicht. Zusätzlich hat die Arbeitsgruppe um Herr Prof. G. Roth der RWTH-Aachen (La,Pr)PO₄-Keramiken hergestellt, diese werden im Januar und Februar charakterisiert. Die Daten sollen im Frühjahr gemeinsam mit Frau Hirsch ausgewertet und anschließend veröffentlicht werden. Die Veröffentlichung zu den physikalischen und thermodynamischen Eigenschaften der Keramiken wird im Januar eingereicht. Weitere Messungen und Veröffentlichungen in den nächsten Monaten hängen von der Lieferung neuer Proben durch die Projektpartner ab.

5. Berichte, Veröffentlichungen

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

Alencar: Radiation effects in solids. 8th European Summer School on Separation Chemistry and Conditioning as well as Supramolecular, Intermolecular, Interaggregate Interactions, Bonn, Juli 2014 (Abstract, Talk)

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. IUCr Montreal, August 2014 (Abstract, Poster)

Alencar et al.: In-situ Resonant Ultrasound Spectroscopy during irradiation of solids with relativistic heavy ions. Acta Materialia. (im Druck)

Alencar et al.: On the degradation of monazite ceramic pellets with high energy heavy ions Scripta Materialia. in preparation

Alencar et al.: In-situ Resonant Ultrasound Spectroscopy during irradiation of solids with relativistic heavy ions. 26th International Conference on Atomic Collisions in Solids. Debrecen, Juli 2014.

Li et al. 2014: Ab initio calculation of excess properties of La_{1-x}(Ln,An)_xPO₄ solid solutions. J. of Solid State Chemistry, 220: 137-141.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Im Berichtszeitraum wurden Untersuchungen zur Immobilisierung von Re(VII), als chemischem Homolog von Tc(VII), auf Apatiten (reiner Apatit und Fe(II) Fe(III)-dotierter Calciumhydroxylapatit), Goethit (α -FeOOH) und LDH (Hydrotalcit und Pyroaurit) durchgeführt. Für LDH-Phasen wurde die Auswirkung einer Vorbehandlung bei hoher Temperatur sowie des Hintergrundelektrolyten untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der Einbau von ReO_4^- in Apatit sehr gering ist, ca. 0,01 Gew. %. Die Aufnahme durch α -FeOOH in Gegenwart von Fe(II) führte zu einer Reduktion des Re(VII) zu Re(IV) und einer daraus folgenden Immobilisierung auf der Oberfläche des Goethit. Jedoch wurde an der Luft während Wasch- und Trocknungsstufen Reoxidation von Re(IV) beobachtet, so dass der endgültige Re Gehalt im Goethit lediglich 0,01 Gew. % betrug.

Synthese von Eisen(II)-dotiertem Calciumhydroxylapatit ergab eine Mischung von Eisen(II) und Calcium-Phosphat. Fe(II) wurde in dieser Mischung nicht oxidiert, auch nicht während

der Trocknung bei 80 °C in der Luft. Es wurde bereits früher berichtet, dass Fe(II) -minerale Tc(VII) effizient reduzieren. Daher gilt Fe(II)-phosphat als ein vielversprechender Kandidat für die Tc(VII) Immobilisierung.

Experimente zur Re(VII)-Aufnahme durch LDH zeigten eine signifikante Zunahme der LDH Kapazität nach einer Vorbehandlung bei 450 °C. Durch Calcinierung wurden Anionen aus der LDH Brucit-Struktur entfernt, um die Konkurrenz von ReO_4^- mit anderen typischen Anionen im Grundwasser (CO_3^{2-} , Cl^- , etc.) zu verringern. Ein solcher Effekt behindert auch die ReO_4^- Aufnahme, wenn andere Anionen (z. B. NO_3^-) gleichzeitig in der Lösung vorhanden sind.

Um die Stabilität der Re-LDH Phasen zu verifizieren wurden Auslaugtests in entionisiertem Wasser (DW, pH 10,5) und TRIS-Puffer (pH 8,5) durchgeführt. Nahezu vollständige Auswaschung von Re in DW wurde innerhalb von 1 Monat beobachtet, jedoch wurde in TRIS-Puffer nur 30 % des ursprünglich sorbierten Re in der Lösung gefunden. Solche Unterschiede können durch die unterschiedlichen pH-Werten hervorgerufen werden. Die Experimente wurden an der Luft durchgeführt. Daher ist in deionisiertem Wasser die Absorption von CO_2 einfacher und führt zu einer höheren CO_3^{2-} Konzentration. Aus sterischen Gründen wird der Einbau des CO_3^{2-} Anions bevorzugt, daher konnten wir eine Substitution des ReO_4^- durch CO_3^{2-} in LDH beobachten.

Unterstellt man ein streng homologes Verhalten des Tc zum Re, so wäre die Immobilisierung von Tc durch Goethit und Apatit vernachlässigbar. Jedoch ist bekannt, dass die Redoxchemie des Tc(IV)/Tc(VII) deutlich von der des Re(IV)/Re(VII) abweicht, aufgrund der unterschiedlichen Redoxpotentiale, 0.747 bzw. 0.510 mV. Dies lässt eine stärkere Reduktion und somit höhere Immobilisierungsrate des Tc(VII) erwarten.

4. Geplante Weiterarbeiten

Experimente mit ^{99}Tc werden am HZDR/IRE durchgeführt. Tc(VII) Immobilisierung an LDH Phasen, Fe(II)/Fe(III)-dotierten Apatiten und $\alpha\text{-FeOOH}$ werden untersucht. Die Effizienz der Tc Immobilisierung wird in den darauf folgenden Auslaugungsversuchen untersucht.

Ein Proposal für EXAFS Messungen an Tc-FeOOH and Tc-LDH an der Rossendorf beamline BM20 wird bis März 2015 eingereicht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Eingeladener Vortrag N. Torapava: "Immobilization of long-lived iodine into inert matrices" Materials Science & Technology 2014 symposium, Pittsburgh, PA, USA (October 12-16th 2014). Daraufhin Kontakte zu Prof. J. McCloy (Washington University) und C. Veyer (AREVA in France) für weitere Zusammenarbeit.

Eingeladener Vortrag C. Walther: "Immobilization of long-lived iodine into inert matrices" Workshop "Radiation damage in structures – Relevance for nuclear waste disposal; Körber Foundation", Hamburg 14.07.2014

Die Ergebnisse wurden präsentiert und diskutiert in Frankfurt (9.-10.10.2014, Bad Salzschlirf).

Manuskript "Are LDH phases suited as host matrices for radioactive iodine storage?" eingereicht.

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: 01.07.2014 bis 31.07.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 572.506,86 EUR		Projektleiter: Prof. Dr. 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

- 2.2: Durch die weiteren Untersuchungen zum Mechanismus der Telomerverkürzung können wir nun zeigen, dass als früher/initialer Schritt (1 h nach Bestrahlung) es zu einer Telomersignal Intensitätszunahme kommt. Eine vergleichbare Zunahme wird durch die Behandlung mit Histon-Deacetylase-Inhibitor erreicht. In beiden Fällen ist durch PCR Analyse keine Verlängerung nachweisbar. Vielmehr kommt es zu einer Histonmodifikation, das Heterochromatin wird relaxiert und erlaubt dadurch vermehrte Bindung der Telomerprobe. Diese Phase dauert bei normalen humanen Keratinocyten über 24 h an. Nach 48 h ist sowohl mit der In-situ-Analyse als auch mit der PCR Methode eine Telomerverkürzung nachweisbar. In HaCaT Zellen, die Telomeraseaktivität besitzen, ist das Bild weniger deutlich. Obwohl bereits nach 24 h mit der PCR Methode eine Telomerverkürzung nachweisbar ist, ist die In-situ-Methode uneindeutig, was für eine verlängerte Phase der Histonmodifikation spricht. Ein erster Kandidat für die Induktion der Histon Modifikation ist UV-bedingtes ROS. Verhinderung von ROS während der Bestrahlung verhindert die Entstehung aberranter Zellen. Im Moment läuft der Nachweis, ob durch ROS Inhibition auch die Histon Modifikation verhindert werden kann. Darüber hinaus können wir zeigen, dass auch ROS-unabhängige Prozesse bei der UV Regu-

- lation eine Rolle spielen. Hierzu gehört z. B. die Regulation des Schelterin Proteins POT1 (RNA, Western, CHIP).
- 2.3: Um die Rolle der Gewebsorganisation für UV-induzierte Schädigung zu analysieren, wurden OTKs akut mit UVA ($1 \times 60\text{J}/\text{cm}^2$) bestrahlt. Während es nach 3 Tagen histologisch eher zu einer geringfügigen Atrophie kam, war nach 2 Wochen ein hyperplastisches Epithel entstanden. Bestrahlung mit UVA + B ($60\text{J}/\text{cm}^2$ und $100\text{mJ}/\text{cm}^2$) hatte dagegen keinen Effekt auf die Epithelregulation. Interessanterweise kam es auch bei chronischer Bestrahlung mit unterschiedlichen Dosen von UVA + B (bis $6\text{J}/\text{cm}^2 + 8\text{mJ}/\text{cm}^2$) zu keiner offensichtlichen morphologischen Schädigung der Epidermis. Dennoch war eine deutliche Telomerverkürzung in der Epidermis als auch den dermalen Fibroblasten nachweisbar. Zellen mit „Damage Foci“ (p53BP1 und γH2AX Foci) wurden nur sporadisch in den suprabasalen – differenzierten Epidermiszellen beobachtet. D. h. es kam durch die chronische Bestrahlung nicht zu „Long-lasting“ „Damage Foci“ in den basalen Zellen und damit nicht zu dysfunktionellen Telomeren, die ein Hinweis für genomische Instabilität sind.
 - 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 ($1 - 12\text{J}/\text{cm}^2$ Einzeldosis) untersucht. Interessanterweise war bis $6\text{J}/\text{cm}^2$ nur wenig Vitalitätsverlust zu beobachten. Erst ab $8\text{J}/\text{cm}^2$ stieg der Vitalitätsverlust signifikant an. Die Analysen zur Telomerverkürzung zeigten, dass es auch in der 3D in vivo ähnlicher Konstellation zu einer Telomerverkürzung kam. Interessanterweise war diese am größten bei der niedrigsten UVA Dosis. D. h. es handelt sich hier nicht um eine Dosis-abhängige Verkürzung, vielmehr scheinen andere (indirekte) Parameter (s. o.) von Bedeutung zu sein. Ein Wiederholungsexperiment wurde durchgeführt.
 - 2.5: OTKs wurden (akute Bestrahlung) mit $860\text{J}/\text{cm}^2$ und $400\text{J}/\text{cm}^2$ IRA bestrahlt. Die Dosis war durch AG Krutmann vorgegeben. Interessanterweise kam es durch IRA zu keiner phänotypischen Veränderung, noch wurde Hsp72 induziert. Auch gab es keine Proliferationsänderung (Ki67 Färbung). Es oder Induktion von CPDs (Cyclobutan Dimeren), was dafür spricht, dass IRA in den Zellen in OTKs, also in in vivo-ähnlicher Umgebung, keine massive Schädigung induziert. Jedoch war bei $860\text{J}/\text{cm}^2$ in der Basalschicht eine erhöhte Telomersignalintensität nachweisbar. Aufgrund der oben beschriebenen Ergebnisse wird dieser Befund jetzt weiterverfolgt. Das Wiederholungsexperiment wurde durchgeführt und wird derzeit ausgewertet. Eine kombinierte Strahlung UVA/IRA war wegen der Komplexität der IRA Lampe nicht möglich. Deshalb wurden die beiden Strahlenqualitäten nacheinander verabreicht – erst UVA dann IRA. Hierbei kam es zur Induktion von HSp72 – vergleichbar dem, was zuvor bereits mit reiner UVA Strahlung ermittelt wurde und ist höchstwahrscheinlich auch auf die vorgeschaltete Behandlung mit UVA zurückzuführen. Anders als nach UVA war aber keine Induktion von Caspase-3 nachweisbar, d. h. Apoptose wurde nicht induziert.

4. Geplante Weiterarbeiten

- 2.2: Weiterführende Arbeiten: CHIP Analysen zum Heterochromatin Switch und Expressions/Aktivitätsanalysen von HDACI/II. Nachweis von In-situ-Telomerintensität nach UV Strahlung unter ROS Inhibition (GSH) und Verfassung eines Manuskripts zur Regulation der Telomerverkürzung durch UV Strahlung.
- 2.3: Bestimmung der Telomerlängen zu unterschiedlichen Zeiten nach IRA Bestrahlung und generelle Auswertung des Wiederholungsexperiments.
- 2.4: Durchführung und Auswertung eines neuen Bestrahlungsexperiments – chronische Bestrahlung (3 x pro Woche für 4 Wochen) von Hautäquivalenten auf cell-derived Matrix, mit UVA plus UVB zur Verifizierung der Befunde mit Scaffold-basierten OTKs.
- 2.5: Weitere Auswertung der IRA Bestrahlungsexperimente und Vorbereitung einer Publikation.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Einladung zum Vortrag: Graduiertenschule Kloster Schöntal, 16. Juli 2014: „TGFbeta-dependent chondrocyte transdifferentiation of human dermal fibroblasts as a cause of photoaging“

Boukamp, P., et al.: TGFβ-dependent fibroblasts transdifferentiation link a chondrogenic profile to photoaging (external skin aging), Manuskript in Fertigstellung

Boukamp, P., et al.: UV radiation is a critical determinant of telomere length in human skin. Manuscript in Fertigstellung

Boukamp, P., et al.: (2014) Wnt-3a-activated human fibroblasts promote human keratinocyte proliferation and matrix destruction. *Int J Cancer*. 2014 Nov 17. doi: 10.1002/ijc.29336. [Epub ahead of print]

Martin-Ruiz, C.M., et al.: Reproducibility of telomere length assessment: an international collaborative study. *Int J Epidemiol*. 2014 Sep 19. pii: dyu191. [Epub ahead of print]

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 31.12.2014	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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-Polymorphismus (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 γ -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 γ -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 Energiedeposition bei Auger-Elektronen und α -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 Schädigung von funktional verschiedenen Bereichen des Chromatins zu unterschiedlichen Genexpressionsänderungen? Die gezielte Exposition von Chromatinstrukturen mit AEE soll anhand von ^{125}I -markierten DNA-Triplexbildenden 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.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

2.1 und 2.2.:

Die im Projekt gewonnenen Genexpressionsprofile aus humanen peripheren Blutlymphozyten wurden hinsichtlich strahlungsassoziierter Gennetzwerke sowie der Bildung robuster, konsistenter Konsensusmodule („consensus modules“) unter Miteinbeziehung von Datensätzen aus mehreren vergleichbaren Studien anderer Autoren tiefergehend 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 > 20 Konsensusmodule identifiziert. Davon erwiesen sich 10 Konsensusmodule als strahlungsassoziiert, eines davon hochsignifikant ($5e-56$). Im Niedrigdosisbereich (0,05 – 0,1 Gy) sind nur drei Konsensusmodule strahlungsassoziiert. Genontologie („GO ontology“) and „KEGG pathway“ Analysen für das hochsignifikante Konsensusmodul für den mittleren und hohen Dosisbereich zeigten die Beteiligung der zellulären Prozesse „regulation of the cell cycle“, „DNA damage response/signal transduction by p53 class mediator“ und „intrinsic apoptosis pathways“. Eine Publikation ist in Anfertigung.

Die Datenauswertung bezüglich Genexpressionsmarkern zur Diskriminierung von Strahlenqualitäten nach Bestrahlung mit Äqui-Effekt-Dosen zeigte, dass nach Strahlenexposition mit I-123-UdR, α -Partikeln respektive γ -Strahlung exklusiv 165, 318 respektive 995 Gene in Jurkat-Zellen signifikant reguliert sind (> 1,5-fach; FDR über alle features $p < 0,05$). Das interne Kriterium, dass ein robuster Genmarker für die Diskriminierung der Strahlenqualität eine signifikante Erhöhung der Genexpression zeigen und zugleich bei der Vergleichsstrahlenqualität eine gegensätzliche Regulation der Genexpression aufweisen muss, erfüllten jedoch nur 4, 1 respektive 1 Gen beim Vergleich zwischen γ - versus I-123-UdR-Exposition, γ - versus α -Bestrahlung respektive α - versus I-123-UdR-Exposition. Es konnten daher robuste Biomarker in Jurkat-Zellen identifiziert werden, welche die Strahlenqualität anzeigen, inwieweit diese jedoch Allgemeingültigkeit besitzen, muss in weiterführenden Arbeiten geklärt werden. Eine Publikation ist in Vorbereitung.

2.3:

FISH-Chromosomenanalysen zeigten, dass die mit dem Auger-Elektronen-Emitter I-125-markierten TFOs mit einer spezifischen Bindungssequenz im BCL-2 Gen, die Häufigkeit einer in dieser Region auftretenden Translokation, die mit einer generellen Überexpression des BCL-2 Gens und einem Tumorgeschehen einhergeht, scheinbar erhöht. Dies ist zum einen ein Hinweis darauf, dass die vermutete spezifische Bindung des I-125-markierten TFOs im BCL-2 Gen im zellulären Umfeld tatsächlich vorliegt, zum anderen erklärt dies auch, die bereits beobachtete und berichtete signifikante Erhöhung der BCL-2 Genexpression nach Transfektion mit diesem spezifischen I-125-markierten TFO. Das unmarkierte TFO induziert dagegen weder die Erhöhung der BCL-2 Genexpression, noch das Translokationsgeschehen im BCL-2 Gen. Die Untersuchungen weisen generell darauf hin, dass DNA-nahe Zerfälle von Auger-Elektronen-Emittern komplexe DNA-Läsionen erzeugen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Das Projekt läuft zum Berichtsende aus.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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 31.12.2014	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Nachwuchskräfte 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, Ra-228 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 und zur Verifizierung von hypothetischen Umgebungsfaktoren mit gemessenen Daten wur-

- den zusammengefasst. Aus diesen Daten wurde der Endbericht für das Arbeitspaket erstellt. Das Arbeitspaket wurde abgeschlossen.
- AP1.3: Die Programmierung eines neuen Algorithmus für das 2D-Video-Distrometer speziell zur Charakterisierung von Schnee wurde anhand von Kalibrationsmessungen optimiert. Insgesamt wurden Charakterisierungen für 163 Schnee-, 35 Misch- und 76 Regenereignisse durchgeführt und für eine Auswahl Scavenging-Koeffizienten berechnet. Abhängigkeiten zwischen Washout und unterschiedlichen Schneeparametern wurden gefunden und interpretiert. Für drei langzeitige Schneefallereignisse wurden γ -spektrometrische Messdaten für parallele Proben in 2 h-Abständen von Gesamtaerosolkonzentrationen sowie Depositionsproben ausgewertet. Für die partikelgrößenfraktionierten Aerosole wurde die γ -spektrometrische Aktivitätsbestimmung für zwei Proben (jeweils 14 Partikelgrößenstufen) fertig gestellt. Der Abschlussbericht wird erstellt.
- AP2.3: Das Arbeitspaket wurde eingestellt.
- AP3.1: Die Ergebnisse der Humanstudien und der Löslichkeitsstudie mit Heilerde ist veröffentlicht, siehe Träber et al. 2014, Sci. Environ. Techn. doi 10.1021/es504171r. Eine zweite Veröffentlichung über das Biokinetikmodell und die Dosisberechnung von Uran aus hochkontaminierten Erden wird in Rad. Environ. Biophys. eingereicht. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
- AP3.3: P. Nogueira hat alle seine im Rahmen des AP erzielten Ergebnisse in einer Dissertation zusammengefasst und erfolgreich damit an der LMU München promoviert. Eine Publikation mit den Ergebnissen einer im Rahmen des AP durchgeführten internationalen Messkampagne ist eingereicht. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
- AP3.4: In Kooperation mit AP4.1 wurden die Ausscheidungsanalysen von Pb-210 nach Zufuhr modelliert und an AP4.1 geliefert. Ziel ist es, die Modellvorhersagen und die Messdaten von Pb-210 gegenseitig zu validieren. Zwei Publikationen in Kooperation mit AP3.3 sind in Vorbereitung (Anreicherung der Aktivität von Pb-210 und Ra-226 im Skelett nach Ingestion und Inhalation). Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
- AP4.1: Die Messungen für die Ra-226, Pb-210 und Ra-228 Konzentrationen in Lebensmitteln mit Gamma-Spektrometrie wurden abgeschlossen. Ein Meeting mit VKTA zur Abstimmung des Abschlussberichts wurde im Juli durchgeführt. Dabei wurde eine gemeinsame Gliederung des Berichts erstellt, der in Arbeit ist.
- AP4.2: Die Kalibriermessungen wurden abgeschlossen und zeigten eine ähnliche Empfindlichkeit des Messgeräts für Radon und Thoron, mit Kalibrierfaktoren von jeweils $16,2 \pm 0,9$ Bq m^{-3} /cph und $14,4 \pm 0,8$ Bq m^{-3} /cph. Ein Auswerteverfahren unter Verwendung der ISO-Norm ISO 11665 wurde entwickelt und mittels Vergleichsmessungen validiert. Die Nachweisgrenze des neuen Geräts wurde bestimmt und beträgt für Radon $44,0$ Bq m^{-3} und für Thoron im Fall einer vernachlässigbaren vorhandener Radonkonzentration $40,0$ Bq m^{-3} . Erste Messungen in gemischten Radon/Thoron-Umgebungen von etwa je 200 Bq m^{-3} in dem Modell-Haus am Helmholtz Zentrum München zeigten gute Übereinstimmung mit Messergebnissen von Referenzgeräten, wodurch unter anderem die angewandte Auswertungsmethode validiert wurde. Erste Messungen in einem privaten bayerischen Lehm-Haus ergab eine niedrige Thoron-Konzentration von etwa $13,0 \pm 3,0$ Bq m^{-3} , im Vergleich zu einer hohen Radonkonzentration von 200 ± 70 Bq m^{-3} . Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.
- AP4.3: Vergleichsmessungen der entwickelten Methoden in einem Referenzhaus werden für eine Veröffentlichung zusammengestellt. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Das Vorhaben ist abgeschlossen. Der Abschlussbericht und Publikationen werden vorbereitet.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.08.2014	
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

For summer wheat, digestate amendment did not reflect a significant effect on soil-plant transfer of the two radionuclides (RN). However, a clear difference in plant uptake in different plants was observed, weed plants showed higher uptake compared to wheat. Moreover, a clear translocation of the activity was recorded 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 and summer oat have been harvested and plants and soil preparation for activity analysis is all finished. The activity results for Cs-137 are complete, while activity results for Sr-90 are in progress at institute of safety and radiation protection (S, Forschungszentrum Jülich). For Teralife and summer oat, 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).

Cs-137 results for summer oat show the similar trend to summer wheat, highest activity in roots, followed by shoot and lowest in the grain. And for Teralife, Lupine shows slightly higher uptake compared to Klee and Phacelia. Again the digestate amendment did not make a significant effect on Cs-137 uptake in summer oat and Teralife.

The sorption-desorption experiments for cesium and strontium at three different temperatures: 5, 20 (room temperature) and 35 °C are complete, only the results for cesium at 35 °C are awaited from the central institute of analytics (ZEA-3, Forschungszentrum Jülich). 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).

The results indicate that soil texture and land use has more pronounced effect compared to amendment type for both contaminants. Among three main soils, silty-loam showed highest sorption capacity for cesium, 4-5 times higher compared to sandy-loam and almost twice to the forest soil. Compared to cesium, strontium sorption was nearly half in all soils. Again silty-loam soil exhibited higher sorption capacity for strontium, almost 4-5 times higher compared to the both forest and sandy soils.

Reducing the temperature from 20 to 5 °C resulted in higher cesium sorption (nearly twice in amended soils) in silty-loam soil, whereas in forest and sandy soils, there was a minor effect of temperature. Decrease in temperature led to a positive effect on Cs retention in silty-loam, while in sandy-loam and forest soils, temperature effect was opposite. Strontium sorption was slightly affected by change in temperature, resulting about 10 % higher sorption at 5 °C compared to 20 and 35 °C in silty-loam soil, while in sandy-loam and forest soils, temperature effect was negligible. Effect of temperature on strontium retention was quite diversified, higher hysteresis at 5 and 35 °C compared to room temperature (20 °C) in three main soils.

4. Geplante Weiterarbeiten

Ongoing

- Preparation and submission of papers after including the remaining results (sorption_ Cs-35 °C and Sr-90_ activity results).
- Writing of PhD thesis and final project report.

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., Borchard N., Burauel P., Vereecken H. and Berns A.E. (2015): "Sorption-desorption of Cs⁺ and Sr²⁺ in arable and forest soils affected by soil texture, origin of organic matter and temperature" (in preparation).

Mehmood K., Berns A.E. Pütz T., Burauel P., Vereecken H., Zoriy M., Flucht R., Opitz T. and Hofmann D. (2015): "Plant uptake and vertical mobility of Cs-137 and Sr-90 in digestate amended silty-loam soil- a lysimeter scale experiment with different crops" (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: 01.07.2014 bis 31.08.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 247.200,00 EUR	Projektleiter: Dr. Walther	

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 von Arbeitern (einschließlich der „Null“-Proben) und Referenzpersonen sind abgeschlossen worden.
- Für Urinproben ergeben sich aus der bisherigen Auswertung der umfangreichen Datensammlung (ca. 600 Einzelanalysen) Werte kleiner Erkennungsgrenze (0.5-15 mBq/d) oder Werte bis max. 37 mBq/d für ^{210}Pb bzw. ^{210}Po und bis 1.2 mBq/d für ^{228}Th (Tab.). Die Stuhlproben weisen dagegen deutlich höhere spezifische Aktivitäten auf: bis max. 865 mBq/d für ^{210}Po , 430-500 mBq/d für ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra und bis 165 mBq/d für ^{228}Th . Die durchschnittlichen Werte liegen zw. 45 und 150 mBq/d.
- Bei einer ersten vorläufigen Gegenüberstellung der Analysendaten der Lebensmittel (Zusammenarbeit mit ISS, München, 02NUK015B) und der Ausscheidungen einzelner Personen sind Werte in vergleichbarer Größenordnung für Aufnahme- bzw. Ausscheidungsrate gefunden worden.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Das Projekt ist inklusive Verlängerung am 31.08.2014 ausgelaufen. Im Abschlussbericht werden die durchgeführten Arbeiten, Methodenentwicklungen, Probandenstudie und Ergebnisse der zahlreichen Analysen beschrieben und ausgewertet. Nach Zusammenstellung der Analysendaten erfolgt eine Bilanzierung der Aufnahme- und Ausscheidungsmengen für jeden einzelnen Probanden. Die ermittelten Ausscheidungsrate werden mit den Ergebnissen der Analysen der zur Verfügung gestellten Lebensmittel (welche am Helmholtz-Zentrum München analysiert wurden) abgeglichen.
- Da für die sinnvolle Darstellung und Auswertung der Ergebnisse der Austausch von Daten zwischen VKTA und ISS des Helmholtz-Zentrum München (Teilprojekt 02NUK015B, Laufzeitende: 31.12.2014) unabdingbar ist, werden die Abschlussberichte beider Teilprojekte zeitgleich fertig gestellt.
- In einer gemeinsamen Publikation mit den Kollegen vom ISS werden Methoden und Analyseergebnisse vorgestellt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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-Expositions-kammer 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: Experimente zur genauen Bestimmung der Anreicherung des Radons in verschiedenen Materialien (Muskel, Fett) wurden erfolgreich durchgeführt und ausgewertet. Die Analyse der mit Gammaskopie gemessenen Zerfallsprodukte ermöglicht die Bestimmung der Radonkonzentration in den Proben. Es zeigte sich, dass die Diffusion des Radons aus der Probe einen signifikanten Einfluss auf

die Genauigkeit der Analyse hat. Deshalb wurde eine Apparatur zur direkten Messung der Radon Diffusion installiert und getestet.

- AP3: Es wurde eine detaillierte Analyse des Bruchverhaltens der Chromosomen von 2 Radontherapiepatienten durchgeführt. Die Untersuchung weist darauf hin, dass bei beiden Patienten ein bestimmtes Chromosom eine erhöhte Brüchigkeit aufweist. Die zugrunde liegende Bruchstelle gehört zur Gruppe der „häufig fragilen Stellen“. Ob dieser Befund in Zusammenhang mit der Erkrankung der Patienten steht, muss in weitergehenden Untersuchungen geklärt werden. Weiterhin wurden in Zusammenarbeit mit AP2 Wildtypmäuse mit Radon bestrahlt (40 und 400 kBq) und Chromosomenpräparate von Knochenmarkszellen und Lymphozyten 1,7 und 90 Tage nach der Behandlung hergestellt. Mit der Auswertung wurde begonnen.
- AP4: (a) Weitere Experimente zur Apoptose von Monozyten mit frischem Spenderblut haben die Abhängigkeit der Apoptose-Rate von der O₂-Versorgung bestätigt. Die mit AP5 und AP8 durchgeführten Experimente zu den molekularen Grundlagen von Adhäsion wurden ausgewertet und zusammengefasst.
- (b) Die bestrahlten Osteoklasten-Vorläufer zeigten eine verminderte Expression der wichtigen Struktur- und Funktionsmarker des Differenzierungsprozesses, jedoch nur nach Bestrahlung mit hohen Dosen, nicht für niedrige Dosen. Hingegen konnte auf einem physiologischen Substrat (Knochen) eine Abnahme der resorbierenden Aktivität von Osteoklasten sowohl für niedrige als auch für hohe Dosen gezeigt werden. Im Einklang damit steht die beobachtete Reduktion von Kollagenfragmenten im Serum von Radon-behandelten Patienten. Die Differenzierung von Adipozyten zeigt einen Trend zur Zunahme von Triglycerin in den Zellen in Folge einer Bestrahlung, während die Freisetzung des endokrinologisch wichtigen Hormons Leptin nicht signifikant verändert ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Der Experimentier-Betrieb kann am alten Standort weitergeführt und anschließend am neuen Standort fortgesetzt werden. Die Messungen zum Diffusionsverhalten von Radon sollen fortgeführt und die Datenanalyse verbessert werden. Da der bisher benutzte Gammadetektor der Abteilung Sicherheit in Zukunft nicht mehr benutzt werden kann, soll ein neuer Gammadetektor angeschafft und in Betrieb genommen werden.
- AP3: Die Untersuchung zur Induktion von Chromosomenschäden in Knochenmarkszellen Lymphozyten und von Mäusen in Zusammenarbeit mit AP2 und AP9 wird fortgesetzt. Die Patientenstudie soll weitergeführt werden, d. h. neue Patienten sowie gesunde Kontrollpersonen sollen rekrutiert werden. Die Schwerpunkte unserer Untersuchungen sind die Analyse von „komplexe Aberrationen“ und die „Bruchpunktlokalisierung“. Eine erste Veröffentlichung wird vorbereitet.
- AP4: (a) Die dynamischen Bedingungen zur Untersuchung der Adhäsion werden weiter verbessert und die Freisetzung und Wirkung von ausgewählten Zytokinen untersucht, um Experimente zur Ergänzung der bestehenden Datensätze durchzuführen. Eine Publikation ist in Vorbereitung.
- (b) Die Herabsetzung der Osteoklasten-Aktivität wird mit weiteren Spendern untersucht, um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu verbessern und eine erste Publikation zu konzipieren. Die strahleninduzierte Freisetzung von Zytokinen, die für die Interaktion von synovialen Fibroblasten und Adipozyten im arthritischen Gelenk relevant sind sowie Differenzierungsfaktoren (mRNA, Proteine) sollen weiter untersucht werden. Dafür sollte neben der Verwendung von humanen Zellen auch die Isolierung von Fibroblasten aus Mäusen in Kollaboration mit AP2 und AP9 etabliert werden. Außerdem ist geplant, im Serum von Radon-behandelten Patienten die Freisetzung von Adipokinen, die den Fettstoffwechsel regulieren, zu untersuchen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- M. Lange, S. Reichert, S. Hehlhans, C. Fournier, C. Rödel, F. Rödel: A non-linear detection of phospho-histone H2AX in EA.hy926 endothelial cells following low-dose X-irradiation is modulated by reactive oxygen species. *Radiat Oncol* 2014; 9:80
- B. Roth, C.S. Gihhardt, P. Becker, M. Gebhardt, J. Knoop, C. Fournier, A. Moroni, G. Thiel: Low-dose photon irradiation alters cell differentiation via activation of hIK channels. *Pflugers Arch.* 04 Oct 2014

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Die Arbeiten im Berichtszeitraum haben sich auf die Charakterisierung von Ionenkanälen in Lymphozyten und deren Antwort auf ionisierende Strahlung konzentriert. Der Doktorand Herr Becker hat dazu viele Vorarbeiten zur Typisierung und Charakterisierung der verschiedenen Lymphozyten durchgeführt. Unsere Strategie die elektrophysiologischen Versuche mit Jurkat-Zellen, (immortalisierten T-Lymphozyten) und damit mit einem klar definierten Zelltyp durchzuführen, erwies sich als nicht geeignet. Diese Zellen exprimieren den in vorherigen Untersuchungen identifizierten strahlenempfindlichen hIK Kanal nicht. Daher ist es notwendig, den etwas arbeitsaufwendigeren Weg über eine Aufreinigung von unterschiedlichen Lymphozyten aus frischen Blutproben zu beschreiten.

Im Laufe der Arbeit haben sich sehr interessante Befunde hinsichtlich der Aktivierung von Lymphozyten ergeben. Wir konnten beobachten, dass das konventionelle Mitogen Phythämagglutinin (PHA), das bei T-Lymphozyten zur Aktivierung führt, auch eine Zellvergrößerung induziert. Interessanterweise kann der gleiche Effekt der Zellvergrößerung von Lymphozyten auch durch ionisierende Strahlung (Röntgenstrahler und α -Strahler) induziert werden. Wir vermuten daher, dass eine Bestrahlung von Zellen eine positive Auswirkung auf die Immunreaktion von Zellen hat. Der Zusammenhang zwischen Strahlung und Zellvergrößerung und die zugrunde liegende Signaltransduktion wird nun weiter verfolgt werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

In den vorangegangenen Berichtszeiträumen haben wir viele Fortschritte hinsichtlich einer Registrierung von Signalkaskaden mit genetisch kodierten fluoreszierenden Sensoren gemacht. Diese Sensoren werden nun eingesetzt, um sehr frühe Signalschritte, die durch ionisierende Strahlung ausgelöst werden, mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu untersuchen. Die entsprechenden Arbeiten wurden bereits mit Röntgenstrahlen bzw. mit UV-A Licht als Stresssignal erfolgreich durchgeführt. Die gleichen Messungen werden nun mit einer α -Strahlenquelle als Stimulus durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus diesen Messungen werden sehr detaillierte Auskunft über die initialen Signalschritte, die durch diese Strahler induziert werden, ermöglichen.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Publikation:

Roth et al.: "Low dose photon irradiation alters cell differentiation via activation of hIK channels". Pflügers Archive-Europ. J. Physiol. (in press)

Gibhardt et al.: „X-ray irradiation activates K⁺ channels via ROS signaling". J. Gen. Physiol. (in Begutachtung)

Promotion:

Christine Gibhardt: „Radiation induced activation of potassium-channels: the role of ROS and calcium". Abschluss Sept. 2014.

Vorträge/Poster:

GRK "Netzwerk" Treffen mit einem anderen Graduiertenkolleg in Bonn; Posterpräsentation.

GREWIS Workshop an der GSI, hier habe ich einen Vortrag gehalten.

GRK Gruppentreffen, Fortschrittsberichtsvortrag.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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 hämatopoetischen 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

Im Rahmen des AP6-Teilprojekts von GREWIS untersuchen wir das cholinerge System hinsichtlich seiner Beteiligung bei entzündlichen Prozessen, insbesondere dem anti-inflammatorischen Signalweg (CAIP). Wir hatten früher schon die Bedeutung des nicht-neuronalen cholinergen Systems für die Knochenbildung herausgestellt. Deshalb hatten wir 3D-Hochdichte-Zellkulturen etabliert, welche die Bildung von Knorpel und Knochen in vitro nachvollziehen. Hierbei gehen wir von embryonalen Extremitätenanlagen sowohl des Huhns wie der Maus aus.

Einfluss von Bestrahlungen auf die Knochenbildung:

Wir haben Micromass-Kulturen mit 0.5 und 2 Gy Röntgenstrahlung behandelt, um deren Effekte auf die Knochenbildung zu untersuchen. 0.5 Gy zeigte keine Effekte, während 2 Gy die Bildung von Knorpel-Knötchen viel früher als in den Kontrollen induzierte. Zusätzlich haben 2 Gy-Bestrahlungen die AChE- und die ALP-Aktivitäten erhöht, was gleichzeitig mit beschleunigter Mineralisierung korreliert war. Dies weist auf eine beschleunigte Knochendifferenzierung durch Röntgenstrahlung hin.

Effekte von TNF-alpha auf die Differenzierung von Osteoblasten, welche von adulten Stammzellen der Maus abgeleitet sind:

Wir haben Stammzellen aus Knochenmark von 3-4-Wochen-alten Mäusen isoliert und konnten sie mithilfe von Differenzierungsmedium erfolgreich zu Osteoblasten ausdifferenzieren. Diese wurden mit 5 ng/ml hTNF-alpha behandelt. Nach 1-2 Wochen wurden die Zellen fixiert und einer Alizarin- bzw. für ALP-Färbung unterzogen. Diese Experimente müssen noch reproduziert werden, um ihre Verlässlichkeit nachzuweisen. Gleichzeitig führte die TNF-alpha-Behandlung zu einer reduzierten AChE-Aktivität in den Micromass-Kulturen, was auf eine Verbindung des cholinergen Systems mit der Knochenbildung und Entzündungsvorgängen hinweist.

Röntgenstrahlung kann den TNF-alpha-Effekten in vitro entgegenwirken:

Im November 2014 wurden bei einer GSI-Tagung die Effekte von Niedrigdosis-Röntgenstrahlung auf TNF-alpha-transgene Mäuse diskutiert, die ein Modell für rheumatoide Arthritis darstellen. Tatsächlich konnten dabei positive Effekte nachgewiesen werden. Wir konnten in TNF-alpha-behandelten Micromass-Kulturen ähnliche Effekte beobachten, nachdem sie mit 2 Gy, jedoch nicht mit 0.5 Gy Röntgenstrahlung exponiert worden waren. Histologische Schnitte dieser Mäuse (Röntgen-bestrahlt und Kontrollen) werden wir demnächst erhalten. Wir werden sie sodann auf die cholinergen Komponenten untersuchen, um einen Zusammenhang mit dem cholinergen anti-inflammatorischen Signalweg (CAIP) herzustellen.

4. Geplante Weiterarbeiten

(i) Monate 12-24:

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

(ii) Monate 24-36:

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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). 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 (GSI)
- AP2: Biologische Dosimetrie (TUD)
- AP3: Abschätzung des Strahlenrisikos durch Untersuchung chromosomaler Aberrationen (GSI)
- AP4: Untersuchung von zellulären und molekularen Interaktionen in Blutgefäßen/Knochen (GSI)
- AP5: Die Rolle von NF- κ B bei der anti-inflammatorischen Wirkung von Strahlung (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 (GUF)
- AP9: Untersuchung immunologischer Gefahrensignale und Inflammation im Tiermodell (UKER)

Meilenstein AP5:

I. (Monate 1-6)

- NF- κ B Expression in Knochen-resorbierenden Osteoklasten, Makrophagen Endothelzellen auf RNA-Ebene (mittels RT-PCR) und auf Protein-Ebene (mittels Western Blot/FACS Analyse)
- Einfluss von Strahlung auf die Expression von NF- 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-Immünpräzipitierung

- 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

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Wir analysierten mittels Westernblot Analyse die Proteinkonzentration unterschiedlicher NF- κ B Transkriptionsfaktoren in primäre humane Endothelzellen (HMVEC).

Des Weiteren untersuchten wir die Aktivierungskinetik von NF- κ B (p65) in primären humanen Endothelzellen nach Bestrahlung. Hierzu bestrahlten wir die Zellen mit Röntgenstrahlen (X-Ray) und Ionenstrahlen sowohl mit niedrigen Dosen (0.5 Gy) wie auch mit hohen Dosen (2/6 Gy). Nach Fixierung der Präparate zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurde die nukleare NF- κ B Konzentration mittels Immunfluoreszenz Färbung und anschließender Analyse via „Operetta High-content/High throughput imaging system“ ermittelt. Die Daten der Analyse wurden mit zuvor gewonnenen Daten der Endothelzelllinie (EA.hy.926) verglichen. Beide Zellsysteme zeigen einen deutlichen Anstieg von nukleare NF- κ B (p65) nach TNFalpha Zugabe. In der Endothelzelllinie, jedoch nicht in primären Endothelzellen, ist die TNFalpha Aktivierung teilweise inhibiert nach Bestrahlung mit niedrigen Dosen, insbesondere nach Ionenbestrahlung.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Laufe der nächsten sechs Monate werden wir die Aktivierungskinetik von NF- κ B in humane Osteoblasten und Osteoclasten Zellkulturen nach Bestrahlung bestimmen. Diese wird ebenfalls mittels Immunfluoreszenz Analyse ermittelt und anschließend an der „Operetta High-content/High throughput imaging system“ ausgewertet. Die daraus resultierenden Ergebnisse sollen mit Ergebnissen des AP4 (zelluläre und molekular Interaktionen) verglichen werden. Des Weiteren planen wir die Analyse und Auswertung bereits bestrahlter und präparierter Maus Gewebe.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 biosimetrischen 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 Biosimetrie
- 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

Im Rahmen dieses Teilprojekts soll am Mausmodell untersucht werden, wie Radongas sich im Körper verteilt und ob eine Anreicherung in bestimmten Organen zu beobachten ist. Dazu werden die durch Radonzerfälle-induzierten DNA-Doppelstrangbrüche (DSBs) über den hochsensitiven γ H2AX-Foci Assay nachgewiesen und quantifiziert. Es wurden insgesamt drei Tierexperimente mit 18 adulten, weiblichen Mäusen durchgeführt. Die Mäuse wurden in der Radonexpositionskammer über eine Stunde einer Radonkonzentration von 40 kBq/m^3 oder 440 kBq/m^3 ausgesetzt und wurden nach 15 min, 24 h, 7 d und 90 d Rekonvaleszenzzeit für die Organentnahme getötet. Des Weiteren wurden zu jedem Zeitpunkt die Organe von Kontrolltieren entnommen. Durch enge Zusammenarbeit mit den anderen Verbundpartnern während des Tierversuchs wurde eine besonders effiziente Aufteilung aller Proben sichergestellt und gleichzeitig ermöglichte dieses Vorgehen, dass die verschiedenen Untersuchungen der Verbundpartner auf dem gleichen Probenmaterial basierten. Unter anderem wurden fixierte Organe für die Radioaktivitätsmessung an AP1 abgegeben, Blut und Knochenmark für die Chromosomenanalyse an AP3 und ein Teil unfixierte Lunge zur Charakterisierung pulmonaler Makrophagen an AP4.

Bisher wurde die biodosimetrische Analyse von zwei Tieren für Lunge, Herz, Niere, Leber und Knochen durchgeführt, die 15 min nach der Radonexposition (1 h, 440 kBq/m^3 Radon) getötet wurden. Es wird angenommen, dass Radon über die Haut und die Lunge in den Organismus gelangen kann und sich in diesem durch freie Diffusion verteilt. Erste experimentelle Ergebnisse zeigten im γ H2AX-Foci-Assay eine leicht erhöhte Anzahl von γ H2AX-Foci in Herz, Niere, Leber und am Knochen von Radon-exponierten Mäusen. Die Vermutung, dass sich Radon bzw. dessen Zerfallsprodukte präferentiell an die Knochen anlagern, konnte bisher nicht bestätigt werden. Zusätzlich zur freien Diffusion von Radon können sich Tochternuklide, welche in der Luft entstanden sind, an Staubpartikel anheften und eingeatmet werden. Innerhalb der Atemwege bzw. der Lunge, wo sich die Staubpartikel anheften, können dann weitere Zerfälle der Tochternuklide stattfinden. Aufgrund dessen wurde in der Lunge eine im Vergleich zu den anderen Organen höhere Schadensinduktion erwartet, welche experimentell bestätigt werden konnte.

4. Geplante Weiterarbeiten

Um von der Anzahl der γ H2AX-Foci Rückschlüsse auf eine Dosis ziehen zu können, sind weiterführende Versuche mit der Röntgenröhre und der α -Quelle in der Zellkultur geplant. Bei der Dosisermittlung muss berücksichtigt werden, dass DNA-Schäden nach einem α -Zerfall komplexer sind und ein γ H2AX-Foci daher mehrere DSBs repräsentieren kann was nach einer Röntgenbestrahlung lediglich ein zu vernachlässigendes Ereignis ist. Deshalb soll ein Korrekturfaktor über die Quantifizierung von γ H2AX-Foci bei gleicher Dosis nach Bestrahlung mit der Röntgenröhre bzw. der α -Quelle definiert werden.

Da alle geplanten Tierversuche mit einer Radonexposition in 2014 abgeschlossen wurden, werden bis zum Projektende Immunfluoreszenzfärbungen der Paraffinschnitte von verschiedenen Organen angefertigt und die Anzahl der γ H2AX-Foci quantifiziert. Die biodosimetrische Analyse soll dabei auch auf weitere Zeitpunkte nach der Exposition ausgedehnt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Grüneburgplatz 1, 60323 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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

Diskontinuierliche Dosis-Wirkungsrelationen sind ein wesentliches Charakteristikum der anti-inflammatorischen Wirkung niedriger Strahlendosen. Aufbauend auf den Ergebnissen des vorangegangenen Berichtszeitraums gelang in der Endothel-Linie EA.Hy926 und in primären mikrovaskulären Endothelzellen (HMVEC) der Nachweis einer lokal verminderten Expression und DNA-Bindeaktivität des redoxsensitiven Transkriptionsfaktors Nrf2 (AP1).

Auf funktioneller Ebene führte sowohl eine Präinkubation der Endothelzellen mit dem Radikalfänger N-Acetyl-L-Cystein (NAC), als auch die Zugabe des Nrf2 Aktivators AI-1 (Merck, Darmstadt) zu einer partiellen Aufhebung der in den Kontrollen nachweisbaren Minderung der Leukozyten-Adhäsion mit der größten Ausprägung nach Bestrahlung mit 0,5 Gy. (Publikation in Vorbereitung). Diese Ergebnisse belegen eine direkte funktionelle Relevanz von ROS und Nrf2 in der Vermittlung des anti-inflammatorischen Effekts kleiner Strahlendosen (AP3). Mittels quantitativer PCR wurde die Expression von mikro(mi)RNAs mit direkter Relevanz für die Expression von Nrf2 (mi-27a) und der Superoxid-Dismutase (mi-21) in einer Dosiskinetik untersucht (AP3). Dabei konnte in stimulierten EA.Hy926 eine diskontinuierliche Induktion von mi-27a mit einem lokalen Maximum nach Bestrahlung mit 0,7 Gy beobachtet werden, während für mi-21 erst ab Dosen von 1 Gy ein Anstieg der Expression detektierbar war.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten in AP1 werden plangemäß weitergeführt.

In AP2 soll die Bedeutung des Stressfaktors Hsp70 für die Funktionalität von Endothelzellen in einem funktionellen Adhäsions assay weiter analysiert werden.

Den Schwerpunkt der Untersuchungen im AP3 stellen weitergehende Untersuchungen zur funktionellen Bedeutung von ROS und des Transkriptionsfaktors Nrf2 für den Adhäsionsprozess dar. Die regulatorische Aktivität von miRNAs soll durch umfangreichere Untersuchungen zur globalen Expression mittels „Next Generation“ Sequenzierung und dem Einsatz von miRNA Inhibitoren evaluiert werden. Für Analysen der Relevanz von Nrf2 und NF- κ B werden Gewebeproben von hTNF α transgenen Mäusen nach Röntgen- und Radon-Bestrahlung gesammelt (AP4).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum sind folgende Arbeiten publiziert:

Gaipl U.S., 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.

Wunderlich R., Ernst A., Rödel F., Fietkau R., Ott O., Lauber K., Frey B., Gaipl U.: Low and moderate dose of ionising radiation up to 2Gy 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. epub.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schloss- platz 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014
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

Der für die RAD-ON01-Studie entwickelte Assay zur Immunphänotypisierung (IPT), welcher auf der Mehrfarben-Durchflusszytometrie basiert, wurde weiterentwickelt. Zum einen wurde dieser für das Immunmonitoring von Tumorpatienten, welche höheren Strahlendosen ausgesetzt sind, angepasst. Die Ergebnisse der IPT von Tumorpatienten sollen zur Gegenüberstellung mit den durch Niedrig-Dosis-Bestrahlung erzeugten Modulationen des Immunsystems genutzt werden. Auf der anderen Seite wurde, auf Basis des erworbenen Kenntnisstandes, ein komprimierter IPT-Assay entwickelt. Dieser erlaubt es über 26 verschiedene Immunzell-Subtypen und deren universelle Aktivierungsmarker zu analysieren; es werden hierzu aber nur noch 200 µl Vollblut (statt bisher 2,5 ml) benötigt. Sowohl die Aufarbeitungszeiten für das Biomaterial als auch die Messzeiten konnten somit enorm reduziert werden. Dies ist wichtig, um die zukünftig geplanten Studien mit hoher Patientenzahl und Messzeitpunkten adäquat durchführen zu können. Die bereits im letzten Bericht erwähnte Messung und Auswertung von 25 Zytokinen in den Patientenseren aus der RAD-ON01-Studie erfolgte auf Basis des neuen MagPix-Systems. Die Ergebnisse waren aber aufgrund technischer Limitationen nicht eindeutig und nur bedingt reproduzierbar. Deswegen werden aktuell ELISA-Analysen durchgeführt. Auch werden die Methode des IPT-Assays und die Daten aus der RAD-ON01-Studie zur Publikation zusammengeschrieben.

Im präklinischen hTNF- α tg Maus-Modell zeigte eine Verdopplung der Strahlendosis (2x 0.5 Gy) in allen drei Behandlungsgruppen zwar signifikant verbesserte Ergebnisse hinsichtlich der Griffstärke und somit im Schmerzempfinden der Tiere, jedoch ergaben die nun abgeschlossenen histomorphologischen Auswertungen der Hinterpfoten keine Verbesserung der Entzündungsareale und des Knorpelverlustes. Dies steht im Gegensatz zu der beobachteten signifikanten histomorphologischen Verbesserungen in den Pfoten mit 1x 0.5 Gy behandelten Tieren. *Ex vivo* Experimenten sollen nun die mechanistischen Grundlagen dieser Unterschiede aufdecken. Ein erster Versuch mit einem weiteren entzündlichen Tiermodell (KBxN-Serum induziertes Modell) wurde abgeschlossen. Da der durch Injektion von KBxN-Serum induzierte Entzündungseffekt zeitlich beschränkter als erwartet war, ist eine weitere Optimierung des bisherigen Versuch-Settings nötig. Weitere Untersuchungen an Osteoklastenkulturen zeigten, dass Osteoklasten, welche aus hTNF- α tg Tieren gewonnen wurden, bereits ab einer Strahlendosis von 0.1 Gy signifikant schlechter differenzieren. Die Untersuchungen hinsichtlich der Genexpression und Aktivität laufen noch. Neben den Versuchen mit murinen *Fibroblast-like synoviocytes* (FLS) wurden nun auch Versuche mit humanen FLS aus Patienten mit RA bzw. Osteoarthritis (OA, als nicht-entzündliche Kontrolle) durchgeführt. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass humane OA-FLS durch eine Bestrahlung mit niedrig dosierten Röntgenstrahlen stark in ihrer Apoptoserate und ihrem Wachstum beeinflusst werden können. Erste Versuche hinsichtlich der Modulation von Osteoblasten durch Röntgenstrahlung laufen. Es besteht weiterhin eine enge Kooperation zu Arbeitsgruppen an der GSI, um die geplanten *in vivo* Versuche in der Radonkammer koordiniert vorzubereiten.

4. Geplante Weiterarbeiten

Für die beiden geplanten IPT-Folgestudien (Placebo-kontrollierte Radonstudie und LDRT-Studie) sollen die Planungen abgeschlossen und die Ethikanträge hierfür verfasst werden. Außerdem sollen die Zytokinanalysen sowie die Bestimmung der Transkriptions- und Telomerase-Aktivität aus den Proben der RAD-ON01-Studie fortgesetzt werden. Überdies soll mit dem komprimierten IPT-Assay Blut von Normal Spendern häufig über einen langen Zeitraum untersucht werden. Dadurch können jahreszeitliche Schwankungen herausgefiltert werden. Um die entzündlichen Vorgänge und deren Modulation durch niedrige Strahlendosen in den Gelenken von hTNF- α tg Mäusen noch besser erklären zu können, soll ein weiterer *in vivo* Versuch durchgeführt werden. Die Tiere werden dann gestaffelt im zeitlichen Verlauf analysiert. Des Weiteren soll aus den Gelenken der bestrahlten Tiere RNA isoliert werden, um die molekularen Vorgänge besser verfolgen zu können. Die aus den bisherigen Versuchen mit Osteoklasten, Osteoblasten und FLS (human und murin) erhaltenen Daten sollen weiter analysiert und die Versuche komplettiert werden. Die geplanten Versuche in der Radonkammer werden durchgeführt werden, sobald der Tierversuchsantrag genehmigt vorliegt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Ott O.J., Jeremias C., Gaipf U.S., Frey B., Schmidt M., Fietkau R.: Radiotherapy for benign calcaneodynia: long-term results of the Erlangen Dose Optimization (EDO) trial. *Strahlenther Onkol.* 2014 Jul; 190(7):671-5.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: 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. Diese veränderte Expression der Proteine nach Bestrahlung wird durch Proteomanalyse erkannt und sollte sich in unterschiedlich strahlenempfindlichen Zellen unterscheiden. Dazu sollen sowohl bereits charakterisierte humane Zellen (02NUK007C), als auch an Kandidatengen regulierte Zelllinien und strahlenresistente Zelllinien der Verbundpartner eingesetzt werden.

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: Die Analyse der Proteom-Profile mit Hilfe der 2D-DIGE-Analyse in 2 strahlenüberempfindlichen und eine normalen lymphoblastoiden Zelllinie (4 biologische Replikate) nach Bestrahlung mit 1 Gy und 10 Gy (¹³⁷Cs-Quelle) 24 h post-Bestrahlung ist abgeschlossen. Die Ergebnisse zeigten, dass der interindividuelle Unterschied, im Vergleich zur intraindividuellen Varianz auf Proteinebene sehr hoch ist (Gürtler et al. 2014). Die Netzwerkanalyse (Reactome) zur Generierung neuer Kandidatenproteine ist abgeschlossen. Basierend auf dieser Analyse zeigte sich, dass wahrscheinlich die Sumoylierung (Proteindegradation und Proteindestabilisierung) von Proteinen sowie Cytochrom P450 Enzyme (oxidativer Stress und ROS Detoxifizierung) die Strahlensensitivität im Normalgewebe modulieren. Im Moment erfolgt eine Literaturrecherche, um Kandidatenproteine bezüglich der Endpunkte Sumoylierung und Cytochrom P450 zu finden, die mit Hilfe von Westernblotanalysen in den Proteinextrakten gemessen werden sollen, um die o. g. Hypothesen zu belegen.
Die strahlenresistenten HNSCC-Zellen müssen noch von AP2 generiert werden.
- AP1.2: Das Testen der bisherigen Kandidatenproteine (ATM, CCT6A, CDC6, CLIC1, EEF2, Fibrinogen γ , hnRNP H/L, HSP70, HSP90, LMNA, MCM2, MCM3, MCM7, MSH 2, MYCBP2, NBS1, P53, Proteasom 20S α 3, PSME1, RAD50, Reptin, RUVB1/2, TIP49B, RNF20, Septin I, SerpinB9, SIRT1, SIRT2, SND1, SOD2, Thrombospondin 1, TIP49A, VAT1, VCL, VCP, Vdac und VIM) im Westernblot in den lymphoblastoiden Zelllinien 4060 und 20037 ist bis Ende Januar 2015 abgeschlossen. Das Testen der Kandidaten in der Linie ATM(-) wird bis Ende Februar 2015 abgeschlossen sein. Die Expression von MCM7 und P53 wird ebenfalls bis Ende Februar 2015 in 4 unterschiedlichen (2 weiblichen, 2 männlichen) primären Lymphozyten getestet. Die Generierung der Proteinextrakte ist bereits abgeschlossen. Die Auswertung und Berechnung der Westernblot Daten ist bis Mitte Februar abgeschlossen. Die Daten der Proteomanalyse sollen im Anschluss zusammengeführt und publiziert werden.
- AP1.3: Die Zelllinien mit verminderter oder verstärkter Genexpression werden von AP2 generiert und die erste Linie demnächst übergeben.

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

Das zweite Jahrestreffen 2014 des ZiSS-Verbundes fand am 20./21. Januar 2015 beim Verbundpartner Abteilung für Zytogenetik am HMGU München statt. Teilnehmer für AP1 waren Sabine Hornhardt, Anne Gürtler und Monika Hauptmann.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm. Zuzüglich zum Arbeitsprogramm wurden Mauslungen von AP5 an AP1 übergeben, um Proteomprofile mit Hilfe der 2D-DIGE Methode zu erstellen. Die Proteomprofile sollen bis Ende Mai 2015 fertig sein.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Gürtler A., Hauptmann M., Pautz S., Kulka U., Friedl A.A., Lehr S., Hornhardt S., Gomolka M.: The inter-individual variability outperforms the intra-individual variability of differentially expressed proteins prior and post irradiation in lymphoblastoid cell lines". Arch Physiol Biochem. 2014 Dec;120(5):198-207. doi: 10.3109/13813455.2014.953548. Epub 2014 Sep 1

A. Guertler, A. Michna, M. Hauptmann, K. Unger, H.Zitzelsberger, U. Kulka, M. Gomolka, S. Hornhardt: An "-omics" approach to identify molecular targets and signaling networks associated with radiosensitivity. Poster GBS-Tagung 2014 in Tübingen

S. Hornhardt: Projektpräsentation bei der KVSF-Tagung im Rahmen der GBS-Tagung in Tübingen 2014

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 und 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, inwieweit zielgerichtete strahlensensibilisierende und -protektive Substanzen („small molecules“) diese Signalwege beeinflussen. Ziel ist, die molekularen Netzwerke, welche die Strahlensensitivität modulieren und die Wirkung von pharmakologischen Substanzen auf diese Netzwerke aufzuklären.

Das Verbundprojekt besteht aus 5 Projektpartnern: Bundesamt für Strahlenschutz, AG-SG1.1, Koordination und AP1 (Dr. S. Hornhardt, Dr. M. Gomolka), Helmholtz-Zentrum München, Abteilung für Strahlenzytogenetik, AP2 (Prof. Dr. H. Zitzelsberger, Dr. J. Heß), 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).

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:

- Von den aus primären Zelllinien des Kopf-Hals-Bereichs generierten 39 Subklonen (Tumor- und Normalgewebe), wurden acht Klone, die Unterschiede in der endogenen FancA-Genexpression aufweisen, für weitere Analysen ausgewählt. Die Zelllinien sollen auf einen Zusammenhang zwischen FancA-Expressionslevel und Strahlenresistenz untersucht werden.
- Es wurden HNSCC-Zellen (tumorigen in der Maus) mit regulierbarer Expression des FancA Gens generiert. Die Induzierbarkeit der Genexpression nach Doxycyclin-Zugabe konnte gezeigt und stabile Subklone generiert werden. Die Zellen wurden an AP5 übergeben. Derzeit werden die Kinetik der FancA-Induzierbarkeit analysiert und weitere Zellen mit induzierbarer MCM7-Expression generiert.
- Aus den globalen Transkriptomdaten der FancA-überexprimierenden- und Vektorkontroll-Zellen nach drei Zeitpunkten nach Bestrahlung (4 Gy/sham) wurden differentiell exprimierte Gene identifiziert. Es konnten sowohl Signalwege identifiziert werden, die in der Strahlenantwort beider Zelllinien, als auch Zelllinienspezifisch involviert sind. Derzeit werden qRT-PCR Validierungsexperimente durchgeführt.
- Derzeit läuft die Charakterisierung strahlenresistenter HNSCC-Zellklone von AP6.

AP3:

- Integration der genomischen Kopienzahlveränderungen mit Transkriptomdaten ergab nur wenige Überschneidungen der Genkopienzahl mit entsprechenden Genexpressionsänderungen was vor allem mit der geringen Zahl der Genkopienzahlveränderungen zu erklären ist.
- Die genregulatorischen Netzwerke (GRNs) der strahlenhypersensitiven (4060-200) und normalsensitiven (20037-200) LUCY Zelllinien wurden mit veränderten „priors“ neu berechnet, wobei nicht nur Gene berücksichtigt wurden, welche über das spline-regression Modell differentielle Expression über die Zeit gezeigt haben. Darüber hinaus wurden auch Gene in die Analyse mit einbezogen, die zwar einen ähnlichen Kurvenverlauf in bestrahlten Zellen und Kontrollzellen zeigten, aber über den Zeitverlauf unterschiedliche Expressionsniveaus zeigten. Dadurch hat sich die Zusammensetzung der Netzwerke zwar leicht verändert, deren biologische Sinnhaftigkeit sich aber verbessert.
- „Wichtige“ Netzwerkknoten des GRNs, welche ein hohes Maß an Zentralität zeigten und darüber hinaus als wichtige Schaltstellen in strahlenassoziierten Signalwegen bekannt sind, wurden hinsichtlich ihrer Expression auf Proteinebene mithilfe Westernblot Analysen (in Zusammenarbeit mit AP1, BfS) validiert, wobei eine hohe Übereinstimmung zwischen Gen- und Proteinexpression festgestellt wurde. Im nächsten Schritt werden die 2-DIGE Proteomprofile aus AP1 mit den Genexpressionsprofilen der beiden LUCY Zelllinien integriert.
- Es wurden globale miRNA Profile von allen Proben der LUCY Zelllinien generiert, welche im Moment für die primäre Analyse und Integration mit den Transkriptomdaten vorbereitet werden.

Das zweite Jahrestreffen 2014 des ZiSS-Verbundes fand am 20./21.01.2015 beim Verbundpartner Abteilung Strahlenzytogenetik am HMGU München statt. Teilnehmer für A2/3 waren Agata Michna, Julia Heß, Igor Gimenez-Aznar, Horst Zitzelsberger und Kristian Unger.

4. Geplante Weiterarbeiten

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

AP3: Die Identifizierung/Validierung von therapeutischen Zielmolekülen steht im Vordergrund. Weitere nächste Schritte sind die Berechnung der LUCY miRNA Profile und deren Integration mit den Transkriptomdaten und die integrative Omics Charakterisierung von resistenten und überempfindlichen HNSCC Zelllinien.

5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Michna, A. Gürtler, I. Gimenez Aznar, M., H. Zitzelsberger, K. Unger. Identification of molecular targets and signaling networks that influence hypersensitivity and resistance to ionizing radiation: (Poster); EACR Jahrestagung 2014, Juli 2014, München

I. Igor Gimenez-Aznar, Agata Michna, Verena Jendrossek, Verena Zangen, Kristian Unger, Horst Zitzelsberger, Kirsten Lauber, Julia Heß: FANCA overexpression confers radioresistance to cells of head and neck squamous cell carcinoma; (Poster)

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Ziel-

strukturen 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), befand sich seit Februar 2014 im Krankenstand und hat sich entschlossen, den Vertrag aus gesundheitlichen Gründen nicht zu verlängern. Das Projekt wurde also ab Februar 2014 nicht weiterbearbeitet und die Stelle ist seit Oktober 2014 nicht mehr besetzt. Zum Januar 2015 ist es uns gelungen, eine neue Postdoc Mitarbeiterin (Frau Dr. Ulrike Schötz) zu finden und einzuarbeiten. Wir schätzen die Verzögerung im Arbeitsprogramm auf etwa 10 Monate. Wir streben an, in 2015 eine(n) zweite(n) Postdoc Mitarbeiter(in) einzustellen, um die aufgetretene Projektverzögerung auszugleichen. Eine geeignete Kandidatin wurde bereits gefunden.

Sonstiges:

Das 1. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 20./21.01.2015 in München statt und wurde von AP2/3 (Prof. Zitzelsberger) ausgerichtet. Daran haben für AP6 Kirsten Lauber und Ulrike Schötz 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

Vortrag beim Munich Cancer Retreat:

U. Schötz, M. Orth, L. Schüttrumpf, I. Gimenez-Aznar, A. Michna, L. Hieber, H. Braselmann, K. Unger, V. Zangen, Diana Klein, Verena Jendrossek, C. Belka, H. Zitzelsberger, J. Heß, K. Lauber: „FancA overexpression as prognostic marker of radioresistance in head and neck squamous cell carcinoma“.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: Aus den bisher getesteten 10 humanen HNSCC Zelllinien wurden insgesamt 7 als geeignete Kandidaten für die in vivo-Untersuchungen zur Radiosensitivitätsmodulation identifiziert. Für alle Zelllinien wurden Tumor-Wachstum und Strahlensensitivität bestimmt. Dabei korrelierte die in vivo gemessene Radiosensitivität überwiegend mit den Ergebnissen der in vitro Messungen. Da die transiente Überexpression eines postulierten Radioresistenz-Kandidatengens in einer tumorigenen HNSCC Zelllinie zu einer tendenziellen Steigerung der Strahlenresistenz dieser Zellen in vitro und in vivo führte, wurden von AP2 für die weiterführenden Experimente aller Arbeitspakete Zellen der gleichen Zelllinie mit regulierbarer Expression dieses potentiellen Radioresistenzfaktors generiert. In Vorversuchen konnte bereits die Induzierbarkeit des potentiellen Radioresistenzfaktors nach Doxycyclinbehandlung in vivo nachgewiesen werden. Mit stabilen Klonen soll zeitnah der Einfluss einer Induktion dieses potentiellen Radioresistenzfaktors auf die Strahlensensitivität in vivo untersucht werden. Darüber hinaus wurden vom Partner LMU erste in vitro auf Radioresistenz selektionierte HNSCC Zellen erhalten und auf ihr Wachstum und ihre Radiosensitivität in vivo getestet. Dabei erwiesen sich die beiden erhaltenen Zelllinien als nicht geeignet. Diese Untersuchungen sollen mit neuen, durch wiederholte Bestrahlung in ihrer Radiosensitivität veränderte HNSCC Zellklone fortgesetzt werden, die vom Partner LMU zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich wurden in vivo Experimente zur Analyse molekularer Determinanten der Normalgewebstoxizität durchgeführt.

Arbeiten des IFZ in AP6.3: Es wurde mit den in vivo Untersuchungen zur Radiosensitivitätsmodulation von HNSCC Xenografttumoren durch einen weiteren in vitro als radiosensibilisierend identifizierten small molecule Inhibitor (Substanz 2) begonnen. Dabei wird die Kombinationstherapie aus Bestrahlung und der wiederholten Gabe von Substanz 2 mit den Effekten der Einzeltherapien und einer Lösungsmittelkontrolle (LM) im Xenograftmodell verglichen. Bislang wurde in einer ausgewählten HNSCC Zelllinie in den folgenden 4 Therapiegruppen die Zeit bis zum Erreichen eines Tumolvolumens von 1000 mm³ untersucht: i) LM-behandelte Tiere, ii) Inhibitor-behandelte Tiere, iii) Tiere mit LM-Behandlung plus Bestrahlung, iv) Tiere mit Inhibitor-Behandlung plus Bestrahlung. Erste Analysen zeigen eine Radiosensibilisierung der HNSCC Tumoren durch Substanz 2 in vivo. Diese Untersuchungen werden derzeit in einer größeren Anzahl von Mäusen fortgesetzt, um das Ergebnis statistisch abzusichern. Darüber hinaus soll zeitnah eine zweite Zelllinie in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Derzeit erfolgt eine histologische Untersuchung der isolierten Gewebe.

Das 2. Halbjahres-Meeting des Verbundes fand am 20.-21. Januar 2015 im HMU in München statt. Für das AP5 hat Verena Jendrossek teilgenommen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit folgt dem Arbeitsprogramm. Zusätzlich werden in vivo Experimente zur Gewinnung von Mauslungen für Proteom- und Transkriptomanalysen in AP1 und AP3 generiert.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Publizierte Kongressbeiträge DEGRO, EACR

Heß J., Klein D., Jendrossek V., Lauber K.: Strahlenther Onkol 190, Suppl.1: 29 (2014) (Poster)

Klein D., Jendrossek V.: Strahlenther Onkol 190, Supplement 1: 15 (2014) (Vortrag)

Niazman M., Jendrossek V.: Strahlenther Onkol 190, Supplement 1: 59 (2014) (Poster)

Klein D., Jendrossek V.: Eur J Cancer, 50, Suppl. 5, p221: A902 (2014) (Poster)

Wirsdörfer F., Jendrossek V.: Eur J Cancer, 50, Suppl.5, p223: A913 (2014) (Poster)

Verhelst V., Klein D., Jendrossek V.: Eur J Cancer, 50, Suppl. 5, p224: A916 (2014) (Poster)

Gimenez-Aznar I., Jendrossek V., Heß J.: Eur J Cancer, 50, Suppl. 5, p229: A933 (2014) (Poster)

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Die im vorangegangenen Halbjahr generierten Perturbationsdaten wurden mit Hilfe der MRA-Analysepipeline modelliert und die Parameter intrazellulärer Signalwege abgeleitet. Derzeit werden diese Modelle weiter analysiert und die systematischen Abweichungen von Modell und Experiment evaluiert. Bei der statistischen Analyse der Daten stellte sich heraus, dass es bei den Messungen zum Teil zu einem Übertrag von Messanalyten von einer Probe auf benachbarte kam. Hier wurden neue Protokolle zur Probenaufbereitung und Waschen der Luminex-Station entwickelt, die für zukünftige Messungen angewendet werden und auch den Projektpartnern zur Verfügung stehen. Daher werden zukünftige Messungen noch genauer durchgeführt werden können. Es wurden darüberhinaus Messungen für Zeitreihen nach Bestrahlungen für die LUCY-Zelllinien durchgeführt. Hier ergab sich, dass zwar in vielen Signalwegen Veränderungen zu beobachten sind, diese jedoch genauso in den Kontrollzeitreihen zu erkennen sind, so dass diese Veränderungen nicht spezifisch für die Bestrahlung sind. Eine Ausnahme bildet hier p53, bei dem eine klar strahlungsabhängige Aktivierung beobachtbar ist.

4. Geplante Weiterarbeiten

Aufgrund der technischen Probleme der Proteomics Platform werden die Messungen mit dem neu entwickelten Protokoll in Zusammenarbeit mit HZM wiederholt und auf weitere Zelllinien angewendet. Hier sollen unter anderem die FANCA induzierbaren Zelllinien untersucht werden, sobald diese vorliegen. Modellsimulationen werden durchgeführt, um mögliche kombinatorische Behandlungen vorherzusagen, die die Strahlensensitivität beeinflussen (AP4.4). Für die Genexpressionsdaten wird die Methode Transfind bereitgestellt, um Transkriptionsnetzwerke zusammen mit dem HZM zu rekonstruieren (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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten zur entodermalen Differenzierung humaner embryonaler Stammzellen der Linie WA09 (H9) (nach K. A. D'Amour et al., *Nature Biotechnology* 11, 2006, 1392-1401) weitergeführt. Insbesondere die RNA-Expressionsanalyse Pluripotenz-assoziiierter Marker vor und nach Exposition mit Röntgenstrahlen lieferte Hinweise auf die schon im letzten Bericht erwähnte Hemmung der Differenzierung in definitives Entoderm (DE), aus dem sich Organe wie die Lunge, die Leber und die Bauchspeicheldrüse bilden. So ist vor allem die Abnahme der Aktivin-Rezeptoren 1B, 2A und 2B hervorzuheben. Da Aktivin in niedrigen Konzentrationen essentiell für die Erhaltung der Pluripotenz und Plastizität von embryonalen Stammzellen ist, während es in hohen Konzentrationen die Differenzierung in DE bedingt, wirkt sich eine Hemmung der korrespondierenden Rezeptoren auf beide Prozesse negativ aus.

Im Rahmen einer Masterarbeit (siehe Abschnitt 5) wurde ein Protokoll zur Differenzierung von murinen embryonalen Stammzellen in extraembryonales Entoderm getestet. Extraembryonales Entoderm (ExE) ist für die nachfolgende Bildung des Myokards unabdingbar. Eine strahlenbedingte Hemmung der Differenzierung in ExE hätte daher auch negative Auswirkungen auf die Organogenese des Herzens. Mit Hilfe der murinen embryonalen Stammzelllinie D3 konnte eine erfolgreiche Differenzierung in ExE anhand einer gesteigerten Expression von GATA6, Sox7 und Sox17 gezeigt werden. Eine dauerhafte Etablierung von ExE-Zellen, die als Model für Bestrahlungsversuche dienen sollten, konnte dagegen nicht erreicht werden. Auf eine Übertragung des Protokolls auf humane embryonale Stammzellen wird daher derzeit verzichtet.

Fortgeführt wurde die Validierung der kardialen Differenzierung von humanen embryonalen Stammzellen (hES) unter Verwendung eines Protokolls nach X. Lian et al. (*Nature Protocols* 8, 2013, 162-175). Hier konnte gezeigt werden, dass die *in vitro* Differenzierung auch auf der mikroRNA Ebene die Entwicklung von Kardiomyozyten *in vivo* präzise nachahmt. Somit ermöglicht das etablierte Protokoll auch die genaue Untersuchung strahlenbedingter Auswirkungen auf die Feinregulierung kardialer Differenzierungsprozesse. Ein erster Versuch der kardialen Differenzierung von hES nach Exposition mit Röntgenstrahlen resultierte in einer Beschleunigung der Bildung von Kardiomyozyten. Ob dies mit einer möglichen Prädisposition der hES in die mesodermale Linie erklärbar ist, wird gegenwärtig untersucht.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Fokus weiterer Planungen steht die Fortführung der Versuche zum Einfluss von Röntgenstrahlen auf die kardiale Differenzierung. Hier ist eine Validierung des in 3. genannten Versuchs und die Analyse der Auswirkungen einer Bestrahlung zu verschiedenen Zeitpunkten der Differenzierung notwendig. Weitergeführt wird auch die Etablierung der hES Linien H9-hTnnTZ-pGZ-D2, die die direkte Detektion Troponin-positiver Kardiomyozyten in der Zellkultur mittels GFP-Expression erlaubt und der Linien HUES-2 und 3, die besonders für die kardiale Differenzierung geeignet sind.

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

Abschließende Untersuchungen von Effektoren des Aktivin A-Signalwegs vor und nach Röntgenbestrahlung von hES dienen einer zeitnahen Bewertung und Veröffentlichung der Ergebnisse, die bei der entodermalen Differenzierung dieser Zellen erzielt wurden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

G. Ciliberti: Extraembryonic endoderm differentiation of mouse embryonic stem cells for a future analysis of ionizing radiation effects on cardiac morphogenesis, Master thesis (Universität Federico II, Neapel; Technische Universität Darmstadt, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt), 2014.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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, um zu vergleichen, ob in den Auswirkungen der beiden Strahlungsarten Unterschiede bestehen. Von Mausstudien und Versuchen mit Zelllinien ist bekannt, dass geringe Bestrahlung bereits zu Veränderungen in Genexpressionsmustern in Nervenzellen führen. Es soll nun anhand von hES-Zellen und abgeleiteten *in vitro* Nervensystem-Entwicklungsmodellen genau untersucht werden, inwieweit sich Bestrahlung auf die Entwicklung des menschlichen Gehirns auswirkt und welche Effekte man auf die verschiedenen Entwicklungsstadien (Entstehung der ZNS Vorläuferzellen, NEPs, Entstehung von neuronalen Vorläuferzellen, Entstehung von Neuronenvorläuferzellen und deren Reifung 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 neuronaler Zellen nach Strahleneinwirkung (Hochschule Aschaffenburg, Prof. C. Thielemann).

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Seit dem letzten Bericht sind geplante Arbeiten an System 2 (Generierung von Neuralleistenzellen) vorangeschritten, das System ist im Labor etabliert und es bedarf jetzt einer näheren Charakterisierung der somit generierten Neuralleistenzellen.

Die Logistik bezüglich der Bestrahlungen an der Universität Konstanz ist jetzt geklärt und es haben bereits mehrere (5) Strahlenversuche stattgefunden, um eine Dosiskurve zu erstellen. Anhand dieser Dosiskurve wird auch entschieden, mit welcher Dosis die chronische Bestrahlung später stattfinden soll. Auch sind verschiedene Bestrahlungszeitpunkte getestet worden, mit anschließend unterschiedlichen Inkubationsperioden. Diese Versuche befinden sich im Auswertungsstadium.

Die geplanten chronischen Bestrahlungsversuche haben sich allerdings aus technischen Problemen an der Anlage in Konstanz verzögert und werden erst ab Mitte ersten Quartals 2015 stattfinden können.

Des Weiteren sind 3 Abschlussarbeiten (2 Bachelor- und 1 Masterarbeit) begonnen worden, die jeweils kleine Unterprojekte bearbeiten.

4. Geplante Weiterarbeiten

Es werden weitere Röntgen-Experimente in Konstanz stattfinden, da die Logistik hinter solchen Versuchen routinemäßige Experimente zulässt. Es kann also abgeklärt werden, welchen Einfluss welche Dosis zu welchem Zeitpunkt der in vitro Entwicklung welche Effekte hat. Bei unserem letzten Verbundtreffen im Herbst in Sigmaringen ist eine wichtige Zielsetzung gewesen, dass weitere Neurosphären nach Aschaffenburg transportiert werden (auch dies hat sich als machbar erwiesen), sobald die Kulturen wieder genügend qualitativ laufen, um ein erfolgreiches Auswandern von Neuronen auf MEAs zu garantieren. Dies hatte in Konstanz gute Ergebnisse geliefert und wird nun aktiv weiterverfolgt werden, um Neuronen für Aschaffenburg zu generieren.

5. Berichte, Veröffentlichungen

<http://www.bio-pro.de/medtech/biopharma/aktuelles/index.html?lang=de&artikelid=/artikel/10214/index.html>
http://www.schwaebische.de/region_artikel,-Sigmaringer-Professorin-forscht-an-Stammzellen-_arid,10157098_toid,623.html
<http://www.ardmediathek.de/radio/Aktuelles-Thema-SWR4-Radio-T%C3%BCbingen/Embryonale-Stammzellenforschung-an-der-H/SWR4/Audio-Podcast?documentId=25525922&bcastId=8007430>
<http://www.zak.de/artikel/details/253736/Sigmaringen-Mit-Stammzellen-die-Nase-vorn>
<http://www.suedkurier.de/nachrichten/baden-wuerttemberg/themensk/Sigmaringer-Wissenschaftlerin-Suzanne-Kadereit-baut-auf-Stammzellenforschung;art417921,7599657>

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 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-Reparatur-mechanismen 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

Im Berichtszeitraum wurden die bereits im ersten Halbjahr 2014 begonnenen Versuche mit humanen iPS Neuronen fortgeführt. Dabei handelt es sich um aus iPS Zellen (induced pluripotent stem cells) differenzierte Neuronen (im Folgenden *iPS Neuronen* genannt). Nach erfolgreicher Etablierung eines Protokolls, mit dem die Zellen auf den MEA Chips kultiviert und elektrophysiologisch abgeleitet werden können, wurden die iPS Neuronen im Rahmen der letzten Schwerionenstrahlzeit an der GSI einer Exposition mit Kohlenstoff-Ionen ausgesetzt. Die Bestrahlung erfolgte nach vier Tagen in Kultur. Die hierbei verwendeten Strahlendosen betragen 1 Gy und 7 Gy (LET: 75 keV/μm, SOBP: 20 mm). Die Auswertung der Daten zeigte, dass die Funktionalität des neuronalen Netzwerks eine hohe Robustheit gegenüber Kohlenstoff-Ionen aufweist und durch die applizierte Strahlendosis von 1 Gy nicht signifikant beeinflusst wurde. Diese Ergebnisse zeigen Parallelen zu den Daten, die bei der Röntgenbestrahlung kortikaler Neurone aus der Ratte generiert wurden [M. Mayer et al., *GSI Report*, 2014-1, 218]. Die Analyse der Proben, die einer Strahlendosis von 7 Gy ausgesetzt wurden, ergab, dass die Exposition mit Kohlenstoff-Ionen eine Reduktion der Spikeanzahl zufolge hatte. Diese Verringerung der elektrischen Signalrate konnte ab dem zweiten Tag nach der Bestrahlung beobachtet werden. Eine mögliche Ursache dafür könnte eine erhöhte Anzahl strahleninduzierter Apoptosen innerhalb der ersten Tage nach Bestrahlung sein. Eine solche Anhäufung apoptotischer Zellen konnte bereits von mehreren anderen Arbeitsgruppen belegt werden. Sano et al. befassten sich beispielsweise mit der Auswirkung ionisierender Strahlung auf die weiße Substanz des Gehirns 1-2 Wochen alter Ratten. Auch hier konnte ein hohes Aufkommen strahleninduzierter Apoptosen, sechs Stunden nach einer Bestrahlung mit 15 Gy, beobachtet werden [K. Sano et al., *Neurol Med Chir* 40, 2000, 495-500]. Borges konnte 2004 nachweisen, dass es in den Retinae neonataler Mäuse, sechs und 24 Stunden nach einer Bestrahlung mit 2 Gy, zu einer hohen Anzahl apoptotischer Zellen kam [H.L. Borges et al., *Cell Death Differ.* 11(5), 2004, 494-502].

In einem nächsten Schritt wurden die iPS Neuronen einer Exposition mit Röntgenstrahlung ausgesetzt. Die hierbei verwendeten Strahlendosen wurden äquivalent zu denjenigen gewählt, die bei der Schwerionenbestrahlung eingesetzt wurden. Demnach betragen sie 1 Gy, 7 Gy und zusätzlich 21 Gy (250 kV, 16 mA). In den Vorversuchen, in denen kortikale Neurone aus der Ratte einer Exposition mit Röntgenstrahlung ausgesetzt wurden, zeigte sich, dass Strahlendosen von 1 Gy oder 2 Gy keinen signifikanten Einfluss auf das elektrophysiologische Verhalten des Netzwerks zeigen. Um zu überprüfen, ob das auch bei höheren Strahlendosen der Fall ist, wurden nun auch Dosen in Höhe von bis zu 21 Gy eingesetzt. Die Auswertung des Versuchs liegt noch nicht vor.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Fokus weiterer Planungen steht die Fortführung der Versuche zum Einfluss von Röntgenstrahlen auf die Elektrophysiologie von iPS Neuronen. Vor dem Hintergrund der vorliegenden Daten soll vorrangig der Einfluss auf die abgeleitete Spikezahl reproduziert werden. Darüber hinaus werden aber auch andere Netzwerk-Parameter wie Burst-Events und Netzwerk-Synchronizität analysiert, die Aussagen über die Kommunikation innerhalb des Zellverbands geben.

Zunehmend sollen auch zelluläre Endpunkte mit einbezogen werden. So soll als Methode zum Nachweis von strahleninduzierten Apoptosen der *TUNEL* Assay angewendet werden. Die Synapsendichte in Abhängigkeit vom Entwicklungsstatus des Netzwerks wird ein weiterer Endpunkt sein, der ergänzend betrachtet werden soll. Eine zeitnahe Bewertung und Veröffentlichung der Ergebnisse ist geplant.

Von großer Wichtigkeit für das Projekt sind die geplanten Versuche mit *Neurospheres*, die von unserem Projektpartner aus Sigmaringen zur Verfügung gestellt werden. Hier ist eine Validierung der Auswirkungen einer Bestrahlung zu verschiedenen Zeitpunkten der Differenzierung von besonderem Interesse. Nach erfolgreicher Optimierung des Protokolls sollen zunächst Positivkontrollen mit Substanzen wie Bicucullin durchgeführt werden [A. W. Daus, P. G. Layer, C. Thielemann, 2012. *Sensors and Actuators B*, 165: 53– 58]. Schließlich erfolgt die elektrophysiologische Charakterisierung der *Neurospheres*.

Des Weiteren ist geplant Kardiomyozyten, die von der GSI aus humanen embryonalen Stammzellen der Linie WA09 (H9) differenziert werden, elektrophysiologisch zu charakterisieren. Dies beinhaltet Parameter wie Schlagrate, Signalausbreitungsgeschwindigkeit und QT Intervall. Zu diesem Zweck muss zunächst ein Protokoll für die Aussaat auf dem MEA Chip etabliert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Mayer M., Ritter S. and Thielemann C.: Electrophysiological Effects of Ionizing Radiation on the Network Development of Neurons in vitro, GBS 2014, Tübingen.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 wird ein Herzmodell mit höherer als der bisherigen Auflösung mittels eines von der TU München bereitgestellten CT-Datensatzes segmentiert. Dies geschieht mit einer halbautomatischen Analyse basierend auf einem neuartigen Ansatz, der die Darstellung der Organe mithilfe von Quellpunkten, umfasst. Die einzelnen Quellpunkte verfügen dabei über ein $1/r$ Potential und ihre gemeinsame Äquipotentiallinie bildet die Außenkontur des Organs und wird mit den Bildkanten abgeglichen. Für die Bearbeitung des Herz-CT-Datensatzes mussten die neuen Methoden für die hohe Auflösung des Datensatzes optimiert und angepasst werden. Es wurde eine grafische Oberfläche für die Benutzerinteraktion generiert. Die Außenkontur des Herzens wurde segmentiert sowie die Aorta. Es gilt jetzt noch die Vorhöfe und Herzkammern explizit zu segmentieren. Wie im letzten Zwischenbericht für das AP3 erläutert, wurden in diesem Arbeitspaket nun mehrere von der TUM zur Verfügung gestellte Patienten-Datensätze zur Etablierung und Validierung der Methodik einer patientenspezifischen Dosimetrie herangezogen. Die Auswertung konzentrierte sich dabei vor allem auf die Herausarbeitung der individuellen Unterschiede in den resultierenden Organdosen durch Berücksichtigung der individuellen Biokinetik der Radiopharmaka. Dabei wurde zudem der Aspekt berücksichtigt, welche Unterschiede sich ergeben, wenn im biokinetischen Modell die Organe mit und ohne Blut betrachtet werden. Mittlerweile wurden die Arbeiten hinsichtlich der beiden Radiopharmaka BAY85-8050 und BAY94-9392 abgeschlossen und die Ergebnisse zu einem Manuskript für eine geplante Veröffentlichung in einem Fachjournal zusammengefasst.

Das Arbeitspaket AP4 (Risikomodelle) hat ab Monat 7 angefangen, AP5 (Implementierung, Software) beginnt ab Monat 25, es wurden jedoch schon Vorarbeiten vorgenommen. Es wurden weitere Krebs-Risikomodelle für verschiedene Organe entwickelt, insbesondere deskriptive Modelle für Magen, Schilddrüse, Harnorgane und Verdauungstrakt ohne Magen und Darm, für die es separate Risikomodelle gibt. Die neuen Modelle basieren auf den aktuellen Inzidenzdaten der LSS (Follow-up 1958-1998). Die Zusammenarbeit mit den klinischen Partnern von AP2 wurde intensiviert. Es wurden von der Klinik erste Datensätze zur Verfügung gestellt, die die Verteilung der Organdosen (Dosis-Volumen-Histogramme, DVH) für eine Reihe von Patientinnen nach Brustkrebstherapie beinhalten. Zurzeit wird die Liste der Organe aus der Planungssoftware an die Organe der Risikomodelle angepasst. Die Dosisverteilungen in den Organen, die sich in der Nähe des Bestrahlungszentrums befinden, sind z. T. sehr inhomogen und reichen von mGy bis zu mehreren Gy. Diese inhomogene Dosisverteilung muss von den Risikomodellen berücksichtigt werden. In AP5 wurde angefangen, Krebsregister- und Bevölkerungsdaten vom ZfKD/RKI und vom Statistischen Bundesamt zu implementieren.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach der Fertigstellung des Herzmodells werden in der AMSD Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, welche zum Ziel haben, die Dosisverteilung aus der Bestrahlungsplanung zu verifizieren und auch Dosen in denjenigen Organen zu bestimmen, die außerhalb des Bereichs liegen, der von der Bestrahlungsplanung abgedeckt wird. Die im AP3 gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der individuellen Biokinetik der untersuchten Radiopharmaka sollen nun genutzt werden, um die resultierenden Organdosen für verschiedene Isotope abzuschätzen, die in der Herzbildgebung Verwendung finden. Dabei soll in einem ersten Schritt simuliert werden, wie sich die Organdosen ändern würden, wenn unter der Annahme einer konstant bleibenden Biokinetik das Radioisotop im oben genannten Radiopharmaka durch andere bei der Herzbildgebung eingesetzte Radioisotope ausgetauscht wäre.

Es sollen weitere Risikomodelle für gruppierte Organe entwickelt werden. Diese beinhalten die Geschlechtsorgane (ohne weibliche Brust), Hirn- und Zentrales Nervensystem und Leukämien auf Basis der LSS Daten. Die Zusammenarbeit mit AP2 und AP3 soll weiter fortgeführt werden. Die Schnittstellen über die Dosisverteilungen bzw. DVH's sollen definiert werden sowie weitere Daten von Patienten und verschiedenen Behandlungsverfahren eingebaut werden. Verfahren zur Abschätzung des Risikos von Organen mit stark inhomogener Dosisverteilung sollen evaluiert werden. Es sollen Inzidenzdaten für Krebs- und kardiovaskuläre Erkrankungen in Deutschland eingebaut werden. Gemeinsam mit den Partnern soll eine Gruppierung der kardiovaskulären Erkrankungen vorgenommen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Ein Manuskript zu Modellen für Brustkrebs wurde eingereicht.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Lebenszeitriskien 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: < 4 Gy (Umsetzung Helmholtz Zentrum, Institut für Strahlenschutz) und > 4 Gy für therapeutische Strahlenanwendungen (Umsetzung IMBEI, Mainz).

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1:

Mortalitäts-Follow up: Insgesamt 1.518 Patientinnen der PASSOS-Kohorte Mainz. Vitalstatus (zum Stichtag 31.12.2013): 1.128 lebend, 19 nicht recherchierbar, 371 verstorben. Gesundheitsamt Mainz: Anfrage zur Todesursache von insgesamt 116 in Mainz verstorbenen Patientinnen. Davon konnten 83 Todesursachen (anonymisierte Leichenschauheine) zur Verfügung gestellt. Aufgrund der nur 5-jährigen Aufbewahrungsfrist von Todesursachen ist eine zusätzliche Recherche zu Todesursachen über das Statistische Landesamt Rheinland-Pfalz erforderlich. Eine entsprechende Anfrage wurde gestellt.

Befragung zur kardialen Morbidität: Die Rücksendung des Fragebogens erfolgte von 53 % aller angeschriebenen (lebenden) Patientinnen. Insgesamt 193 Patientinnen (18 %) haben die Studienteilnahme abgelehnt. Keine Reaktion (Non-Responder) bei 29 % der Angeschriebenen.

Validierung der (Selbst-)Angaben zur kardialen Morbidität über niedergelassene Ärzte: erfolgreiche Pilotierung der Erhebungsformulare und Anschreiben.

Dosimetrie (Mainz/Ulm): Exakte Dosimetrie von 182 + 175 Patientinnen aus Mainz + Ulm für mehrere Herz-Strukturen (Ulm: 91-mal mehrere Strukturen, 84-mal nur Ganzherz). Prüfung der Datenqualität der zugehörigen klinischen Akten durch Vergleich mit Daten aus Radioonkologie. Zusammenführung der Akten mit Bestrahlungsdaten. Detaillierte Dosisanalyse nach aktueller SOP für mehrere Herzstrukturen und DVH-Metriken. Untersuchungen zur Genauigkeit der Retrospektiven Dosisanalyse. Explorative Vorhersagemodelle für die mittlere Herzdosis mit Quantifizierung des Vorhersagefehlers. Vorbereitung eines Manuskripts zur Dosimetrie.

AP4:

Auswertung der systematischen Literaturrecherche zu Risikomodellen für Herz-/Kreislaufereignisse nach Strahlentherapie (Exposition > 4 Gy): Ca. 1200 Treffer bei PubMed Recherche/Reference Tracking, davon 330 Abstracts relevant. Identifikation der ca. 50 relevanten Publikationen mit Aussage zur Dosis-Wirkungs-Beziehung. Extraktion der Angaben zu Dosimetrie und Risiko-Auswertung.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

- Mortalitäts Follow up: ab Januar 2015 Anfragen an Gesundheitsämter in Rheinland-Pfalz sowie bundesweit. Anfragen an weitere zuständige Statistische Landesämter, falls die Auskünfte der Gesundheitsämter unvollständig sind.
- Befragung zur kardialen Morbidität: Zusätzliche, über die Fragebogen-Erhebung hinausgehende telefonische Interviews sind entgegen ursprünglicher Planungen nicht mehr vorgesehen, da mittels Fragebogen alle relevanten Informationen erhoben werden konnten.
- Validierung der (Selbst-)Angaben zur kardialen Morbidität über niedergelassene Ärzte: Start des gesamten Arbeitspaketes im Januar 2015. Jeder Arzt erhält 10 € pro erfolgter Patienten-Auskunft. Über die Verwaltung in Mainz werden die Vergütungen von Auskunft gebenden Ärzten der Mainzer sowie der Ulmer Patientinnen abgewickelt. Etablierung eines (verwaltungskonformen) Verfahrens zur Vergütung von (geschätzt) 1200 Ärzten.
- Dosimetrie: Untersuchung unterschiedlicher Dosisberechnungsalgorithmen (AAA, CC, PB) und Bestrahlungsplanungssysteme sowie der inter- und intrafraktionellen Bewegungen und deren Auswirkungen auf die Dosisverteilung im Allgemeinen sowie auf die für die Studie relevanten Parameter. Messtechnische Untersuchungen zur Genauigkeit der im Rahmen von AP1 verwendeten Dosisberechnungsalgorithmen (Zusammenarbeit mit AP3 im Rahmen der AG Herzdosisanalyse). Exakte Dosimetrie und Herzdosisanalyse bei je 200 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 zu Strahlenexposition durch Strahlentherapie (Exposition > 4 Gy). Zusammenführung der publizierten Daten zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen in ein biologisch plausibles Gesamtmodell. Validierung mit Simulationen.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 PASSOS-Herzstudie ist eine retrospektive Kohortenstudie, die den Zusammenhang zwischen der Strahlentherapie und dem langfristigen Mortalitäts- und Morbiditätsrisiko durch kardiovaskuläre Herzerkrankungen unter Berücksichtigung individueller Risikofaktoren bei Brustkrebspatientinnen untersucht. In Ulm werden ausschließlich Patientinnen aus dem BRENDA Kollektiv eingeschlossen. Einschlusskriterien sind Patientinnen, die zwischen 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 in erster Linie die Anschreiben der Patientinnen und der Gesundheitsämter durchgeführt. Voraussetzung dafür war die Erhebung des Life Status. Aktuell sind die Anschreiben an die Patientinnen vollständig beendet, sowohl in Ulm als auch an den Netzwerkkliniken. Es sind also ca. 8000 Patientinnen angeschrieben worden. Die Rücklaufquote liegt aktuell trotz Erinnerungsschreiben an die Patientinnen bei knapp 50 % im Gesamtkollektiv der lebenden Patientinnen.

Auch die Anschreiben an die Gesundheitsämter sind erfolgt, um die Todesursache der verstorbenen Patientinnen zu erheben. Hier stehen aktuell nur noch 5 kleinere Netzwerkkliniken aus. Im Rahmen der Anschreiben hat sich das Problem ergeben, dass in einem Gesundheitsamt (Heidenheim) eine Gebühr erhoben wird, welche im Rahmen der Planung nicht antizipiert war. Bisher hat diese Gebühr nur ein Gesundheitsamt verlangt, so dass die endgültigen Kosten noch nicht abgesehen werden können. In Ulm und Neu-Ulm sind am meisten Anfragen zu beantworten, so dass geplant ist, dass Dokumentarinnen aus der Klinik heraus die Gesundheitsämter unterstützen bzw. die Anfragen dort selbstständig bearbeiten.

Trotz der datenschutzrechtlichen Problematik mit den Netzwerkkliniken befinden sich aktuell die epidemiologischen Abfragen im Zeitplan. Parallel werden die Anschreiben der Hausärzte vorbereitet sowie die Telefoninterviews der Patientinnen. Aktuell ist die Finanzierung der Hausarztanschreiben noch nicht abschließend geklärt, diese können jedoch zeitgerecht koordiniert werden.

Zur Nachdokumentation der Komorbiditäten, welche in der retrospektiven BRENDA Studie nur als ASA und NYHA klassifiziert wurden, wurde eine IT-Plattform erstellt, die es ermöglicht, den Charleson Score zu erheben. Beim Charleson Score handelt es sich um einen validierten Komorbiditätsscore, der letztendlich pro Patientin einen Zahlenwert ergibt. Aus diesen Beweggründen eignet sich der Charleson Score besonders für die Dokumentation der Komorbiditäten für das PASSOS Projekt. Aktuell sind hier 80 % der Fälle dokumentiert, wir rechnen mit einer Fertigstellung ca. März 2015.

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 des 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.

Bisher wurden für Ulm 562 Fälle randomisiert. Für 461 Patienten waren Daten im Rahmen der PASSOS-Vorgaben verwertbar. Klinische Informationen wurden den Fallakten entnommen und die Original-Bestrahlungspläne in das Cadplan Programm eingelesen. Cadplan-Daten werden mit Hilfe des Computerprogramms „Vodca-RT“ in das DICOM-Format umgewandelt, um sie mit der aktuellen Planungssoftware Eclipse auszuwerten. Die DVHs von 132 primär in Eclipse geplanten Fällen liegen dem Projektpartner in Mainz bereits vor. Für die überwiegend aus Cadplan importierten Fälle wird die kombinierte Dosimetrie der Photonen- und Elektronenfelder z. Z. bearbeitet.

Um exemplarisch eine Aussage zur Vergleichbarkeit der kardialen Belastung in BRENDA Netzwerkkliniken zu erhalten, wurden für zehn Testpatienten der Strahlentherapie Memmingen die Dosimetriedaten anhand der PASSOS Konturierungsvorlage (SOP) erfasst.

4. Geplante Weiterarbeiten

Der Rücklauf der Fragebögen muss bearbeitet werden, wobei hier bereits ein Großteil eingegangen ist. Der Rücklauf aus den Gesundheitsämtern ist langwieriger und wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

Aktuell in Vorbereitung sind die Telefoninterviews und die Anschreiben der Hausärzte. Diese hängen natürlich entscheidend von der Rücklaufquote ab. Zusätzlich müssen die lebenden Patientinnen im Rahmen der Anschreiben ihre schriftliche Erlaubnis erteilen, dass wir die Hausärzte kontaktieren dürfen. Diese Phase kann zeitgerecht im Frühjahr 2015 begonnen werden, sobald die Finanzierung mit den Kollegen in Mainz geklärt ist.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Herzkreislaufsystems 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

Im Folgenden werden die bisher abgearbeiteten Punkte aufgeführt und durch seit dem letzten Zwischenbericht getätigte Arbeiten ergänzt. Nähere Details zu den einzelnen Punkten sind entsprechend den Zwischenberichten 1-3 zu entnehmen:

- a) Aufbau Datenbank mit anonymisierten klinischen und dosimetrischen Daten: Die primäre Datenbank (Excel-Format) kann ins ASCII Format konvertiert und somit zum Datenaustausch mit den Projektpartnern entsprechend formatiert werden.
- b) Konturierung und dosimetrische Erfassung von Risikoorganen: Die Patientendatenbank enthält inzwischen 57 Patienten. Diese sind vollständig konturiert und bzgl. verschiedener in Passos vereinbarter Techniken dosimetrisch erfasst (3D-CRT fertig, IMRT teilweise fertig).
- c) Bewertung der Bestrahlungsplanungs-Techniken/Algorithmen: Da das Bestrahlungsplanungssystem statistische dosimetrische Daten leider nur per grafischer Oberfläche ausgibt und entsprechend keine automatisierte Extrahierungsmöglichkeit existiert, wurde an der Klinik für Strahlentherapie ein Programm geschrieben, welches die dosimetrischen Daten für die einzelnen Risikoorgane direkt aus den DICOM Daten berechnen kann. Somit ist es nun möglich, spezielle Dosis-Volumen-Beziehungen und Statistiken direkt per Skript (python) aus einer theoretisch unbegrenzten Patientenanzahl nachträglich zu extrahieren/berechnen und mit den Projektpartnern auszutauschen.
- d) Phantommessungen für Dosisabschätzung: -bisher keine neuen Ergebnisse.
- e) Dosisberechnung bei Brachytherapie: Hier gibt es weiterhin die auf dem vergangenen Projekttreffen besprochenen Probleme bei der Fusion der Katheter zwischen verschiedenen CT Datensätzen. Mit Hilfe des unter Punkt c) beschriebenen Tools arbeiten wir an einer Lösung.

Seit dem letzten Zwischenbericht konnten weitere Patienten bezüglich der Vereinbarungen in Passos konturiert, entsprechende Bestrahlungspläne erstellt sowie berechnet und in die Datenbank integriert werden. Erste Vereinbarungen bezüglich des Datenaustausches mit dem Helmholtz Zentrum München wurden getroffen und bisher aufgenommene Bestrahlungsdaten ausgetauscht.

Da beim vergangenen Projekttreffen in Rostock der Dosisbeitrag im Knochenmark diskutiert wurde, ist in den letzten Monaten auf Basis eines Ganzkörper CTs ein dreidimensionales Körpermodell einer 163 cm großen und 60 kg schweren Patientin mit folgenden Risikoorganen erstellt worden:

Bladder (whole organ), Bladder Wall 3 mm (3 mm thick wall of bladder), Bone Marrow: Arm left, Arm Right, Femur Left, Femur Right, Head, Hip, Ribs Left, Ribs Right, Sternum, Vertebra, Cauda, External (External Patient Contour), Heart (whole organ), Kidney Left+Right, Liver, Lung Left+Right, Mamma Left+Right, Mandible, Oesophagus, Ovary Left, Ovary Right, Spinal Cord, Stomach, Thyroid, Uterus, Whole Brain.

Zusätzlich wurden auf Basis des Ganzkörper-CTs ein 3D-CRT sowie ein IMRT Bestrahlungsplan gerechnet. Entsprechend sind wir nun in der Lage, den Dosisbeitrag im Knochenmark abzuschätzen. Dies gilt ebenso für Organe wie den Uterus als auch die Ganzhirnbelastung. Die Extrahierung von DVHs dieser Organe sind auf Basis des standartmäßigen CTs beim Mammakarzinom nicht möglich, da diese Bereiche hier nicht (vollständig) mit erfasst werden.

4. Geplante Weiterarbeiten

Ein erster Datenaustausch bezüglich dosimetrischer Daten der bisher konturierten Risikoorgane mit den epidemiologischen Modellierern ist inzwischen erfolgt. Absprachen bezüglich der endgültigen Formatierung der Daten stehen jedoch noch aus. Einige der von epidemiologischer Seite gewünschten Organe wurden im oben erwähnten Ganzkörper-Modell erfasst. Es fehlen jedoch weiterhin noch Abschätzungen für folgende Organe: Prostata, Darm, Rektum, Bauchspeicheldrüse, Auge, ZNS, Gallenblase.

Für bestimmte Risikoorgane könnte jedoch in vereinfachter Weise durch Abstandsbeziehungen der Organe vom Hauptstrahlenfeld mit Hilfe gemessener und theoretisch berechneter Dosisprofile an Standardpatienten die mittlere Dosis inklusive Fehlergrenzen (beinhaltet hier im Idealfall Patientengeometrie, Größe des Organes, Messunsicherheit) abgeschätzt werden.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 zu erfassenden Dosis- und Volumenparameter wurden definiert. Die Konturierung der Risikostrukturen erfolgt weiterhin nach den bereits festgelegten Richtlinien. Bis Ende Januar 2015 konnten 64 Patientinnen, die die Einschlusskriterien erfüllen, aus dem laufenden Programm rekrutiert werden (linksseitige n= 40, rechtsseitige n= 24).

II.:

- Aktuell wurden insgesamt 417 Bestrahlungspläne mit den genannten Techniken erstellt.
- Für weitere Untersuchungen zur Deep-Inspiration-Breath-Hold (DIBH) Technik konnten die technischen Voraussetzungen wegen des nicht erfolgten, geplanten Ersatzes des CT nicht geschaffen werden.
- Es wurde eine Methode für die Registrierung der CT-Serien zwischen Tele- und Brachytherapie evaluiert, die einen Bug in der Bestrahlungsplanungssoftware umgehen kann.
 - Fusionsbereich auf Rippen-und Herzbereich eingeschränkt
 - Rekonstruktion der Original-Brachytherapie-Pläne im Teletherapie CT zur Ermittlung von Dosiswerten für die Brachytherapie auch an weiter entfernten Risikostrukturen
- Diese Prozedur der nochmaligen Rekonstruktion der Brachytherapie Pläne im Teletherapie-CT gestaltet sich äußerst zeitaufwändig, da jeder Katheter einzeln erfasst werden muss
- Die Basisstruktur der Datenbank wurde in Abstimmung mit der Uni Rostock definiert und ist in vergleichbarer Weise derzeit am UKL implementiert.

4. Geplante Weiterarbeiten

I.:

- Fortgesetzte Rekrutierung weiterer Patienten um die angestrebte Patientenzahl mit den erforderlichen Voraussetzungen zu erreichen.
- Der Abschluss der Patientenrekrutierung ist bis Ende März 2015 angestrebt. Sollte bis dahin die geplante Zahl nicht erreicht werden, so sollen auch Patientinnen ohne interstitielle Boostbestrahlung in die Studie mit einbezogen werden.

II.:

- Weitere Messungen der Dosisverteilungen im Nutzstrahlenfeld und im erweiterten Streustrahlungsbereich zur Erfassung der Rechengenauigkeit verschiedener Planungssysteme sind vorgesehen (Eclipse)
- Eine verbesserte Anpassung der Beam-Modelle im Planungssystem „Raystation“ soll mit Unterstützung des Herstellers zur Verringerung der Abweichungen zwischen gemessenen und gerechneten Out-Of-Field-Dosiswerten ist in Vorbereitung.
- Die Modellierung der Dosisverteilung für die Brachytherapie innerhalb und außerhalb des Zielvolumens mittels Monte-Carlo-Simulationen sowie die messtechnische Erfassung der Dosiswerte soll mit den Berechnungen des Bestrahlungsplanungssystems „Oncentra Brachy“ verglichen werden.
- Messtechnische Untersuchungen der Out-Of-Field-Dosis bei der intraoperativen Brachytherapie mit kV-Strahlenquellen sollen eine Abschätzung der Dosis in den benannten Risikostrukturen liefern.

III.:

- Die erhobenen klinischen und dosimetrischen Daten sollen in der Patientendatenbank strukturiert erfasst werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Poster für Dreiländertagung der Medizinischen Physik 2014:

J. Remmele, U. Wolf: “Accuracy of out-of-field dose values – comparison between measurements and calculations of two different treatment planning systems”

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 in der Entwicklung stehende (PET/CT, PET/MR, 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 Startparameter, Optimierung von Datenaufnahmeparameter und der klinischen Integration
- Anpassung der Untersuchungsprotokolle für neue Ethikanträge und Ergänzungen bereits gestellter Anträge
- Patientenuntersuchungen und Qualitätskontrolle der Bilddaten
- Validierung biokinetischer Modelle, Möglichkeiten der Modellvereinfachung, Parameter-Festlegung, Biokinetik, Erstellung personalisierter Modelle
- klinische Evaluation, diagnostische Aussagefähigkeit verschiedener Verfahren
- Berechnung Organdosisverteilungen, Zuordnung klinische Evaluation, statistische Auswertung Aufnahmeparameter
- Direkter Nachweis der potentiellen Schäden im Herzmuskel nach Bestrahlung

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Es wurde ein Ethikantrag erstellt, der die MR-Untersuchung von Patientinnen ca. fünf Jahre nach Bestrahlung von Mammatumoren zum Inhalt hat. Bei diesen Therapien wurden Teile des Herzmuskels bestrahlt. Wir werden nun versuchen mittels einer funktionellen MR Untersuchung potentielle Effekte hinsichtlich Vernarbung und Minderdurchblutung nachzuweisen.

Die SPECT/CT und PET/MR Messmethoden wurden weiter kontextspezifisch eingehend untersucht und optimiert. Insbesondere die kardiologischen PET/MR Untersuchungen wurden hinsichtlich der Protokolle und der diagnostischen Aussagekraft betrachtet, da ja der Wegfall der CT Untersuchungen zu einer erheblichen Reduktion der Belastung durch ionisierende Strahlung beiträgt. Hier stand nun die Vitalitätsdiagnostik im Vordergrund.

Der Ethik-Antrag für Ganzkörpermessungen wurde erneut umgearbeitet und wird jetzt alle Untersuchungen (SPECT-CT, PET-CT, PET-MR-Aufnahmen) und das Auswerten von Urin- und Blutproben abdecken. Die Erstellung des Antrags hat sich aufgrund seiner erheblichen Komplexität verzögert und wird im ersten Quartal 2015 eingereicht. Das Aufnahmeverfahren für sehr schnelle SPECT-Messungen des radioaktiven Tracers ^{99m}Tc -MIBI sowie die Methoden der absoluten Quantifizierung von SPECT Studien auf den vorhandenen Systemen wurde weiter vertieft, um eine zusätzliche Verwendung ionisierender Strahlung zur Schwächungskorrektur zu vermeiden. Die bereits vorliegenden Daten aus früheren Studien (TIM-1, TIM-2, Bombesin) wurden einer erweiterten Qualitätskontrolle unterzogen und werden derzeit in Zusammenarbeit mit dem Helmholtz-Zentrum München analysiert, um tracer-generalisierte Modelle zu evaluieren, die als Basis für Simulationsstudien mit anderen Isotopen dienen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Der Ethikantrag zur MR Bildgebung zum Nachweis eventueller Schädigungen des Herzmuskels wird demnächst eingereicht und die Untersuchungen werden nach positivem Votum der Ethikkommission sofort beginnen.

Im 1. Halbjahr 2015 werden weitere dynamische Ganzkörperaufnahmen erstellt, wobei der Schwerpunkt auf den schnellen SPECT Untersuchungen liegt. Außerdem werden die noch erforderlichen Ethik-Anträge eingereicht sowie die Auswertung der bereits vorhandenen kinetischen Daten abgeschlossen.

Aufgrund von Rekrutierungsproblemen beabsichtigen wir das Projektzeitfenster bis zum Ende der Laufzeit von PASSOS auszudehnen. Da die Erstellung der kinetischen Modelle und der personalisierten Dosisabschätzung im letzten Jahr der Laufzeit vorhanden sein wird, ist die schnelle Verarbeitung der hier generierten Daten in eben diesem Zeitraum gesichert und wird die Aussagekraft des Projektes weiter steigern.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 AP folgende Themen:

- AP1.2: Transport von Radionukliden von einem Schneefeld in Vorfluter: Bilanzierung am Beispiel des Reintals, Zugspitze (Hürkamp, Tschiersch)
- AP1.3: Das Verhalten von Plutonium in der Schnee-Hydrosphäre (Shinonaga)
- AP2.5: Untersuchung und Bewertung des reaktiven Stofftransports von Radionukliden in heterogenen Grundwassersystemen (Maloszewski, Stumpp)
- AP3.1: Untersuchungen zur Biokinetik inkorporierter Radionuklide aus aquatischen Ökosystemen zur verbesserten Dosisabschätzung (Oeh, Höllriegl, Li)
- AP4.2: Abschätzung der radiologischen Auswirkungen von Nuklearunfällen auf die städtische Trinkwasserversorgung und Stadtentwässerung (Kaiser, Staudt)
- AP5: Ausbildung und Nachwuchsförderung: Forschungsaufenthalte, Austauschprojekte, Sommer-schule (Rühm)

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1.2: Die räumliche Temperaturverteilung in der Kühlzelle wurde bestimmt. Aus den auf der Zugspitze erhobenen Schnee- und hydrologischen Parametern wurden Zeitpunkte der Schmelzphasen, Aufenthaltszeiten im Karst- und Oberflächenwasser als Grundlage für die Bilanzierung des Radionuklidtransportes bestimmt. Die Ergebnisse der gammaspektrometrischen Aktivitätsbestimmung für Umweltradionuklide in den Schneeproben eines akkumulierten Gesamtprofils der Wintersaison 2013/2014 wurden interpretiert.
- AP1.3: In einem ersten Schritt wurde die Methode der chemischen Trennung von Pu und Am getestet. Mehrere Testmessungen wurden am Beschleuniger-Massenspektrometer (Kooperation mit AP1.5) durchgeführt. Zwei Schneeproben wurden am Schneefernerhaus auf der Zugspitze genommen. Bis zum Ende der Schneesaison sollen weitere 4-5 Proben folgen.
- AP2.5: Es wurden zwei verschiedene Säulenexperimente mit Cs-134 unter heterogenen und homogenen Bedingungen durchgeführt. Eine der Säulen wurde mit Sand und Ton befüllt, um die Auswirkung der Heterogenität (d. h. immobile Wasserregionen) auf den Wasserfluss und Cs-Transport zu untersuchen. Als Vergleich wurde der homogene Wasserfluss und Cs-Transport in einer Säule gefüllt mit Sand untersucht. Zusätzlich wurden mit Tracer-Versuchen (Bromid und Uranin) an beiden Säulen die hydrogeologischen Eigenschaften der Sedimente bestimmt. Als nächstes werden weitere Säulenexperimente durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Fließraten auf den Cs-Transport in heterogenen Sedimenten zu bestimmen.
- AP3.1: Die Optimierungsarbeiten zur chemischen Abtrennung von Cer aus biologischen Proben und die TIMS-Messung konnten nicht erfolgreich zu Ende geführt werden, da die durch Barium bedingten Interferenzen nicht vollständig reduziert werden konnten. Herr Kamil Brudecki verließ die Arbeitsgruppe zum 01.11.2014. Der Projektplan wurde dahingehend geändert, dass die Unsicherheitsanalysen der Dosis-Koeffizienten auf Basis von Tierdaten (bestehendes ICRP-Modell) und nicht auf Humandaten durchgeführt werden. Herr Vladimir Spielmann ist zum 01.01.2015 für das Projekt eingestellt worden.
- AP4.2: In Kooperation mit AP1.1 und der hanseWasser Bremen GmbH wurde ein Modell zur Verteilung von Radionukliden in dem Kanalsystem der Altstadt Bremen erstellt und mit Be-7-Daten im Regen- und Abwasser verifiziert. Leider lagen die Be-7 Aktivitäten der Messungen von Juni und Oktober 2014 im Abwasser aufgrund schwacher Regenfälle unter der Nachweisgrenze. Die Messungen sollen 2015 wiederholt werden.
Um den Eintrag von Radionukliden in eine Trinkwasserquelle nach einem radiologischen Unfall zu simulieren wurde für eine Talsperre, die zur Trinkwassergewinnung genutzt wird, ein entsprechendes ++Systems Modell erstellt. Dieses Modell soll im weiteren Verlauf des Projektes verfeinert werden, um potentielle Auswirkungen auf die Bevölkerung nach einem Zwischenfall abzuschätzen.
- AP5: Der erste AP5 Workshop fand vom 25.-27.11.2014 am KIT in Karlsruhe zum Thema „Aufbereitung von Wasserproben und Nachweis von Radionukliden in Wasserproben“ statt. Die von den erfahrenen Wissenschaftlern gehaltenen Tutorials sind auf der Homepage veröffentlicht. An der dieses Jahr vom 03.-14.08.2015 in Bad Honnef stattfindenden WE-Heraeus Physikschule „Ionising Radiation and the Protection of Man“ können wieder Mitglieder des TransAqua-Projekts des KVSF teilnehmen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeitspakete werden entsprechend des jeweiligen Balkenplans abgearbeitet.

Die Homepage (<http://transaqua.helmholtz-muenchen.de>) wird fortlaufend mit News, Terminen sowie neuen Publikationen aktualisiert. Kurzfassungen und Abbildungen zu den einzelnen Arbeitspaketen sowie eine Seite zum durchgeführten 1. Workshop des AP5 mit Downloadfunktion der gehaltenen Tutorials 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 werden 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.

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 im Detektor.
- *Aufbau eines Prototypen:* Test und weitere Optimierung unter Laborbedingungen. Nach der Entwicklung von Analysealgorithmen zur getrennten Erfassung von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung sowie der Anpassung von bereits vorhandener Standardelektronik für den online Betrieb, sollen erste online Messungen in einem Testsystem erfolgen.
- *Test und Bewertung des entwickelten Detektorsystems:* Der Test des Systems soll in einem simulierten Wassernetz unter realitätsnahen Bedingungen 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

- Die ersten bereits durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen zu Detektormaterialien und -geometrien wurden hinsichtlich Geometrie des Detektors und physikalischen Prozessen verfeinert.
- Die Programmierung eines C++-basierten Auslese- und Analyseprogramms wurde begonnen.
- Benötigte Detektorkomponenten wurden bestellt, sind eingetroffen und wurden auf ihre Funktion getestet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- Die Simulationsergebnisse sollen mittels eines einfachen Detektoraufbaus validiert werden.
- Das Auslese- und Analyseprogramm soll in seiner Handhabung und seinen Möglichkeiten den Anforderungen entsprechend weiterentwickelt werden.
- Die Detektorsensitivität soll durch bauliche Maßnahmen verbessert werden.
- Nach ersten Messungen mit umschlossenen radioaktiven Quellen sind auch Messungen mit Radionukliden in wässrigen Lösungen geplant.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Poster TransAqua-Workshop Karlsruhe, November 2014.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Reservoiren 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

- A1: Gammaspektroskopische Untersuchungen an Buntsandstein-Kernproben aus dem Werra-Gebiet zeigten, dass Radionuklide nur in geringen Konzentrationen in den zu untersuchenden Aquifereen auftreten. Die Untersuchungen der Gesteinsproben mittels LA-ICP-MS bestätigten, dass höhere Th- und U-Konzentrationen an Mineralphasen wie z. B. Apatit oder Titanit und nicht an organisches Material gebunden sind.
- A2: Der Vergleich der radioaktiven Isotopenverhältnisse des Grundwassers mit denen des Rhyoliths deutet daraufhin, dass die im Grundwasser erhöhte ^{222}Rn -Konzentration ursprünglich nicht dem vorherrschenden Rhyolith entstammt. Die Untersuchung des Kreuznacher Rhyoliths mittels LA-ICP-MS zeigte keine aussagekräftige Verteilung ^{238}U -haltiger Sekundärphasen, die auf eine Emanation/Migration des Ra/Rn aus dem Wirtsgestein in das Grundwasser hinweisen könnte.
- A3: Für die Verifizierung verschiedener Verweilzeiten der Probenwässer mit dem Wirtsgestein, wurde der zuvor röntgendiffraktometrisch und auf dessen Elementgehalt mittels Totalaufschluss untersuchte Schwarzschiefer aus der Grube Morassina nachfolgend auf dessen Lösungsreaktionen in Wasser unter Anwendung von Batch-Tests (8-168 h) untersucht. In den einzelnen Eluatstufen stiegen die Konzentrationen der meisten Elemente während des Untersuchungszeitraumes an, wobei die Elemente Cu, Co, Mn und Mo ein Gleichgewicht erreichten. Die Reduzierung der Fe-Konzentration deutet auf die Präzipitation von Eisenphasen hin (Erhardt, R., 2014). Mit Hilfe kultivierungsunabhängiger Untersuchungen konnten in den Präzipitaten der Grube Morassina sowohl Bakterien als auch Archaeen nachgewiesen werden. Die mikrobiologische Charakterisierung der Präzipitate und Probenwässer zeigte eine, entsprechend der hydrochemischen Standortbedingungen (pH 3-4) zu erwartende, geringe mikrobielle Diversität. Es konnten sowohl Bakterien als auch eine Vielzahl an Pilzen auf den entsprechenden Medien mit pH 5 (Std I; R2A) kultiviert werden. Besseres mikrobiologisches Wachstum wurde auf den doppelt konzentrierten Medien (1:1 Aqua dest. + Probenwasser) beobachtet.

4. Geplante Weiterarbeiten

- A1: Basierend auf hydrochemischen und gammaspektroskopischen Analysenergebnissen des Grundwassers, welche nur geringe Radionuklid-Konzentrationen aufweisen, liegt der Fokus weiterer Untersuchungen vorerst auf den anderen Untersuchungsgebieten (Arbeitspakete 2 + 3).
- A2: Für die nähere Betrachtung der Mineralzusammensetzung des Rhyoliths wurden Dünnschliffe angefertigt, welche demnächst mittels Mikrosonde näher untersucht werden sollen. Um Rückschlüsse auf die Herkunft der erhöhten ^{222}Rn -Konzentration im Grundwasser Bad Kreuznachs zu erlangen, sollen zukünftig weitere permokarbonische lokal auftretende Gesteine mineralogisch/geochemisch untersucht werden.
- A3: Im Rahmen von Bachelor-Arbeiten sollen die Bakterien-Isolate physiologisch charakterisiert sowie phylogenetisch identifiziert werden. Um das gesamte Spektrum der mikrobiellen Gemeinschaft zu erfassen, soll hierzu eine Metagenomanalyse mittels Illumina Mi-Seq-Technologie durchgeführt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

- Erhardt, R. (2014): Hydro-Geochemische Untersuchungen in dem ehemaligen Alaunschieferbergwerk „Morassina“. Diplomarbeit Friedrich-Schiller-Universität Jena. (Unveröffentlicht).
- Burow, K., Gärtner, S., Grawunder, A., Merten, D., Kothe, E., Büchel, G. (2015): Radionuclides in groundwater: (micro)biology and (hydro)geology (TransAqua). 12. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“. Dresden 2015. (Eingereicht).

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: Die Organisation der Probenahme wurde fortgeführt und Kontakte zu für die Probenahme notwendigen Partnern gepflegt. Weiterhin wurden Erkundungen im Bereich des südlichen Fuhrberger Feldes und an der Granetalsperre im Harz unternommen.
- AP3: Auch die Probenahmen werden fortlaufend fortgesetzt. So wurden Wasser- und Sedimentproben aus einem weiteren Oberflächengewässer nahe des Wasserwerks Fuhrberg (Meitzer Teiche) genommen.
- AP4: Die Methodik zur Probenvorbereitung und Messung von Tritium könnte praktisch abgeschlossen werden. Anpassungen sind nur noch auf Basis der im Weiteren gesammelten Erfahrungen sowie eventuell zur Verbesserung der Nachweis- und Erkennungsgrenzen angedacht. Im Rahmen der Methodenentwicklung wurde das radiochemische Labor des BSH besucht, welches Tritium routinemäßig als Messstelle für Meerwasser im Rahmen von IMIS überwacht. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Etablierung einer elektrolytischen Tritiumanreicherung in diesen Projekt nicht zu leisten ist und daher eine Reinigung mittels Destillation die geeignete Probenvorbereitung darstellt. Die Probenvorbereitung für Kohlenstoff-14 ist in der Erprobungsphase. Allerdings deuten erste Versuche unter Realbedingungen darauf hin, dass weitere Anpassungen erforderlich sind.
- AP5: Die Probenmessungen zur Bestimmung von Tritium konnten aufgenommen werden. Die Messungen von Iod-129 wurden fortgesetzt. Die ersten Ergebnisse von Grundwasserproben aus 3, 6 und 14 m Tiefe ergaben, dass sowohl die Konzentration von ^{129}I wie auch das $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ -Verhältnis bei den Proben aus dem Fuhrberger Feld um jeweils eine Größenordnung höher ausfielen, als Vergleichsproben von drei unterschiedlichen Standorten aus Niedersachsen mit überdeckten Grundwasserleitern. Damit lagen sie im Bereich der ^{129}I -Konzentration von niedersächsischen Oberflächengewässern. Der Vergleich mit einer Oberflächenwasserprobe aus demselben Gebiet (Wulbeck; $8,0 \cdot 10^{-14}$ g/kg ^{129}I) zeigte eine enge Übereinstimmung mit den untersuchten Grundwasserproben ($(2,0 - 6,0) \cdot 10^{-14}$ g/kg ^{129}I).

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 weiterer Grundwasserproben im Fuhrberger Feld aus unterschiedlichen Tiefen in Zusammenarbeit mit der BGR. Zusätzlich werden im gleichen Gebiet Bodenproben gewonnen, sobald für die entsprechenden Flächen Betretungsgenehmigungen erteilt wurden sowie weitere Wasser- und Sedimentproben aus ausgewählten Vorflutern. Darüber hinaus ist vorgesehen, auch Regenwasser als weiteren wichtigen Wassereintrag in diesem Trinkwassergewinnungsgebiet (Fuhrberger Feld) in die Betrachtung mit einzubeziehen, sobald ein geeigneter Standort für die Regensammler identifiziert wurde.
- 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 ist 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 Doktoranden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im zweiten Halbjahr 2014 wurden experimentelle Untersuchungen zur Negativ-Ionenausbeute für Zr Strahlen durchgeführt, mit der Zielsetzung, das Spaltprodukt ^{93}Zr mit höchster Empfindlichkeit nachzuweisen. Versuche mit ZrH^- waren nicht sehr befriedigend, die Ausbeuten waren zu gering. Am Besten herausgestellt hat sich jedoch ZrO^- , die Intensitäten lagen in Bereichen von über 200 nA und damit geeignet für AMS Messungen. Außerdem wurden erweiterte Simulationen zur Trennung von Isobaren (hier das Spaltisotop ^{93}Zr gegenüber seinem Isobar ^{93}Nb) durchgeführt. Simuliert wurde hierbei der unterschiedliche Energieverlust (dE/dx) mittels passiven Absorbers und anschließender Energiemessung. Als passive Absorber wurden Si_3N_4 Folien gewählt. Durch Wahl der geeigneten Anzahl von Folien kann dann die optimale Dicke experimentell bestimmt werden, um diese mit den Rechnungen zu vergleichen. Erste Testmessungen zeigten jedoch, dass die gängigen Simulationen mit Hilfe von SRIM nicht mit den experimentellen Werten übereinstimmen. Es wurden deshalb, durch die Verwendung unterschiedlicher Anzahl von Si_3N_4 Folien, die Energieverlustwerte (dE/dx) für ^{93}Zr gemessen. Mit diesen Ergebnissen ergibt sich jetzt eine optimale Anzahl von Folien. Im anstehenden Messzyklus wird sich herausstellen in wie weit wir das Optimum zur Trennung von ^{93}Zr - ^{93}Nb bereits gefunden haben. Zusätzlich wurde an der Weiterentwicklung der höchst-selektiven chemischen Prozedur zur Separation von Americium (Am), Plutonium (Pu) und Neptunium (Np) in einzelne Fraktionen gearbeitet. Bei den Pu Ausbeuten wurden Werte um 90 % erzielt. Zur Überprüfung der chemischen Ausbeuten konnte das Institut für Ressourcenökologie vom Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf für eine Zusammenarbeit gewonnen werden. Dieses Institut ist ebenfalls beim Kompetenzverbund TransAqua beteiligt. Die Ausbeutemessungen wurden dort durch ICPMS durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit AP1.3 (Frau Dr. Shinonaga) wurden für diese Gruppe Messungen von Aktiniden aus Wasserproben durchgeführt.

Im Rahmen des TransAqua Kollaborationstreffens (25.-27.11. am KIT, Karlsruhe) wurde ein Übersichtsvortrag (Nachweis von Radionukliden in Wasserproben mit Beschleuniger-Massenspektrometrie) gehalten.

Erste Ergebnisse unserer Studien konnten in zwei Vorträgen bei der 13th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (Aix en Provence, France) 2014 vorgestellt werden.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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: Um eine Übersicht aller komplexbildenden Liganden der zu untersuchenden Biofluide mit Eu(III) zu erhalten, wurde ein spektroskopisches Screening durchgeführt, um wichtige Hauptbindungspartner zu ermitteln. Dabei wurden die Biofluide des menschlichen Verdauungssystems nach der UBM-Methode simuliert (*Unified Bioaccessibility Method* von der Forschergruppe BARGE (*Bioaccessibility Research Group of Europe*)).

Im Speichel sind vorwiegend anorganischen Liganden (CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} und Ca^{2+}) an der Komplexbildung mit Eu(III) beteiligt. Aufgrund des niedrigen pH-Wertes des Magensaftes von etwa 1 liegt Eu(III) im Magen als Aquo-Ion vor. Im Darmsaft bei pH 7-8 sind an der Komplexbildung anorganische Liganden (CO_3^{2-} , PO_4^{3-} und Ca^{2+}) und vorrangig Proteine (besonders Mucin) beteiligt. Auch im Gallensaft kann eine Komplexbildung von organischen und anorganischen Bestandteilen mit Eu(III) beobachtet werden. Den größten Einfluss auf die Komplexbildung weisen im Anorganiksystem die Carbonat-Ionen auf. Hauptbindungspartner ist allerdings die komplexe Mischung des Gallenextraktes. AP4.3: Mit Hilfe eines speziell für eukaryotische Mikroorganismen ausgewählten Mediums (1 % Pepton und 4 % Glucose, neutraler pH-Wert) wurden aus dem Flutungswasser der ehemaligen Uranmine in Königstein 9 verschiedene Organismen isoliert und mit verschiedenen PCR-Methoden identifiziert. Bei 8 von diesen Mikroorganismen handelt es sich um eukaryotische Pilze. Zwei Isolate wurden als eine Mischkultur bestehend aus einem Bakterium und einem Pilz identifiziert. Mit allen Isolaten wurden Sorptionsuntersuchungen mit Uran (U-Konz. = 1×10^{-4} M) durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wurden drei Isolate ausgewählt (KS5, KS7 und KS10), um mit diesen weiterführende Untersuchungen durchzuführen. Bei KS5 handelt es sich um eine Reinkultur der Hefe *Rhodospiridium toruloides*. Bei dem Isolat KS7 konnten zwei verschiedene Mikroorganismen identifiziert werden. Hierbei handelt es sich um das Bakterium *Acidocella aromatica* und um einen noch nicht näher identifizierten Pilz (Basidiomycota). In Uran-Sorptionsuntersuchungen konnte festgestellt werden, dass diese Mischkultur eine hohe Uran-Immobilisierung aufweist. Untersuchungen an einer aus der DSMZ (Deutsche Stammsammlung für Mikroorganismen) stammenden *Acidocella aromatica* Kultur zeigten hingegen keine Uran-Immobilisierungen. Des Weiteren war es auch nicht möglich, eine ausreichend große Biomasse dieses Organismus zu kultivieren. Vermutlich kann *Acidocella aromatica* nur in Gegenwart eines anderen eukaryotischen Mikroorganismus (Symbiose) kultiviert werden. Bei KS10 handelt es sich um eine weitere Mischkultur, bestehend aus dem Bakterium *Bacillus sp.* und dem Pilz *Microscypha cajaniensis*. Hier konnte ebenfalls eine hohe Uran-Immobilisierung nachgewiesen werden.

Mit der Mischkultur, bestehend aus dem Flagellaten *Bodo saltans* und seinem Futterbakterium *Acidovorax facilis*, wurden kinetische Sorptionsuntersuchungen mit Uran durchgeführt. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass der Großteil des Urans bereits innerhalb der ersten 5 Minuten immobilisiert wird. Um das immobilisierte Uran zu lokalisieren, wurden die Proben für TEM-Untersuchungen präpariert. Die Ergebnisse der Untersuchungen stehen noch aus. Am Institut für Mikrobiologie der Universität von Granada wurden Untersuchungen an dieser Mischkultur mittels der Durchflusszytometrie durchgeführt. Bei der Mischkultur, bestehend aus *Bodo saltans* und *Acidovorax facilis*, und bei der Reinkultur dieses Bakteriums konnten nach den Sorptionsexperimenten (U-Konz. = 5×10^{-5} M und 1×10^{-4} M) Aggregate beobachtet werden, die aus der Bildung von extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) hervorgehen. Untersuchungen, die ohne Uran durchgeführt wurden, zeigten keine Aggregatbildung, was darauf hinweist, dass die Aggregatbildung als Stressreaktion infolge der Uranzugabe zu sehen ist. Untersuchungen mittels Durchflusszytometrie wurden auch am Isolat KS5 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Isolat KS5 eine hohe Toleranz gegenüber Uran mit U-Konz. = 5×10^{-5} M und 1×10^{-4} M besitzt. Der Test auf Zellviabilität zeigte keine großen Unterschiede zwischen der Anwesenheit von Uran und der Kontrolle in Leitungswasser ohne Uran.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3.2: Die Komplexbildung von Eu(III) mit dem Protein Mucin, soll auf molekularer Ebene mit verschiedenen spektroskopischen Methoden untersucht werden.

AP4.3: An der mit Uran kontaminierten Mischkultur, bestehend aus *Bodo saltans* und *Acidovorax facilis*, sind Untersuchungen mittels der Durchflusszytometrie geplant. Hierfür ist eine Isolierung der EPS aus der Mischkultur nötig, um eine Auflösung der Aggregate zu ermöglichen. Mittels Durchflusszytometrie sind Aussagen zur Zellviabilität und zum oxidativen Stress bei verschiedenen Uran-Konzentrationen zu erwarten. Mit der zeitaufgelösten Laserfluoreszenzspektroskopie (TRLFS) soll der Nachweis von Uran(VI)-Verbindungen in den Bakterien und/oder in der EPS erbracht werden. Ein exakter Nachweis zur Lokalität ist mittels Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM) mit Elektronenenergieverlustspektroskopie (EELS) zu erwarten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Gerber, U. et al. (2015): Isolated microorganisms from the flooding water of a former uranium mine in Königstein (Saxony, Germany) and their interactions with uranium. Annual Report HZDR-IRE 2014, HZDR-059.

Barkleit, A.; Heller, A. (2015): Speciation of europium and curium in human saliva. Annual Report HZDR-IRE 2014, HZDR-059.

Wilke, C.; Barkleit, A. (2015): A spectroscopic screening of the complexation of europium(III) in gastrointestinal tract: mouth and stomach. Annual Report HZDR-IRE 2014, HZDR-059.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 326.236,00 EUR	Projektleiter: Dr. Walther	

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

Ausgehend von den spezifischen Aktivitäten für ^{228}Ra und ^{226}Ra wurden zwei Materialien, ein Kaolin (107 bzw. 131 Bq kg^{-1}) und ein Rhyolith (103 bzw. 46 Bq kg^{-1}), als geeignet für Versuche zum Übergang von Radium aus fester in flüssige Phase befunden und weiter untersucht. Die spezifischen Oberflächen wurden mit $17 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ für Kaolin und mit $2\text{-}6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (abhängig von Korngröße) für Rhyolith bestimmt. Für die Transferversuche wurde Kaolin ausgewählt. Aus der deutlich größeren spezifischen Oberfläche resultieren höhere abgeschätzte Aktivitätskonzentrationen in Lösung, welche für Versuchsansätze mit geringem Probenvolumen gute analytische Voraussetzungen sind.

In Vorversuchen wurden verschiedene Varianten zur Probenvorbereitung für die γ -spektrometrische Bestimmung der gelösten Ra-Nuklide getestet. Ziel war es, eine schnellstmögliche Messung der Proben zu ermöglichen, da dies für die Erfassung des kurzlebigen ^{224}Ra ($t_{1/2} = 3,6 \text{ d}$) wichtig ist. Nach Trennung von fester und flüssiger Phase durch Zentrifugation und Membranfiltration erwies sich die direkte Aktivitätsbestimmung aus der resultierenden Lösung als günstig, auch wenn dabei keine Anreicherung der Analyten erzielt wird. Das alternative Anreichern durch Sulfatfällung erfasst die Analyten bei hohen Salzgehalten nur unvollständig, während das Eindampfen der Probe zur Trockene zu zeitaufwendig war.

Die Nutzung einer neuen Messgefäß-Geometrie machte eine zusätzliche Kalibrierung des Messsystems notwendig.

Erste Versuche zur Radiumfreisetzung wurden durchgeführt. In den Versuchsreihen wurde Kaolin mit Salzlösung (Na-Ca-Cl-Typ, $c(\text{Salz}) = 110 \text{ g L}^{-1}$) und zum Vergleich mit deionisiertem Wasser in Kontakt gebracht (Flüssigkeit/Feststoff-Verhältnis = 4, $\vartheta = 22 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$, p_{Atm} , $t = 19 \text{ d}$). In den Probenansätzen mit Wasser wurde in den Lösungen kein Radium oberhalb der Erkennungsgrenzen g^* ($g^* < 0,4 \text{ Bq L}^{-1}$) festgestellt. In den Salzlösungen wurden die Ra-Nuklide in der Größenordnung von $3\text{-}8 \text{ Bq L}^{-1}$ ermittelt. Für eine Bewertung der ablaufenden Prozesse wurden die Aktivitätsverhältnisse von ^{226}Ra , ^{228}Ra und ^{224}Ra im Ausgangsmaterial Kaolin und in Lösung verglichen.

Während das $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ -Verhältnis der Salzlösungen dem des Ausgangsmaterials Kaolin entsprach, stiegen das $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ - und das $^{224}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ -Verhältnis deutlich an. ^{224}Ra wird in Lösung gegenüber ^{226}Ra und ^{228}Ra angereichert.

Der Übergang der langlebigen Nuklide ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1600 \text{ a}$) und ^{228}Ra ($t_{1/2} = 5,7 \text{ a}$) aus der festen in die flüssige Phase ist auf physikochemische Prozesse (Lösung, Sorption) zurückzuführen. Der zum Übergang beitragende kernphysikalische Prozess des α -Rückstoßes kann wegen der kurzen Versuchszeit (19 d) für diese Nuklide vernachlässigt werden. Die aus dem α -Rückstoß resultierende Nuklidfreisetzung in die flüssige Phase verläuft in Abhängigkeit von der Halbwertszeit des betrachteten Nuklids, das Maximum der freigesetzten Aktivität wird nach fünf bis sieben Halbwertszeiten ($t_{1/2}$) erreicht.

Anders verhält es sich beim Nuklid ^{224}Ra . Dieses geht ebenfalls durch die elementspezifischen physikochemischen Prozesse aus der festen in die flüssige Phase über. Ist der Übergang nur von diesen Prozessen abhängig, bleiben die Nuklidverhältnisse $^{224}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ und $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ ebenso unverändert wie es für das $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ -Verhältnis festgestellt wurde. In den Versuchen entsprechen unveränderte Aktivitätsverhältnisse $40\text{-}50 \%$ des freigesetzten ^{224}Ra . Die darüber hinausgehende Freisetzung lässt sich möglicherweise mit dem α -Rückstoß erklären. Im Versuchszeitraum sind mehr als fünf Halbwertszeiten verstrichen und die erreichten Aktivitäten grundsätzlich mit dem Rückstoß erklärbar.

Im Anschluss wurden Versuche zur zeitaufgelösten Bestimmung der Aktivitätskonzentrationen durchgeführt, welche zurzeit ausgewertet werden. Abgesehen von der variablen Kontaktzeit wurden die oben genannten Versuchsbedingungen beibehalten.

Die Zusammenarbeit innerhalb des Teilprojektes 2 wurde unter anderem durch die Übernahme von radioanalytischen Bestimmungen fortgesetzt.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Durchführung von Experimenten wird fortgesetzt.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Projekttreffen 25.-27.11.2014: Posterbeitrag

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 Kläranlagenkompartiments. 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

- Bestimmung des Aktivitätsanteils in den Schwebstoffen und fällbaren Kolloiden (entwickelt in AP4.1). Da dieser < 10 % ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Aktivität in Schwebstoffen des Flusses unter realistischen Messbedingungen aufgrund von Verdünnungseffekten nicht nachweisbar ist. (AP1.1)
- Probenahme in der Weser (über die gesamte Tiefe gemittelt Wasservolumen), Aktivitäten vermutlich aufgrund der geringen vertikalen Durchmischung zumeist unter der Nachweisgrenze. Bei Entnahme von Oberflächenwasser lag die Aktivität in allen Fällen oberhalb der Nachweisgrenze bei zunehmenden Verdünnungsfaktoren. (AP1.1)
- Zur Abschätzung geeigneter Probeentnahmeorte und -tiefen Durchführung von Simulationen mit dem Mischungszonenmodell CORMIX (MixZon Inc.). Die Simulationsergebnisse unterstützen die experimentellen Befunde hinsichtlich der Verdünnungsfaktoren, der Ausbreitung und des Eindringens von Flusswasser in die Öffnung des Kläranlagenauslaufs. (AP1.1)
- Entwicklung eines Extraktionsverfahrens zur Unterscheidung von drei Fraktionen des im Abwasser vorhandenen Iods: Fällung von Schwebstoffen mit einer Aluminiumhydroxid-Lösung im ersten Schritt, danach Bentonitfällung des Iodids. Das im Überstand verbleibende Iod ist mit größter Wahrscheinlichkeit organischen Ursprungs. Zwei mit Dreifachproben durchgeführte Extraktionen weisen darauf hin, dass die Ausbeuten im Rahmen der Messgenauigkeit konsistent sind. (AP4.1)
- Die in dem beschriebenen Verfahren ermittelte Fraktionierung konnte mit dem zuvor entwickelten PHREEQC-Speziationsmodell mit Literaturwerten für Mengen an org. Schwebstoffen und gelöster org. Substanz zufriedenstellend simuliert werden. (AP4.1)
- Entwicklung eines Modells für ein einzelnes Kläranlagen-Kompartiment (CSTR, „completely stirred reactor“) mit Hilfe von MATLAB/Simulink. Weitere Flussmodelle werden zurzeit implementiert. (AP4.1)

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1.1: - Entnahme von Wasser- und Sedimentproben auf bzw. in der Weser
- Chemische Extraktion und gammaspektroskopische Auswertung der Proben
 - Erstellung und Evaluierung eines „¹³¹I-Profiles“ der Weser
- AP4.1: - Probenahme an verschied. Stellen der Kläranlage Seehausen und Untersuchung der Fraktionierung
- Modellierung weiterer, im Klärwerk vorhandener Kompartimenttypen
 - Anpassung des PHREEQC-Speziationsmodells, wenn möglich mit Hilfe experimenteller Daten

5. Berichte, Veröffentlichungen

Auf der ICRER-Konferenz (International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity) in Barcelona (07.09.14 – 12.09.14) wurden drei Vorträge gehalten (AP4.1) und zwei Poster präsentiert (AP1.1). Die entsprechenden extended abstracts sind online abzurufen unter (<https://intranet.pacifico-meetings.com/amsysweb/publicacionOnline.jsf?id=146>), Beiträge O-063 und OP-038 und OP-114. Es wurde ein Artikel in Energy Procedia 59, pp 256-262 veröffentlicht, online abzurufen unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214017421#>

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Auch im 2. Halbjahr 2014 wurde der Vorsees monatlich beprobt. Die ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration im Wasser des Vorsees variierte zwischen 7 und 16 Bq/m³. Die mittlere ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration in Schwebstoffen des Vorsees betrug etwa 270 Bq/kg und der mittlere Verteilungskoeffizient K_d^{tot} betrug etwa $28 \cdot 10^3$ L/kg.

Die Verteilung der spezifischen ^{137}Cs -Aktivität im Wasser folgte der Verteilung der Konzentration des Konkurrenz-Ions K^+ , die von 0,5 bis 0,9 mg/L variierte. Die maximale NH_4^+ -Konzentration war mit 0,13 mg/L deutlich geringer als die K^+ -Konzentration.

Dem Vorsees wurden 6 Sediment-Kerne entnommen, an denen die ^{137}Cs -Tiefenverteilung bestimmt sowie die ^{137}Cs -Bindung an das Sediment untersucht wurde. Die Maxima der ^{137}Cs Aktivitätskonzentration von 1000 bis 2400 Bq/kg (Trockengewicht) liegen in einer Tiefe von 20 bis 35 cm. Das dominierende Cs-Konkurrenzion im Porenwasser ist NH_4^+ ; mit zunehmender Tiefe des Sediments steigt seine Konzentration bis auf 45 mg/L an. Der NH_4^+ -Gehalt überwiegt den K^+ -Gehalt bis um das 10-fache und kann eine Rücklösung von ^{137}Cs aus dem Sediment begünstigen. Die ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration im Porenwasser nimmt mit der Tiefe bis 1800 Bq/m³ zu und beträgt damit das 100-fache der ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration des Seewassers. ^{137}Cs Extraktionsexperimente an den Sedimenten haben gezeigt, dass der Anteil von austauschbarem Cs von 2 % an der Oberfläche bis 12 % in der Tiefe zunimmt.

Proben der flächendeckenden Makrophyten Tausendblatt (*Myriophyllum spicatum*) und Weiße Seerose (*Nymphaea alba*) wurden entnommen und gamma-spektrometrisch untersucht. Die ^{137}Cs -Aktivitätskonzentration (Trockengewicht) variierte in verschiedenen Pflanzenteilen zwischen 25 und 145 Bq/kg.

Die spezifische ^{137}Cs -Aktivität (Frischgewicht) von Muskelfleischproben diverser Fischarten liegen zwischen 80 Bq/kg (Raubfische) und 20 Bq/kg (Friedfische).

Für die Modellierung des Langzeitverhaltens von ^{137}Cs in Wasser wurde das AQUASOPE-Modell von J. Smith verwendet. Für die ersten 20 Jahre nach Tschernobyl gibt es eine gute Übereinstimmung. Im Vergleich zu unseren Messdaten sagt das Modell aber eine zu geringe langfristige Abnahme voraus.

4. Geplante Weiterarbeiten

In der ganzen Projektlaufzeit werden monatlich die ^{137}Cs Aktivitätskonzentration in Wasser und Schwebstoffen, die Konzentration der Cs-Konkurrenzionen K^+ und NH_4^+ sowie O_2 -Konzentration, pH-Wert und Temperatur des Wassers bestimmt.

Wie im Projektantrag vorgesehen, werden im kommenden Halbjahr weitere Seesedimente entnommen und untersucht werden.

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

5. Berichte, Veröffentlichungen

Klemt, E., Knaus, J., Putyrskaya, V., Ries, T., 2014: Long term behaviour and seasonal cycling of ^{137}Cs in a eutrophic lake in southern Germany. Poster presentation. International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (ICRER), Barcelona, 7-12 September 2014.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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 wurde die Zellkerngröße der für die Zellüberlebensexperimente verwendeten CHO-Zellen vermessen. Nach konfokaler Laser Scanning Mikroskopie wurde die mittlere maximale Zellquerschnittsfläche zu $(67.6 \pm 2.2) \mu\text{m}^2$ bestimmt, die Breite der Verteilung (Standardabweichung) zu $24.8 \mu\text{m}^2$. Des Weiteren wurde die Trefferstatistik, die Wahrscheinlichkeit für N Treffer pro Zellkern, mit den gewonnenen Zellkernquerschnittsflächen simuliert. Bei Verwendung einer $10,8 \times 10,8 \mu\text{m}^2$ Matrix werden etwa 44 % der Zellen, bei einer $7,66 \times 7,66 \mu\text{m}^2$ 12 % und bei einer $5,4 \times 5,4 \mu\text{m}^2$ Matrix nur 0.29 % der Zellkerne nicht getroffen. Diesen Daten stellen wichtige Eingangsgrößen für die Simulation des Zellüberlebens mit dem Local Effect Model (Teilprojekt D) dar (AP1+AP5).

Oszillationen des verwendeten Mikrostrahls, welche phasenstar zur Netzspannung sind, wurde mit einem stroboskopartigen Konzept vermessen, wobei der Strahl nur zu einer bestimmten, einstellbaren Phase auf ein Szintillatior mit einem hochauflösenden Mikroskop zur Positionsbestimmung beobachtet wird. Mit der so möglichen präzisen Vermessung der Oszillationen ist auch eine aktive Korrektur der Oszillation möglich, wodurch diese auf mindestens 1/5 reduziert werden konnte, was vor allem die Fluktuation der applizierten Dosisverteilungen von Spot zu Spot reduziert (AP2).

Zur Charakterisierung des verwendeten 20 MeV Protonenmikrostrahl werden fluoreszierende Kernspurdetektoren (FNTD) verwendet, welche teilweise im nichtlinearen Bereich betrieben werden müssen. Zur Abschätzung der dadurch entstehenden Unsicherheiten wurde die Signalentstehung und –auslese in Abhängigkeit der applizierten Spotgröße simuliert. Im Bereich der verwendeten Protonenanzahlen pro Punkt von etwa 100 und einer Spotgröße von etwa $400 \times 800 \text{ nm}$ konnten die systematischen Unsicherheiten in der vermessenen Strahlfleckgröße zu maximal 10 % abgeschätzt werden (AP2).

In vier Strahlzeiten wurden Bestrahlungen für strahlenbiologische Experimente durchgeführt (AP4).

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Zellkerngröße und deren Verteilung stellt eine wesentliche Eingangsgröße für die Local Effect Model Rechnung des Zellüberlebens dar. In weiteren Experimenten soll bestimmt werden, wie sehr diese Größe in unseren Experimenten variiert und wovon diese eventuell abhängig ist (AP1+5).

Als zusätzlicher Strahl bzw. Ionensort für strahlenbiologische Experimente sollen 45 MeV Lithiumionen etabliert werden. Um die nötige Bestrahlungsgeschwindigkeit zu erreichen muss die Strahlpräparation optimiert werden. Zur Charakterisierung des Strahls werden STIM an Gold-Gittern, die Verwendung von speziellen dünn polierten fluoreszierenden Kernspurdetektoren sowie von CR39 getestet (AP3+2).

Des Weiteren sind zwei Strahlzeiten zur Durchführung von strahlenbiologischen Experimenten geplant (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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 333.636,00 EUR	Projektleiter: PD Dr. Schmid	

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. 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 Zellüberlebensstest 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 drei während des Berichtszeitraumes durchgeführten Strahlzeiten (6.-12. August, 2.-12. Oktober und 3.-9. Dezember) 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. Erste Ergebnisse mit fokussierten Kohlenstoffionen zeigen im klonogenen Zellüberleben eine signifikante Verringerung der RBE, was man auch als „overkill effect“ bezeichnet. Die Ergebnisse der Genexpression von an der Apoptose (programmierter Zelltod) beteiligter Gene bestätigten unsere Ergebnisse aus dem klonogenen Zellüberleben. Im Oktober 2014 wurden in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt A auch Experimente mit einer definierten Verbreiterung des Strahlflecks durch Aufstreuung durchgeführt. Diese Ergebnisse sind besonders für die Teilprojekte C und D wichtig, da sie der Validierung und Weiterentwicklung von Computermodellen dienen. Am Ende des Berichtszeitraumes wurden erste Untersuchungen der DNS Reparaturkinetik (AP4) nach Ionenmatrixbestrahlungen im Vergleich zu homogener Bestrahlung durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeiten

In einer bereits geplanten Strahlzeit am MLL-Beschleuniger in Garching (22.-31. Januar 2015) sollen weitere strahlenbiologische Experimente mit dem fokussierten Lithiumionenstrahl und dem fokussierten Kohlenstoffionenstrahl durchgeführt werden. Nach Bestrahlung mit 45 MeV Lithium (mittlere LET) werden Zellüberlebensexperimente (AP3) durchgeführt und die Anzahl der Chromosomenaberrationen, insbesondere der dizentrischen Chromosomen (AP2) quantitativ bestimmt. Da die LET von Lithium zwischen der von Protonen und Kohlenstoffionen liegt, sind diese Versuche von großer Bedeutung für die Teilprojekte C und D. 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 (Titel: Focusing 20 MeV protons or 45 MeV lithium ions to sub-micrometre spots induces clustering of DNA double-strand breaks and enhances induction of dicentric chromosomes) mit den Ergebnissen unseres Teilprojektes B wurde in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten A und C erstellt und im Januar 2015 beim Mutation Research Journal eingereicht

Die Ergebnisse wurden 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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Im biophysikalischen Programmpaket PARTRAC wurde die Bestrahlungsgeometrie an eine neue Messreihe mit fokussierten Protonen- und Li-Ionenbündeln angepasst. Den Experimenten entsprechend wurden Simulationsrechnungen für quadratische Matrixgrößen (Zahl und Ionentyp) von 0,5 μm (1 H), 2,3 μm (1 Li), 5,4 μm (117 H, 5 Li, 1 C), 7,6 μm (232 H, 10 Li) und 10,6 μm (451 H, 20 Li) bei 0,5 μm x 1,0 μm (FWHM) Fokusgröße durchgeführt. Alle Bestrahlungen lieferten in den Modellrechnungen mit Startenergien von 20 MeV für H, 45 MeV für Li und 55 MeV für C annähernd die gleiche Dosis von ca. 1,9 Gy im Zellkern. Für je 200 Bestrahlungen eines sphärischen Kernmodells (10 μm \varnothing) für AL-Zellen mit 22 Chromosomen wurden Ausbeuten und Abstandsverteilungen von DNA-Doppelstrangbrüchen (DSB), Reparaturkinetiken, korrekte und inkorrekte Verbindungen von DNA-Enden und Ausbeuten von dizentrischen Chromosomen als Endpunkte analysiert.

Die Modellrechnungen lieferten für die vier Protonen- und Li-Ionen-Matrizen jeweils die gleiche Ausbeute an DSB. Mit zunehmender Matrixgröße nahmen die Anteile der intra- und inter-chromosomalen Fehlverbindungen nach 1 Tag Reparaturzeit bei beiden Teilchenarten etwa linear zu, während die Anteile der noch unverbundenen DNA-Enden gleich blieben, nahmen aber dafür mit der Ionenmasse zu. Anders als bei den Experimenten ergaben die Modellrechnungen für dizentrische Chromosomen nicht jeweils für die größte Matrix von 10,6 μm , sondern für Protonen bei 7,6 μm und für Li-Ionen bei 5,4 μm Gitterweite die höchsten Ausbeuten, wobei letztere auch über dem berechneten Wert für C-Ionen lagen. Diese Unterschiede zwischen gemessenen und berechneten Ergebnissen erwiesen sich als robust gegenüber einer Reihe von getesteten Modellparametervariationen (AP1, AP2, AP4).

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Unterschiede zwischen Experiment und Modellrechnungen geben Anlass, andere Hypothesen zum Ursprung von DNA-Fehlverbindungen und zur Mobilität von DNA-Enden als die dem derzeitigen DSB-Reparaturmodell zu Grunde liegenden Ansätze zu konzipieren und systematisch zu testen. Dafür sollen auch weitere Experimente aus den Teilprojekten A und B mit verschiedenen C-Ionenbündeln herangezogen werden. Ferner soll ein spurstrukturbasierendes Modell der Zellinaktivierung entworfen und getestet werden (AP3).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Die unter 3. dargestellten Arbeiten und Ergebnisse wurden als Vortrag präsentiert bei:
International Symposium on Chromosomal Aberrations (ISCA11), Rhodes, 12.-14.09.2014
und als Poster bei:

41st Annual Meeting of the European Radiation Research Society, Rhodes, 14.-19.09.2014

60th Annual Meeting of the Radiation Research Society, Las Vegas, NV, 21.-24.09.2014

6th International MELODI Workshop, Barcelona, 07.-09.10.2014.

Eine gemeinsame Publikation mit den Teilprojekten A und B über die Experimente und Modellrechnungen wird im Januar 2015 bei Mutation Research eingereicht.

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: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
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

Im Berichtshalbjahr wurden erstmals die im Projekt gewonnenen Zellüberlebensdaten nach fokussierter Microbeambestrahlung systematisch mit Modellsimulationen des Lokalen Effekt Modells (LEM) verglichen. Im Vorfeld wurden dazu die Simulationsmethoden hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit optimiert. Dafür wurde ein entsprechend leistungsfähiger Rechner eingesetzt; außerdem wurde die Berechnungsmethode für fokussierte Ionenbestrahlung in das bestehende Programmpaket des LEM implementiert, das volle Kontrolle über die Präzision der genutzten Monte Carlo Routinen erlaubt. Der Vergleich zeigte eine unerwartet gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation für sowohl fokussierte und nicht fokussierte Bestrahlungen mit Protonen und Kohlenstoffionen. Dies unterstützt die der Modellierung zu Grunde liegenden Hypothesen von zwei räumlichen Skalen (Mikro- und Nanometerskala), auf denen strahleninduzierte Läsionen der DNA wechselwirken. Eine der wichtigsten Fragestellungen des Projektes, der Nachweis der Größenordnungen biologisch relevanter Targets bei Strahlenschädigung, kann man daher aus jetziger Sicht als vorbehaltlich beantwortet betrachten. Es gilt nun, die gemachte Beobachtung mit umfangreicheren Daten zu untermauern (s. u.).

Der direkte Vergleich mit Simulationsdaten zur DNA Schadensinduktion durch den PARTRAC Code stellte sich zunächst als etwas schwieriger heraus als zunächst gedacht. Grund hierfür sind verschiedene Zellmodelle, die den PARTRAC und LEM Simulationen zu Grunde liegen. Im Kontakt mit Teilprojekt C wurden vorbereitende Maßnahmen besprochen, um auch hier einen Vergleich zwischen den Simulationen zu ermöglichen. Im Rahmen des letzten Projektmeetings wurden zudem konkrete Experimente zur DNA Rejoining-Kinetik ins Auge gefasst, zu denen die beiden Modelle qualitativ verschiedene Vorhersagen machen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Um die bisher gesehene Übereinstimmung zwischen Daten von Zellüberlebensmessungen und Simulation mit LEM weiter zu bestätigen, ist angestrebt, die Simulation unter detaillierter Berücksichtigung der Trefferstatistik und der Zellkerngrößenverteilung zu wiederholen, während bisher von repräsentativen Mittelwerten ausgegangen wurde. Die hierzu nötigen Messdaten dieser Statistiken liegen bereits vor. Weiterhin ist geplant, die bisherigen Ergebnisse um eine weitere Strahlenqualität (Silizium) zu erweitern. Hierzu sollen zuerst Simulationsrechnungen vorgelegt werden (blind), die erst im Nachhinein mit den experimentellen Daten verglichen werden können, um das prädiktive Potential des Modells zu testen. Etwaige Abweichungen zwischen Modell und Experiment würde wertvolle Hinweise hinsichtlich der Modellgrenzen geben.

Auch der Modellvergleich mit PARTRAC bezüglich der DNA Schadensinduktion soll weiter verfolgt werden. Hierzu müssen die Modellrechnungen in Bezug auf die Zellkerngeometrie einander angeglichen werden, um direkte Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Friedrich et al.: Simulation of DSB yield for high LET radiation, eingereicht zu Radiation Protection Dosimetry (2014).

Konferenzbeiträge bei den Jahrestagungen der Radiation Research Society (Las Vegas, USA) und der Gesellschaft für biologische Strahlenforschung (Tübingen).

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 034A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 1.130.602,80 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Löbrich	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Vorhabensziel dieses Projekts ist die Untersuchung der biologischen Wirkung geringer Dosen ionisierender Strahlung auf das sich entwickelnde Gehirn. Langfristig soll so eine verbesserte Risikoabschätzung für strahleninduzierte neurologische Spätfolgen sowie ein erweitertes Verständnis der molekularen Mechanismen der biologischen Strahlenantwort von neuronalen Stammzellen gewonnen werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Dieses Arbeitspaket untersucht die relative Bedeutung der unterschiedlichen Reparaturwege für, durch Strahlung induzierte, DNA Doppelstrangsbrüche (DSBs) während der Differenzierung neuronaler Stammzellen zu Oligodendrozyten, Astrozyten und Neuronen. Darüber hinaus soll auch die Beteiligung unterschiedlicher DNA-Reparaturproteine an den jeweiligen Reparaturwegen in Abhängigkeit des Differenzierungsstatus aufgeklärt werden. Diese Untersuchungen sollen mit der Hilfe von *in vitro* kultivierten neuronalen Stammzellen durchgeführt werden, die zu den verschiedenen Zelltypen differenziert und zu verschiedenen Differenzierungsstadien bestrahlt werden. Für diese Arbeiten sollen sowohl Zelllinien, als auch frisch isolierte Stammzellen aus der Subventrikulärzone bzw. dem Hippocampus unterschiedlich alter Mäuse verwendet werden. Damit trägt dieses AP zu einem besseren Verständnis zu den sich im Laufe der Embryonalentwicklung beständig verändernden Mechanismen der strahleninduzierten DNA-Reparatur bei.

AP2: Im zweiten AP sollen die im ersten AP gewonnenen Erkenntnisse mit der *in vivo* Situation verglichen werden. Die Wahl des DNA-Reparaturweges sowie die Beteiligung unterschiedlicher DNA-Reparaturproteine soll nach der Bestrahlung von Wildtyp-Mäusen unterschiedlichen Alters (embryonal bis postnatal) für die verschiedenen Zelltypen des Gehirns untersucht werden. Diese Informationen sollen daraufhin in die geplanten Untersuchungen zur Empfindlichkeit der unterschiedlichen Zelltypen gegenüber Bestrahlung einfließen. Für die detaillierte Untersuchung der Rolle einzelner Proteine auf Reparatur und Überleben sollen zusätzliche Versuche mit Knockout-Mäusen durchgeführt werden. Langfristiges Ziel dieses APs ist es also, den Einfluss von DNA-Reparatur auf das Überleben und die genomische Integrität unterschiedlicher Zelltypen des zentralen Nervensystems nach Bestrahlung zu evaluieren.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Die für dieses AP geplante Stelle wurde zur Bewerbung ausgeschrieben und besetzt. Die für die *in vitro* Studien benötigten neuronalen Stammzellen wurden angeschafft und mit der Etablierung der Differenzierungsprotokolle für die unterschiedlichen Zelltypen des zentralen Nervensystems wurde begonnen. Darüber hinaus wurde mit der Etablierung von Differenzierungsprotokollen für frisch isolierte Stammzellen aus der Subventrikulärzone begonnen.

AP2: Die Stelle für dieses Arbeitsprojekt musste entgegen den ursprünglichen Planungen neu besetzt werden. Sie wurde zur Bewerbung ausgeschrieben und ist inzwischen neu besetzt. Seitdem wurde mit der Formulierung der für dieses AP nötigen Anträge für die Haltung von Knockout-Mäusen und die *in vivo* Bestrahlung von Wildtyp- und Knockout-Mäusen unterschiedlicher Entwicklungsstadien begonnen. Parallel dazu wurden die Arbeiten zur Etablierung von immunhistochemischen Färbungen histologischer Schnitte von Mäusehirnen zur Untersuchung von DNA-Reparatur und strahleninduzierter Apoptose aufgenommen. Mit Beginn dieses Jahres hat ein erster Master-Student mit der Bearbeitung einer der Fragestellungen aus diesem AP begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im ersten Arbeitspaket soll nach Abschluss der Etablierung der Differenzierungsprotokolle mit den Bestrahlungen der unterschiedlichen differenzierten Zelltypen begonnen und die Wahl des Reparaturweges bzw. der Beteiligung bestimmter Proteine an der Reparatur anhand von immunhistochemischen Färbungen begonnen werden. Die erzielten Ergebnisse sollen als Grundlage für die Analyse der *in vivo* Bestrahlungen des AP2 verwendet werden.

Im AP2 soll nach Genehmigung der Tierversuchsanträge mit den ersten Bestrahlungen von Mäusen, der Aufarbeitung von Gewebe und den immunhistochemischen Untersuchungen begonnen werden. Nach Genehmigung der Tierversuchs- und Tierhaltungsanträge, soll die Zucht der benötigten Knockout-Mäuse in Auftrag gegeben und anschließend deren Zucht im eigenen Tierstall etabliert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 034B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 899.352,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Laube	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Vorhabensziel dieses Projekts ist die Untersuchung der biologischen Wirkung geringer Dosen ionisierender Strahlung auf das sich entwickelnde Gehirn. Langfristig soll so eine verbesserte Risikoabschätzung für strahleninduzierte neurologische Spätfolgen sowie ein erweitertes Verständnis der molekularen Mechanismen der biologischen Strahlenantwort von neuronalen Stammzellen gewonnen werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Arbeitspaket 4: In dem vorliegenden Arbeitspaket (AP) wird der Einfluss ionisierender Strahlung auf die morphologische und funktionelle Ausbildung von Neuronen und neuronaler Netzwerke während der neuronalen Differenzierung von NSZ untersucht. Diese Untersuchungen sollen mit der Hilfe von *in vitro* kultivierten neuronalen Stammzellen durchgeführt werden, die zu den verschiedenen Zelltypen differenziert und zu verschiedenen Differenzierungsstadien bestrahlt werden. Hierfür werden ES-derivierte und primäre NSZ nach etablierten Protokollen *in vitro* zu Neuronen differenziert. Für die morphologischen und funktionellen Analysen werden die NSZ in verschiedenen Entwicklungsstadien mit unterschiedlichen Dosen bestrahlt und deren Effekte auf die Ausdifferenzierung der Neurone und der neuronalen Netzwerke elektrophysiologisch untersucht. Die Neuriten- und Synapsenbildung wird während der neuronalen Differenzierung quantitativ und qualitativ erfasst und anhand elektrophysiologischer Untersuchungen ein Entwicklungsprofil erstellt.

Arbeitspaket 8: Ziel des APs ist es, anhand verhaltensbiologischer Analysen bestrahlter Wildtyp Nestin-GFP Mäuse (embryonal bis postnatal) eine Risikoabschätzung niedriger Strahldosen für die Entwicklung des Gehirns zu ermöglichen. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen wird auf der Korrelation neurologischer Auffälligkeiten und von Defiziten im räumlichen Lernen mit dem Bestrahlungszeitpunkt liegen, um besonders strahlenempfindliche Phasen der Entwicklung des Gehirns zu identifizieren.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitspaket 4: Die für dieses AP geplante Stelle wurde zum 1.11.2014 mit Herrn Dr. Bastian Roth besetzt. Die für die *in vitro* Studien benötigte Differenzierung der neuronalen Stammzellen (J1-NSC) zu den unterschiedlichen Zelltypen des zentralen Nervensystems wurde etabliert. Darüber hinaus wurde mit den Differenzierungsprotokollen für die frisch isolierten Stammzellen aus der Subventrikulärzone begonnen. Mit Hilfe eines planaren Patch-Clamp Setups konnten die ersten Experimente zur Charakterisierung einer neuronalen Stammzelllinie (NSC) durchgeführt werden. Die aus der embryonalen Stammzelllinie J1 abgeleiteten NSCs wurden hierfür sowohl im undifferenzierten Zustand als auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Differenzierung vermessen. Die Zugabe spezifischer Ionenkanalblocker ermöglichte die Zuordnung der Stromantworten zu bestimmten Ionenkanalgruppen. Zusätzlich konnten Änderung bestimmter Leitfähigkeiten während der Differenzierung ermittelt werden.

Arbeitspaket 8: Die Stelle für dieses Arbeitsprojekt wurde zur Bewerbung ausgeschrieben und wurde ab dem 1.11.2014 mit Herrn Axel Klink besetzt. Seitdem wurde mit der Formulierung der für dieses AP nötigen Anträge für die Haltung der GFP-Nestin-Mauslinie und die *in vivo* Bestrahlung in unterschiedlichen Entwicklungsstadien begonnen. Parallel dazu wurden die Arbeiten zur Etablierung von immunhistochemischen Färbungen histologischer Schnitte von Mausgehirnen zur Untersuchung der Anatomie aufgenommen. Die notwendigen Materialien und Versuchsaufbauten zur Durchführung der geplanten Verhaltensexperimente akquiriert und die dazugehörigen Methoden etabliert. Für den Verhaltenstest muss noch eine passende „Video Tracking Software“ angeschafft werden, die es ermöglicht, automatisierte Verhaltensanalysen durchzuführen. Dahingehend wurden schon entsprechende Angebote angefordert und auch Demonstrationstermine und Beratungsgespräche zum Zwecke der Entscheidungsfindung vereinbart.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im AP4 soll nach Abschluss der Etablierung der Differenzierungsprotokolle für die primären NSZs mit den Bestrahlungen der unterschiedlichen differenzierten Zelltypen begonnen und die funktionelle elektrophysiologische Analyse begonnen werden. Die erzielten Ergebnisse sollen als Grundlage für die Analyse der *in vivo* Bestrahlungen des AP2 verwendet werden.

Im AP8 soll nach Genehmigung der Tierversuchsanträge mit den ersten Bestrahlungen von Mäusen, der ersten Verhaltensversuche und den immunhistochemischen Untersuchungen begonnen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 034C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 406.411,00 EUR	Projektleiter: Dr. Ritter	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Die wesentlichen wissenschaftliche Ziele des Projekts sind einerseits die Verbesserung der Risikoabschätzung für strahleninduzierte neurologische Spätfolgen und zum anderen ein erweitertes Verständnis der biologischen Strahlenantwort von neuronalen Stammzellen (NSZ). Hierzu wird ein großes methodisches Spektrum eingesetzt. Es reicht von der Charakterisierung der molekularen Mechanismen der Strahlenantwort auf Einzelzellebene über die Erfassung von Effekten auf das Gehirngewebe bis hin zur Bewertung längerfristiger neurologischer Folgen für den Organismus. Um diese Ziele zu erreichen, arbeiten am Forschungsvorhaben Partner mit ausgewiesener strahlen- bzw. neurobiologischer Expertise eng zusammen. Da es bisher nur wenige Daten zur Wirkung von dicht-ionisierenden Strahlen gibt, wird im Rahmen unseres Arbeitspaketes der Einfluss von Teilchenstrahlen (z. B. Kohlenstoff- oder Heliumionen) auf die neuronale Entwicklung näher untersucht. Als Modellsystem dienen murine NSZ, die auch von den anderen Verbundpartnern genutzt werden. Ergänzend sind Versuche mit humanen NSZ geplant. Zunächst soll untersucht werden, inwieweit dicht-ionisierende Strahlung die Fähigkeit von NSZ zur Selbsterneuerung und Differenzierung beeinflusst. Weiterhin sollen zytogenetische Untersuchungen durchgeführt werden, um nähere Informationen über die Genauigkeit der DNA-Reparaturprozesse nach einer Strahlenexposition zu erhalten. Da die Migration ein wichtiger Vorgang bei der Bildung des Nervensystems ist, soll die Fähigkeit der NSZ zu wandern in einem „Migrationstest“ gemessen werden. Für alle ausgewählten Endpunkte werden entsprechende Experimente mit Röntgenstrahlen durchgeführt. 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 mit interdisziplinärer Kompetenz in Strahlenforschung, Neurobiologie, Molekularbiologie und Verhaltensforschung. Weiterhin wird in Vorlesungen und Praktika um potenziellen wissenschaftlichen Nachwuchs geworben.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Das Verbundvorhaben wird von mehreren Arbeitsgruppen aus drei Einrichtungen, d. h. der Technischen Universität Darmstadt (TUD), dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI) und der Universitätsklinik Erlangen (UE) durchgeführt. Es beinhaltet die folgenden Arbeitspakete (AP):

- AP1: DSB-Reparatur in neuronalen Zellen in unterschiedlichen Differenzierungsstadien (TUD)
- AP2: Strahlenempfindlichkeit neuronaler Stammzellen *in vivo* (TUD)
- AP3: *Self-renewal* und Differenzierung neuronaler Stammzellen (TUD)
- AP4: Morphologie und Funktionalität sich entwickelnder Neurone und neuronaler Netzwerke (TUD)
- AP5: Einfluss von dicht-ionisierender Strahlung auf die neuronale Entwicklung *in vitro* (GSI)
- AP6: Analyse histomorphologischer Veränderungen im Gehirn von bestrahlten Mäusen (TUD)
- AP7: Physiologische Untersuchungen mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (UE)
- AP8: Verhaltensbiologische Untersuchungen bestrahlter Mäuse (TUD)

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Für die Projektarbeit wurde eine qualifiziert Nachwuchswissenschaftlerin (Postdoc) gewonnen. Sie nimmt ihre Tätigkeit am 1.1.2015 auf.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im Forschungsvorhaben sollen als Modellsystem murine NSZ eingesetzt werden, die aus embryonalen Stammzellen generiert wurden. Die embryonale Stammzelllinie soll zunächst im Hinblick auf ihre genetische Stabilität charakterisiert werden. Hierzu werden die Zellen vermehrt und Chromosomenpräparate nach ca. 10, 20 und 30 Populationsverdopplungen hergestellt und analysiert. Weiterhin sollen neuronale Differenzierungsprotokolle etabliert und validiert werden.

Für die Einfuhr von humanen embryonalen Stammzellen und ihre Verwendung (d. h. die neuronale Differenzierung) ist eine Genehmigung laut Stammzellgesetz erforderlich. Ein entsprechender Antrag soll erarbeitet und im Sommer 2015 zur Begutachtung vorgelegt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen		Förderkennzeichen: 02 NUK 034D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 30.06.2019	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 401.520,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Uder	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel dieses Projektes ist es, durch Kombination anatomischer und funktioneller Daten eine möglichst vollständige in vivo Struktur-Funktions-Charakterisierung des Mausgehirns nach Bestrahlung vorzunehmen. Wir nehmen hiermit eine nicht-invasive Risikoabschätzung strahleninduzierter neurologischer Spätfolgen am Mausmodell vor und zeigen unmittelbar eine translationale Perspektive für die Klinik auf. Die fMRT-Analyse soll funktionelle Veränderungen von Aktivitäten im Gehirn der in utero und postnatal zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Dosen bestrahlten Mäuse liefern. Diese Ergebnisse werden direkt mit den Ergebnissen aus den Verhaltensstudien (AP8) korreliert. Die hochaufgelösten MR Anatomien erfassen die Strukturveränderungen im Gehirn und dienen zunächst als Atlasreferenzsystem sowie zur direkten Integration der histologischen Untersuchungen (AP6). Hiermit können also Gehirnbereiche definiert werden, die funktionell und/oder strukturell Veränderungen aufzeigen und in denen man daher nach Effekten auf zellulär-molekularer Ebene suchen sollte.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Mit adulten Kontrolltieren sowie von Nek1 Mutanten, wird zunächst eine resting state Aufnahme und anschließend ein fMRT Experiment mit thermisch nozizeptiver Stimulation aufgenommen. Direkt im Anschluss wird nochmals eine resting state Aufnahme durchgeführt, um im Vergleich vor und nach nozizeptiver Stimulation, dynamisch-plastische Effekte der Änderungen der Verbindungsstrukturen im Gehirn zu untersuchen. Im Anschluss kann, je nach Befundlage von TP8 (Verhalten) eine Charakterisierung der anderen sensorischen Systeme in einem fMRT Experiment mit multimodaler Stimulation erfolgen. Abschließend wird eine höheraufgelöste Anatomie an den Positionen der funktionellen Bilddaten aufgenommen. Hiermit erheben wir den funktionellen Basisdatensatz pro Versuchstier. Andere Tierkohorten werden nach Manganapplikation und Durchführung der Verhaltenstests (AP8) mit besonderem Fokus auf den Hippocampus hochaufgelöst vermessen. Die Daten werden quantitativ, mit besonderem Fokus auf der Graphtheorie, ausgewertet und entsprechend visualisiert. Auf Ebene der Gruppenstatistik erfolgt synergetisch die Zusammenführung der Ergebnisse aus den anderen APs, insbesondere die zellulären in vivo Daten aus AP2, die Standardhistologie aus AP6 und die Verhaltensdaten aus AP8.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Aufgrund der noch nicht vorgenommenen Einstellung wurden noch keine Mittel aus dem Projekt bezogen; dementsprechend aber auch noch keine Arbeiten durchgeführt. Die Einstellung eines ersten Mitarbeiters soll für den 1.3.2015 erfolgen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die Arbeiten sollen, nach Einstellung eines Mitarbeiters, schnellstmöglich begonnen werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universität des Saarlandes, Campus, 66123 Saarbrücken	Förderkennzeichen: 02 NUK 035A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt A	
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014
Gesamtkosten des Vorhabens: 613.602,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Rube

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel dieses Forschungsverbundes ist es, durch den Nachweis spezifischer DNA Reparaturfoci (RF) biologische Marker für die individuelle Strahlenempfindlichkeit bzw. das individuelle Strahlenrisiko zu etablieren. Dementsprechend sollen in zusammenhängenden Untersuchungen die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die klinische Anwendung von RF geschaffen werden:

AP2: Akkumulation von RF nach Niedrig-Dosis-Bestrahlung

Im Rahmen einer protrahierten Niedrig-Dosis-Bestrahlung soll die Akkumulation von RF in verschiedenen Normalgeweben unter Verwendung von Mausstämmen mit unterschiedlicher Reparaturkompetenz untersucht werden. Insbesondere soll analysiert werden, in welchem Ausmaß DNA Schäden in den ausdifferenzierten Funktionszellen und gewebespezifischen Stamm- und Vorläuferzellen verschiedener Organgewebe nach repetitiver Strahlenexposition mit sehr niedrigen Dosen akkumulieren. Darüber hinaus sollen die biologischen Auswirkungen einer DNA Schadensakkumulation hinsichtlich Zellfunktion sowie die pathophysiologischen Konsequenzen einer wiederholten Strahlenexposition mit niedrigen Dosen hinsichtlich der Organfunktion analysiert werden.

AP4: Akkumulierte RF als Marker des Normalgeweberisikos

Bei Patienten mit Kopf-Hals-Tumoren soll untersucht werden, inwieweit unter einer Radiotherapie akkumulierende RF in Blutlymphozyten, Normal- und Tumorgewebe als Indikator für das individuelle Normalgeweberisiko bzw. Tumoransprechen genutzt werden können. Während der fraktionierten Radiotherapie soll die Akkumulation von RF in den Blutlymphozyten, den Normalgewebs- und Tumorzellen bestimmt und mit der Bestrahlungsdosis, dem Bestrahlungsvolumen, den individuell aufgetretenen Nebenwirkungen, der applizierten Chemotherapie sowie dem jeweiligem Therapieansprechen korreliert werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP2: DNA Reparatur-profiziente und -defiziente Mäuse werden täglich bis zu 10 Wochen mit niedrigen Dosen (100 mGy bzw. 10 mGy) bestrahlt. Nach 2, 4, 6, 8 bzw. 10 Wochen werden in den verschiedenen Organgeweben (Gehirn, Haut, Herz, Lunge, Niere, Testis) die RF sowohl in ausdifferenzierten Funktionszellen als auch in Gewebespezifischen Stammzellen (spermatogonische Stammzellen in Testis, epidermale Stammzellen der Haarbalgregion) ausgezählt und charakterisiert, um eine potentielle Akkumulation von DNA Schäden zu erfassen. Es sollen mögliche Unterschiede in der Akkumulation von RF in den verschiedenen Funktionszellen und insbesondere in den langlebigen Stamm-/Vorläuferzellen untersucht und zusätzlich mittels der Transmissions-Elektronen-Mikroskopie (TEM) charakterisiert werden.

AP4: Bei Patienten mit Kopf-Hals-Tumoren wird vor Therapiebeginn durch die Bestimmung von RF in ex-vivo bestrahlten Blutlymphozyten die individuelle DNA Reparaturkapazität und somit die Strahlenempfindlichkeit des einzelnen Patienten bestimmt. Während der fraktionierten Radiotherapie werden persistierende RF durch wöchentliche Blutanalysen bestimmt und die potentiell akkumulierenden RF mit der individuellen Reparaturkapazität eines Patienten (gemessen anhand prätherapeutisch gewonnener, in vitro bestrahlter Blutlymphozyten) korreliert. Auch soll geprüft werden, inwieweit die im Normal- bzw. Tumorgewebe akkumulierten RF mit der Normalgewebsreaktion bzw. dem Tumoransprechen korrelieren.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP2: Für dieses Teilprojekt wurde Frau Tanja Jene als naturwissenschaftliche Doktorandin eingestellt sowie zwei medizinische Doktoranden angeworben. Die neuen Mitarbeiter wurden in die verschiedenen tierexperimentellen Bestrahlungs- und Untersuchungstechniken eingearbeitet. Am Linearbeschleuniger erfolgte die tägliche Niedrig-Dosis-Bestrahlung der Mäuse mit 100 mGy bzw. 10 mGy über einen Zeitraum von 1-10 Wochen und die Versuchstiere wurden jeweils 24 h bzw. 72 h nach der letzten Strahlenexposition zur Organgewinnung getötet. Es erfolgt derzeit die Quantifizierung der RF in verschiedenen Organgewebe nach fraktionierter Niedrig-Dosis Bestrahlung zur Erfassung einer potentiellen Akkumulation von DNA Schäden. Um insbesondere eine potentielle Foci-Akkumulation in den neuronalen Stamm-/Vorläuferzellen der Hippocampusregion des juvenilen Mausgehirns zu analysieren, werden derzeit verschiedene Immunfluoreszenz-Färbungen etabliert.

AP4: Für dieses Teilprojekt wurde Frau Dr. Nadine Schuler als wissenschaftliche Mitarbeiterin eingestellt und zwei medizinische Doktoranden angeworben. Bei Patienten mit Kopf-Hals-Tumoren werden zurzeit vor und während der Radiotherapie Blutproben gewonnen, um RF in den in vitro bzw. in vivo bestrahlten Blutlymphozyten zu quantifizieren. In Kooperation mit der Firma MEDIPAN wird zusätzlich die automatisierte Foci-Analyse mit Hilfe des AKLIDES System erfolgen. Nach der Geräteaufstellung in unserem Labor erfolgt derzeit die Einweisung und Schulung unserer Mitarbeiter für die automatisierte Foci-Analyse.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP2: Weiterhin ist die molekulare Charakterisierung der akkumulierten RF durch die hochauflösende Transmissions-Elektronen-Mikroskopie geplant (Lokalisation im Euchromatin bzw. Heterochromatin; potentielle Kollokalisation mit weiteren Reparatur-Proteinen, etc.). Durch histomorphologische sowie immunhistochemisch- bzw. immunfluoreszenzmikroskopische Untersuchungen hinsichtlich Proliferation, Apoptose und Seneszenz sollen potentielle Gewebeveränderungen nach fraktionierter Niedrig-Dosis-Bestrahlung in den verschiedenen Organen analysiert werden.

AP4: Bei den Patienten mit Kopf-Hals-Tumoren sollen zusätzlich vor und während der Radiotherapie Normalgewebeprobe der Schleimhaut sowie Tumorproben asserviert werden. An diesen Gewebeprobe wird zunächst der spezifische Nachweis von RF etabliert, um eine potentielle DNA Schadensakkumulation nachweisen zu können. Im Rahmen der 3D-Bestrahlungsplanung werden Dosis-Volumen-Histogramme berechnet, auf dessen Grundlage individuell für jeden Patienten die applizierte Bestrahlungsdosis im interessierenden Bestrahlungsvolumen ermittelt werden kann. Während und nach der Radiotherapie werden bei diesen Patienten das Auftreten und das Ausmaß therapiebedingter Nebenwirkungen sowie das Tumorsprechen mittels klinischer, serologischer und bildgebender Untersuchungen erfasst.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Grewenig A., Schuler N., Rube C.E.: Persistent DNA damage in spermatogonial stem cells after fractionated low-dose irradiation of testicular tissue. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, submitted

Zuwendungsempfänger: Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Martinistr. 52, 20251 Hamburg		Förderkennzeichen: 02 NUK 035B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 820.920,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Dikomey	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel der beiden Projekte AP3 und AP6 ist es Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit zu etablieren sowie Reparaturfoci als Marker der genomischen Instabilität bzw. der homologen Rekombination zu etablieren.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP3:

Versuch V3.1: Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit

AP6:

Genomische Instabilität von Tumorzellen

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP3, V3.1:

Im Sinne des Arbeitspaketes sollen für Tumorzellen und da insbesondere Prostatazelllinien (LNCaP, PC-3, Du145) sowie den Linien (HeLa, H1299, A549) neben den γ H2AX-Foci weitere Reparaturfoci etabliert werden.

- Diese Etablierung konnte jetzt für folgende DSB-Reparaturproteine abgeschlossen werden: RPA, 53BP1, P-ATM, P-DNA PKcs, RAD51.
- Für ATM wurde eine bisher unbekannte Bedeutung in späteren Schritten der Homologen Rekombination identifiziert. Es zeigte sich, dass ATM auch am Abbau der RAD51-Foci beteiligt ist.
- Diese Etablierung konnte zusätzlich durch Markierung mit EdU bzw. CenpF in Abhängigkeit der Zellzyklusphase dargestellt werden.
- Für verschiedene Reparaturfoci wurde eine erste automatisierte Messung getestet.

AP6, V6.1:

Im Sinne des Arbeitspaketes sollen für verschiedene Tumorzellen und hier insbesondere für Mamma- und HNSCC-Zelllinien Marker für die genomische Instabilität etabliert werden.

- Sowohl für jeweils 10 Mamma- als auch 10 HNSCC-Zelllinien konnte mit Hilfe eines Reparaturplasmids die Effektivität der Homologen Rekombination (HR) bestimmt werden. Hierbei zeigte sich eine große Streuung. Diese Streuung korreliert nicht mit der Menge an RAD51, welches das Schlüsselprotein der HR ist.
- Untersuchungen mittels DNA Fiber-Assays zeigten deutliche Unterschiede nach Bestrahlung in HR-kompetenten und HR-Defizienten Zelllinien.
- Unterschiede in den replikativen Prozessen lassen sich auf Unterschiede in der Rekrutierung von DNA-Reparaturproteinen zurückführen und zeigten eine unterschiedlich deutliche Aktivierung von CHK1.
- Die Daten weisen darauf hin, dass die mangelnde Aktivierung von CHK1 nach DNA-Schädigung ein idealer funktioneller Parameter für eine erhöhte genomische Instabilität sein könnte.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP3, V3.1:

Mit diesem Teil des Projekts soll letztendlich je nach Zellzyklus der beste Marker für die individuelle Strahlenempfindlichkeit etabliert werden.

AP6, V6.1:

Mit diesem Teilprojekt soll letztendlich der ideale Marker für die genomische Instabilität identifiziert werden. Es soll insbesondere überprüft werden, ob die Phosphorylierung von CHK1 ein geeigneter Parameter für das Risiko einer genomischen Instabilität sein könnte.

5. Berichte, Veröffentlichungen

A. Bakr, C. Oing, S. Köcher, K. Borgmann, I. Dornreiter, C. Petersen, E. Dikomey and W. Mansour: Involvement of ATM in homologous recombination after end resection and RAD51 nucleofilament formation. Nucl Acids Res, 2015, in revision.

A.C. Parplys, J.I. Seelbach, S. Becker, M. Behr, A. Wrona, C. Jend, W.Y. Mansour, S. Joosse, H.W. Stuerzbecher, H. Pospiech, C. Petersen, E. Dikomey, K. Borgmann: High level of RAD51 perturbs the DNA replication elongation response and unscheduled origin firing due to impaired CHK1 activation. Cell Cycle under review.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden		Förderkennzeichen: 02 NUK 035C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 213.756,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Baumann	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel des Vorhabens ist es, durch den Nachweis von spezifischen DNA-Reparaturfoci (RF) biologische Marker für die individuelle Strahlenempfindlichkeit bzw. das individuelle Strahlenrisiko zu etablieren. Dazu soll eine zusammenhängende Untersuchung verschiedener Aspekte in der Anwendung von RF vorgenommen werden.

Ein Bezug zu anderen Arbeitsprojekten (AP) besteht wie folgt:

AP5.1 - AP6 bzgl. zellulärer Strahlenempfindlichkeit der HNSCC (Borgmann, Mansour, UKE2)

AP5.2 - AP4 bzgl. ex vivo Bestrahlung von Gewebebiopsien (Fleckenstein, Rube, UKS2)

AP5.3 - AP7 bzgl. Automatisierung der RF-Detektion (Fritz, Roggenbuck, MED)

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

In Dresden erfolgt die Bearbeitung des AP5: RF als potentielle Marker der Tumorstrahlenempfindlichkeit. Unter Nutzung von an der Technischen Universität Dresden etablierten und gut charakterisierten humanen Tumormodellen sowie einer histologischen, Mikromilieu-korrigierten semiautomatisierten Bildanalyse wird das Potential der RF als Biomarker für die Prädiktion der Strahlenempfindlichkeit von Tumoren in vivo bestimmt. Die Methodik wird dabei für den Einsatz an menschlichen Tumorbiopsien sowie für den Hochdurchsatz (High Throughput) weiterentwickelt und validiert, um zukünftig die lokale Tumorkontrolle besser vorhersagen zu können und mögliche Strahlenschäden an gesundem Gewebe einzusparen.

AP5.1: Prädiktion der Strahlenempfindlichkeit von Tumoren

An zehn Tumormodellen wird die Anzahl der DNA-RF/Zelle nach Bestrahlung von Tumoren in vivo mittels histologischer, Mikromilieu-korrigierter semiautomatisierter Bildanalyse ermittelt und mit vorhandenen Ergebnissen zur Tumorkontrollwahrscheinlichkeit korreliert.

AP5.2: Etablierung eines Klinik-relevanten ex vivo Assays

An Tumorbiopsien soll ein standardisierter und in der klinischen Routine einfach anwendbarer ex vivo Assay zur Bestimmung der intrinsischen Strahlenempfindlichkeit mittels DNA-RF etabliert werden.

AP5.3: Entwicklung einer „High Throughput“ Methodik

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Medipan GmbH (AP7) soll ein Verfahren zur automatischen Quantifizierung von RF entwickelt werden, welches an den in AP5.1 und AP5.2 erstellten Bilddateien validiert wird.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Stelle des wissenschaftlichen Mitarbeiters mit der Möglichkeit zur Promotion wurde zum 15.01.2015 besetzt.

AP5.1: Prädiktion der Strahlenempfindlichkeit von Tumoren

Erste tierexperimentelle Arbeiten (Aktenzeichen 24-9168.11-1/2013-12) sind durchgeführt. Zwei von zehn Tumormodellen sind immunhistologisch/Immunfluoreszenz gefärbt und mikroskopische Bildaufnahmen wurden erstellt. Die Bildanalyse erfolgt verblindet.

AP5.2: Etablierung eines Klinik-relevanten ex vivo Assays

Die tierexperimentellen Arbeiten (Aktenzeichen 24-9168.11-1/2012-51) für drei von zehn Tumormodellen sind abgeschlossen. Die Tumorproben sind immunhistologisch/Immunfluoreszenz gefärbt und mikroskopische Bildaufnahmen wurden erstellt. Die Bildanalyse erfolgt verblindet. Ein zusätzlicher Tierversuchsantrag für sieben weitere Tiermodelle ist verfasst und bei der Tierschutzkommission eingereicht.

AP5.3: Entwicklung einer „High Troughput“ Methodik

Im Berichtszeitraum haben vier Projekttreffen zwischen Medipan und dem UKD stattgefunden. Dem Projektpartner Medipan wurden Bilddateien zur Verfügung gestellt.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP5.1: Prädiktion der Strahlenempfindlichkeit von Tumoren

Die tierexperimentellen Arbeiten sowie die histologischen Untersuchungen werden fortgeführt. Nach vollständiger Analyse aller Proben erfolgten die Entblindung und die Korrelation der Ergebnisse mit Daten zur Tumorkontrollwahrscheinlichkeit.

AP5.2: Etablierung eines Klinik-relevanten ex vivo Assays

Nach Erteilung der Tierversuchsgenehmigung werden die tierexperimentellen Arbeiten sowie die histologischen Untersuchungen fortgeführt. An Tumorbiopsien werden die Dosis- und die Zeit-abhängige DNA-Reparatur anhand von RF untersucht.

AP5.3: Entwicklung einer „High Troughput“ Methodik

Die Projekttreffen und der Austausch von Bilddateien insbesondere aus AP5.1 und AP5.2 soll fortgeführt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter		Förderkennzeichen: 02 NUK 035D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 266.628,00 EUR	Projektleiter: Dr. Gomolka	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das Ziel dieses Forschungsverbundes ist es, durch den Nachweis spezifischer DNA Reparaturfoci (RF) biologische Marker für die individuelle Strahlenempfindlichkeit bzw. das individuelle Strahlenrisiko zu etablieren. Dementsprechend sollen in zusammenhängenden Untersuchungen die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die klinische Anwendung von RF geschaffen werden.

Der Projektteil D ist Teilprojekt eines Verbundes bestehend aus 8 Arbeitspaketen, welcher von der Universität des Saarlandes koordiniert wird und von Projektpartnern aus Wissenschaft und Industrie in München (BfS), Homburg/Saar (Uni Saarland), Hamburg (Uni Hamburg) und Dresden (Uni Dresden, Firma Medipan) bearbeitet wird:

- AP1: RF als Marker einer chronischen Strahlenexposition
- AP2: Akkumulation von RF bei Niedrigdosis-Bestrahlung
- AP3: RF als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit
- AP4: Akkumulation von RF in der Strahlentherapie
- AP5: RF als Marker der Tumorstrahlenempfindlichkeit
- AP6: RF als Marker einer genomischen Instabilität
- AP7: Automatisierung der RF-Detektion
- AP8: Qualitätsmanagement

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1 (BfS): RF als Marker einer chronischen Strahlenexposition

Es ist zu klären, ob eine chronische Strahlenexposition zu einer Akkumulation von spezifischen RF führt und außerdem die Induktion von DSB und deren Reparatur verändert. Als Untersuchungskollektiv stehen kryokonservierte Lymphozytenproben von nach Alter und Rauchen angeglichenen 300 hoch (Working Level Month > 750) und 100 niedrig (WLM < 50) exponierten Bergarbeitern zur Verfügung. Die Strahlenexposition wurde durch eine Job-Exposure Matrix abgeschätzt. In einem Teilkollektiv dieser Biobank wird die Strahlenexposition durch chromosomale mFISH-Analyse von 75 repräsentativen Probanden verifiziert. Hierbei werden chromosomale Aberrationen wie Translokationen und dizentrische Chromosomen untersucht. Im gleichen Teilkollektiv werden verschiedene RF analysiert, wie z. B. gammaH2AX, ATM, 53BP1, RAD51.

- Versuch 1 (V1.1): Akkumulation von RF
Nachweis von verschiedenen RF in einem Kollektiv von 75 gut charakterisierten hoch und niedrig exponierten Bergarbeitern.
- Versuch 2 (V1.2): Adaption nach chronischer Exposition
Auswirkung der chronischen Strahlenexposition auf die Zahl der durch in-vitro-Bestrahlung erzeugten Schäden und deren Reparatur.
- Versuch 3 (V1.3): Validierung der in vivo Strahlenexposition mittels mFISH, Vergleich mit RF-Daten

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Die Stellenbesetzung für den Doktoranden wurde im Dezember ausgeschrieben. Das Bewerbungsverfahren läuft zurzeit. Es ist geplant, die Stelle im März/April zu besetzen.

Im Berichtszeitraum fand ein Projekttreffen in Frankfurt statt. An diesem Treffen nahmen vom BfS Dr. Gomolka, Dr. Hornhardt und Dr. Rössler teil. Hier wurden die geplanten Arbeiten für das AP1 vorgestellt und weitere Zusammenarbeit zum Technikaustausch, wie z. B. mFISH-Analyse in Strahlentherapiepatienten, diskutiert.

V1.1: Ein Überblick zu verschiedenen RF wurde erstellt. Es wurden vorerst gammaH2AX, 53BP1, ATM und ein neuer Proteinmarker MCM7 für erste Etablierungsversuche ausgewählt.

V1.2: Mit der mFISH Charakterisierung der 75 Wismut Probanden wurde begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

Die geplante Weiterarbeit erfolgt nach dem Arbeitsprogramm.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Medipan GmbH, Ludwig-Erhard-Ring 3, 15827 Dahlewitz		Förderkennzeichen: 02 NUK 035E
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt E		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2014 bis 31.12.2018	Berichtszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 723.729,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Roggenbuck	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Ziel des Vorhabens ist die automatisierte Erkennung und Auswertung von DNA-Reparaturfoci (RF) zur Bearbeitung großer Probenmengen mittels des AkliDes-Systems. Dies beinhaltet die Entwicklung und Testung von Software sowie die Beschleunigung des Analyseablaufs im Vergleich zur manuellen Auswertung. Schwerpunkt ist die Analyse von DNA-Doppelstrangbrüchen in Lymphozyten mittels gammaH2AX. Gemeinsam mit dem Partner BfS (AP1) geht es um Vergleichsuntersuchungen von Proben nach low-dose Strahlenbelastungen bei Bergarbeitern. Der Partner UKE (AP3+AP6) wird in seinen Vorhaben untersucht, welche Marker zur Erkennung der individuellen Strahlenempfindlichkeit besonders geeignet sind. Die Marker mit dem größten Potenzial sollen bevorzugt in die Software des AkliDes Nuk-Systems implementiert werden. In Zusammenarbeit mit dem Partner OncoRay (AP5) soll die Automatisierung des Nachweises von RF im Tumorgewebe etabliert werden.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP7.1: Analyse von Blutlymphozyten charakterisierter Spender für die Testung von: Reproduzierbarkeit, Stabilität, Sensitivität, Spezifität für den Nachweis von RF
Bestimmung der optimalen Ausgabeparameter
Validierung durch Lymphozytenarray und Proben chronisch exponierter Bergarbeiter (AP1)
- AP7.2: Automatisierung des Nachweises verschiedener RF für Tumorklinien (AP6)
Anwendung bei individueller Strahlenempfindlichkeit und genomischer Instabilität
- AP7.3: Automatisierung des RF Nachweises für Tumorgewebeschnitte (AP5) und für Tumorkarray (AP6)
Implementierung und Testung verschiedener Ausgabeparameter

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Für die äquivalente Abarbeitung der Laborarbeiten wurden die Färbeprotokolle mit den entsprechenden Projektpartnern ausgetauscht und angepasst. Ebenso wurden die zu verwendenden Trägermaterialien abgesprochen. Weiterhin wurde die Lymphozytenisolation im Labor etabliert.

Schwerpunktmäßig wurde die Software zur Bilderzeugung entwickelt. Diese beinhaltet die Möglichkeit zur nutzerdefinierten Auswahl wie viele Bilder und Zellen aufgenommen werden sollen, das Definieren der Aufnahmeflächen durch Implementierung eines Messrasters und die Auswahl der passenden Objektive und Filter. Das automatische Anfahren des Probenstisches in der x- und y-Ebene sowie die korrekte Fokussierung in der z-Ebene waren ebenso Bestandteil der neuen Software. Diese berechnet unter Nutzung einer objektiven internen Qualitätskontrolle auch die nötige Belichtungszeit für die jeweiligen Marker, so dass die Bilder weder unter- noch überbelichtet sind. Die Fluoreszenzmuster der verwendeten Marker und ein Überlagerungsbild aller Marker werden dann von der angeschlossenen Kamera aufgenommen und in einem separaten Ordner gespeichert.

Zwischen dem UKD (AP5) und MEDIPAN gab es mehrere Projekttreffen. MEDIPAN wurden Bilddateien aus vorangegangenen Projekten zur Verfügung gestellt. Gemeinsam wurden die wesentlichen Merkmale der verschiedenen Zelltypen, Färbeeigenschaften, Ausschlusskriterien von Artefakten und die korrekte Erkennung von auswertbaren Zellen erarbeitet.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach der Implementierung der Algorithmen zur Bilderzeugung in die Aklides-Software soll im nächsten Schritt die Entwicklung der notwendigen Algorithmen zur Bildverarbeitung erfolgen. Im DAPI-Kanal sollen die Zellkerne anhand der Größe, Färbung, Intensität, Kontur und Textur bestimmt und ausgewählt werden. Im Überlagerungsbild sollen dann innerhalb der ausgewählten Zellkerne die Intensität und die Größe der Foci bestimmt werden.

Die Software soll schließlich nach den Vorgaben der Projektpartner weiter optimiert werden. Hierzu werden neue Parameter für zusätzliche Marker hinzugefügt, die von den Partnern als aussichtsreich angesehen werden. Zur Testung sollen Lymphozyten von charakterisierten Spendern (AP1) mittels des Aklides-Systems analysiert werden.

Des Weiteren sollen die Projekttreffen und der Austausch von Bilddateien mit AP5 fortgeführt werden sowie die Hardware- und Softwareentwicklung auf die Aufnahme und Analyse histologisch gefärbter Tumorproben gerichtet werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Projekttreffen:

1. Gesamtverbundtreffen, Präsentation des Arbeitsprogramms AP7: Automatisierung der RF-Detektion, Dorian Sartorius, 20.11.2014, Frankfurt/Main, Vortrag

Zuwendungsempfänger: Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg		Förderkennzeichen: 02 NUK 036A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebs- entstehung und Alterung, Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2019	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 944.454,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Boukamp	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das solare Spektrum enthält unterschiedliche Spektrale Komponenten: UVA, -B, sichtbares Licht (VIS) und Infrarot (IR), die jeweils ein unterschiedliches biologisches Wirk- und Schädigungsprofil aufweisen. Für das Verständnis der schädlichen Wirkung für den Menschen und für eine daraus resultierende relevante Risikoabschätzung ist es essentiell, die kombinierte Aktion von UV- bis IR-Strahlung in ihrer biologischen Wirksamkeit in Modellsystemen der Haut zu untersuchen. Durch die Analyse unterschiedlicher Parameter in 2D- wie auch speziellen Gewebe-relevanten 3D organotypischen Kulturen zur Identifizierung und Langzeitregeneration der epidermalen Stammzellen und der in vivo Mauhaut soll es möglich werden, die Wirkmechanismen kombinierter Strahlung auf zellulärer und (epi)genetischer Ebene aufzuklären.

Generelles Untersuchungsprogramm: Dafür wird eine kombinierte und bezüglich UVA und –B Strahlenintensität variable Strahlenquelle für alle AGs entwickelt. Die Forschungsschwerpunkte der Verbundpartner sind: Gewebe- und Telomerlängenregulation (AG1), epigenetische Kontrolle zellulärer Funktionen auf DNA- bzw. Histonebene (AG2), IR-Signaling, Mitochondrienintegrität und AhR-Signaling (AG3), DNA Reparatur und Damage-Signaling (AG4). Die enge Zusammenarbeit der interdisziplinär aufgestellten AGs schafft Synergieeffekte, die neben der wissenschaftlichen Diskussion den Austausch von Methoden und Materialien, gemeinsame Publikationen sowie die Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern betreffen.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Im Teilprojekt A werden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- 2.1: Führt chronische Kombinationsbestrahlung mit UV-VIS-IR zur tumorigenen Transformation der HaCaT Zellen?
 - 2.1.1: Kommt es zu einem anderen genetischen Profil als nach UVA-Strahlung?
 - 2.1.2: Kommt es zur tumorigenen Transformation?
 - 2.1.3: Korreliert die Tumorigenität mit invasivem Wachstum?
 - 2.1.4: Hat die Kombinationsbestrahlung Auswirkung auf die Telomerlängenregulation?
- 2.2: Welche Rolle spielt die Gewebeorganisation für das Schadensprofil durch eine Kombinationsbestrahlung?
 - 2.2.1: Kommt es zu Störungen in der Gewebsorganisation und Differenzierung?
 - 2.2.2: Reguliert Kombinationsstrahlung die Proliferation bzw. induziert Apoptose?
 - 2.2.3: Welche Schadenssignalkaskade wird induziert?
 - 2.2.4: Hat dies Auswirkungen auf die Telomerlängenregulation in der Epidermis und/oder Dermis?
- 2.3: Welche Rolle spielen Alters-abhängige Veränderungen in der dermalen Matrix auf das epidermale Schadensprofil nach Kombinationsbestrahlung?
 - 2.3.1: Welche Auswirkung hat die Interaktion der Epidermis mit „alten“ Fibroblasten auf die Induktion von Strahlenschäden durch UV-VIS-IR Strahlung (Mittagssonne)?
- 2.4.2: Induziert die Kombinationsstrahlung Veränderungen in alten Fibroblasten (Age-OTKs), die die Invasivität prämaligener Zellen (HaCaT) fördert?
- 2.4: Welche Rolle spielen off Target Effekte der Immunsuppressiva für die Entstehung von UV-induzierten Hautcarcinomen?

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zu 2.1: A) Ein wesentlicher Aspekt der Analysen ist, zu ermitteln, ob die Schädigung durch die Kombinationsbestrahlung zur tumorigenen Konversion führt. Ein wichtiger Schritt in der tumorigenen Konversion ist die Invasion der Epithelzellen in das darunterliegende Stroma. Dieses ist in unseren Scaffold-basierten OTKs nicht in vivo getreu reproduzierbar, da die Tumorzellen entlang der Scaffold Fasern wandern. Wir haben deshalb ein neues Scaffold-freies OTK Tumor-Invasionsmodell etabliert (fdmOTK), das vorwiegend für die Untersuchungen eingesetzt werden soll. Während die Eignung dieses Modells für die generelle Kultivierung von Tumorzellen bereits verifiziert werden konnte (Berning et al., *subm.*), wurden dann weitere Versuche zur Einsatzmöglichkeit dieser fdmOTKs für die Kombinations-Bestrahlungsexperimente getestet. Hierfür wurden fdmOTKs mit UVA+B (akut) und chronisch (s. u.) bestrahlt und mögliche morphologische Veränderungen in der Histologie untersucht.

Bei der akuten Bestrahlung von NHEK wurden unterschiedliche Dosen getestet. Unerwarteterweise waren bei allen bestrahlten Kulturen (selbst bei niedrigster Bestrahlungsdosis) die Fibroblasten massiv geschädigt. Da die unbestrahlten Kulturen keine Schädigung zeigten, bleibt der Grund hierfür unklar und wird durch ein Wiederholungsexperiment ermittelt.

Für den Ansatz der chronischen Bestrahlung wurden NHEK, HaCaT und HaCaT-ras A-5 Zellen 2 bzw. 1 Woche nach Aussaat der Keratinozyten für 4 bzw. 3 Wochen mit 5 J/cm^2 UVA + 6.25 mJ/cm^2 UVB 3 x/Wo. bestrahlt.

Zu 2.4: A) Um die Konsequenz von Cyclosporin A auf die genomische Stabilität der Zellen zu testen, wurden HaCaT (prämaligene-) und SCL-I (maligne Tumor-) Zellen mit Cyclosporin A behandelt (9 Wochen) und die Zellen zur genetischen Analyse gegeben (Kooperation mit Prof. Anna Jauch, Humangenetik Heidelberg).

B) Immunsuppression durch die Behandlung mit Cyclosporin A führt zur „Carcinomatous Catastrophe“ mit oft einer Vielzahl von Hautcarcinomen in UV-exponierten Hautbereichen. Um primär die Rolle von Cyclosporin A auf die Keratinozyten zu testen, wurden Keratinozyten unterschiedlichen Tumorigenitätsgrades in OTKs mit Cyclosporin A ($1 \mu\text{g/ml}$) behandelt und eine histologische Analyse nach 3 und 5 Wochen Behandlung durchgeführt. Diese Versuche zeigten, dass Cyclosporin A in diesem in situ ähnlichen System offensichtlich keinen Effekt auf normale humane Keratinozyten (2 versch. Zellstämme) hat. In jedem Fall wurde eine gut stratifizierte und differenzierte Epidermis ausgebildet. Die malignen SCL-I und SCC-12 Zellen wuchsen wie in den Kontrollen stark invasiv und die Invasion wurde durch Cyclosporin A Behandlung weder verstärkt noch vermindert. Dagegen wurden die prämaligen HaCaT Zellen und deren benigne tumorigene Variant (HaCaT-ras A-5) eindeutig durch die Behandlung mit Cyclosporin A beeinflusst. In den HaCaT Zellen kam es zu erhöhter Proliferation und Migration in konventionellen 2D Kulturen und einem dickeren und langlebigeren Epithel in der OTK. Da sich Letzteres aber erst nach mehreren Wochen ausprägte, kommt es „in vivo“ wahrscheinlich nicht zu einer erhöhten Proliferation, vielmehr scheint die Differenzierung verlangsamt und die Apoptoserate vermindert. Die HaCaT-ras A-5 Zellen, die zusätzlich das ras Onkogen enthalten, zeigten keine Proliferations-Induktion in 2D aber in der OTK bildeten auch diese Zellen ein verdicktes und weniger differenziertes Epithel und es war auch eine beginnende Invasion zu beobachten.

C) Da die Hautcarcinome in den Immunsupprimierten Patienten überwiegend in Sonnen-exponierten Bereichen auftreten, scheint UV Strahlung bei der „Carcinomatous catastrophe“ eine wichtige Rolle zu spielen. Deshalb wurde auch die kombinierte Behandlung (Cyclosporin A [$10 \mu\text{g/ml}$] plus chronische UVA+B Bestrahlung [$5 \text{ J/cm}^2//6.25 \text{ mJ/cm}^2$ 3 x/Woche für 3 Wochen) untersucht.

4. Geplante Weiterarbeiten

Zu 2: Bereitstellung der HaSKpw (spontan immortalisierte humane Keratinozyten mit Wildtyp p53) Zellen für alle Gruppen. Diese Zellen sind aufgrund des normalen p53 Status besonders geeignet, Strahlungsbedingte Schädigung/Aktivierung durch die Strahlenbehandlung zu erkennen. Erste Evaluation des Prototyps der Gesamtspektrum Lampe.

Zu 2.1: Wiederholungsexperiment zur Analyse der Fibroblastentoxizität durch Bestrahlung mit unterschiedlichen UV Dosen und Analyse der Telomerlängenregulation in der „Dermis“. Molekulare Auswertung (Proliferation, Damage-Response, Differenzierungsdefizienz, Apoptose, Telomerlänge) der chronisch bestrahlten OTKs mit NHEK, HaCaT und HaCaT-ras A-5 Zellen.

Zu 2.4: Auswertung der genetischen Analysen der Langzeit Cyclosporin A-behandelten HaCaT und SCL-I Zellen. Molekulare Analysen der Cyclosporin-behandelten OTKs speziell für Schädigung (CpD), Apoptose-Differenzierungs- und Proliferations-Analysen sowie Nachweis von Deregulation spezieller Pathways (MAPK-TGF β /Smad Pathway).

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Elbe Kliniken Stade-Buxtehude GmbH, Bremervörder Str. 111, 21682 Stade		Förderkennzeichen: 02 NUK 036B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2019	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 811.400,00 EUR	Projektleiter: Dr. Greinert	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der Zusammenhang der einzelnen spektralen Komponenten im solaren Spektrum ist komplex und im Einzelnen nicht verstanden. Durch den Einsatz der Kombinationsstrahlung soll besser verstanden werden, wo Unterschiede zur Einzelbestrahlung auftreten und Erkenntnisse gewonnen werden, wie sich solare Strahlung in ihren biologischen Effekten von eher „artifizierender“ Einzelbestrahlung unterscheiden kann. Ziel der Arbeiten ist es, die Bedeutung von zellulären Antworten und Reparaturprozessen für die Hautkrebsentstehung nach Induktion von UV-Schäden durch Kombinationsstrahlung (UV-VIS-IR) im Detail zu erforschen. Dazu ist es notwendig, (i) die Schadensinduktion und im besonderen Maße die nachfolgende DNA-Reparatur nach Kombinationsstrahlung im Vergleich zu anderen UV-Strahlenqualitäten (UVA und UVB) zu untersuchen; (ii) unterschiedliche Expositionsmuster (chronisch vs. akut) miteinander zu vergleichen; (iii) UV-VIS-IR-induzierte epigenetische Veränderungen in „nativem Material“ und in Zelllinien aus Tumormaterial zu charakterisieren; (iv) molekulare und zelluläre Antwort mittels Ausschalten oder Aktivierung von Schlüsselfaktoren zu beeinflussen. Es ist das Ziel, bei den Punkten (i) – (iv) insbesondere den Einfluss von microRNAs und epigenetischen Faktoren (DNA-Methylierung, Histon-Methylierung) zu bestimmen.

In Kooperation mit AG1 (Heidelberg) werden Zellkulturproben (humane Keratinozytenzelllinie) und OTKs (organotypische Kultur) untersucht, die mit einer chronischen oder akuten Kombinationsbestrahlung behandelt sind. In Kooperation mit AG3 (Düsseldorf) werden Schadeninduktion und Reparatur der in vivo mit UV-VIS-IR bestrahlten Mausproben untersucht. Die Messungen zu Reparaturkinetiken und Histonmodifikationen werden eng mit AG4 (Darmstadt) koordiniert.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Untersuchung der epigenetischen Veränderungen (z. B. globale DNA-Methylierung, Promotor-Methylierung oder Histonmodifikationen) und der Expressionsänderungen von microRNAs nach chronischer oder akuter Bestrahlung mit einer UV-VIS-IR Kombinationsbestrahlung.
- AP2: Charakterisierung der epigenetischen Veränderungen in „nativem Material“ und in Zelllinien aus Tumormaterial.
- AP3: Untersuchung welche Faktoren und Mediatoren nach UV-VIS-IR auftretende epigenetische Modifikationen bewirken.
- AP4: Messung von Reparaturkinetiken nach Kombinationsbestrahlung.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitspaket 2: Analyse der Promotormethylierung und Transkription von onkogenen miRNAs (Onco-miR) und Tumorsuppressor-miRNAs in unterschiedlichen MET/SCC-Linien. Ergebnisse: Für die Untersuchung wurden sieben SCC-Zelllinien verwendet. Drei der verwendeten Linien (MET-1, MET-2 und MET-4) stammen aus einer Reihe von epidermalen SCCs eines einzigen Patienten. Die weiteren vier Linien (SCL-I, SCL-II, SCC-12 und SCC-13) wurden aus Biopsieproben von Primärtumoren unterschiedlicher Spender angelegt. Zunächst wurde die Expression der microRNAs miR-21-5p (Onco-miR), miR-29c-3p (Tumorsuppressor), miR-203a (Hautausdifferenzierung/Tumorsuppressor), miR-124-3p (Tumorsuppressor) und miR-214-3p (Tumorsuppressor), welche entweder auf UV-Strahlung reagieren oder in der Karzinogenese involviert sind, mittels qPCR untersucht. Eine starke Überexpression (~ 5-fach) von miR-21-5p (Onco-miR) konnte in allen 3 MET-Linien detektiert werden. Auch in SCL-I konnte eine leichte Erhöhung der miR-21-5p-Expression (~ 2-fach) beobachtet werden. Ein sehr starker Rückgang der Expression (bis zu ~ 10-fach Repression) von miR-203a (Tumorsuppressor) konnte bei allen Linien außer SCC-13 gemessen werden. Während miR-21-5p und miR-203a ein hohes Grundexpressionsniveau zeigten, wurden miR-29c-3p, miR-124-3p und miR-214-3p generell schwach exprimiert. Die ersten Ergebnisse deuten an, dass sie in einigen der Linien auch abweichend exprimiert sind. Um eine zuverlässigere Aussage über die Expression von miR-29c-3p, miR-124-3p und miR-214-3p in MET/SCC-Linien treffen zu können, werden noch weitere Messungen benötigt. Bei der Frage, ob die Expression der untersuchten miRs selbst auch durch epigenetische Modifikationen reguliert sind, wurde der Status der Promotormethylierung untersucht. Ergebnisse dafür liegen noch nicht vor.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Untersuchung der epigenetischen Veränderungen (z. B. globale DNA-Methylierung, Promotor-Methylierung) und der Expressionsänderungen von microRNAs nach akuter Bestrahlung mit einer UV-VIS-IR Kombinationsbestrahlung.
- AP2: Bestimmung der Promotormethylierung von microRNAs und Messung der globalen Methylierung (z. B. durch Analyse des prozentualen Methylierungsgrades in der repetitiven LINE1 Sequenz mittels Pyrosequenzierung) in den MET/SCC-Linien. Erweiterte Expressionsanalyse von microRNAs in MET/SCC-Linien.
- AP4: Messung der Schadensinduktion und von Reparaturkinetiken nach der Kombinationsbestrahlung in humanen Keratinozyten. Messung der Viabilität der Zellen nach der Kombinationsbestrahlung mit humanen Keratinozyten.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf		Förderkennzeichen: 02 NUK 036C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2019	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 602.574,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Krutmann	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das solare Spektrum der Sonne enthält unterschiedliche spektrale Komponenten: UVA, UVB, sichtbares Licht (VIS) und Infrarot (IR), die jeweils ein sehr unterschiedliches biologisches Wirk- und Schädigungsprofil aufweisen. Für das Verständnis der schädlichen Wirkung für den Menschen und für eine daraus resultierende relevante Risikoabschätzung ist es essentiell, die kombinierte Aktion von UV- bis IR-Strahlung in ihrer biologischen Wirksamkeit in Modellsystemen der Haut zu untersuchen. Durch die Analyse unterschiedlicher Parameter in 2D- wie auch in speziellen, Gewebe-relevanten 3D-organotypischen Kulturen (OTKs) zur Identifizierung und Langzeitregeneration der epidermalen Stammzellen und der in vivo Maushaut soll es ermöglicht werden, die Wirkmechanismen kombinierter Strahlung auf zellulärer und (epi)genetischer Ebene aufzuklären.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Führt die Kombinationsbestrahlung in primären dermalen Fibroblasten zu einer Beeinflussung der mitochondrialen Integrität und der Funktion des Proteasoms?
- AP2: Führt die Kombinationsbestrahlung in primären humanen Keratinozyten zur Aktivierung des Arylhydrocarbonrezeptor Signalwegs?
- AP3: Führt die akute Kombinationsbestrahlung in vivo zu gleichen Ergebnissen?
- AP4: Welche Konsequenz hat chronische Kombinationsbestrahlung in vivo?
- AP5: Führt IRA bzw. Kombinationsbestrahlung zur Immunsuppression?

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

AP1: Wirkung der Kombinationsbestrahlung auf dermale Fibroblasten

Ergebnisse: Um erste Einblicke in die Interaktion der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche zu gewinnen, haben wir chronisch UV-bestrahlte Fibroblasten mit IRA bestrahlt. Es zeigte sich, dass die chronische UV Bestrahlung mit einer Hemmung der proteasomalen Aktivität, einer Reduktion des mitochondrialen Membranpotentials, einer vermehrten intramitochondrialen ROS-Bildung und einer Erhöhung der mitochondrialen Mutagenese einhergeht und darüber hinaus das Transkriptom der Fibroblasten verändert. Besonders auffällig war eine vermehrte mRNA Expression der MMP-1. Wurden diese Zellen zusätzlich mit IRA bestrahlt, ließ sich eine weitere Steigerung der mRNA Expression beobachten. Aktuell führen wir detaillierte Dosiswirkungsstudien durch um zu prüfen, ob dieser Effekt additiver oder synergistischer Natur ist. Diese Arbeiten dienen zudem als Grundlage, um den UV und IRA Dosisbereich für die in den nächsten Wochen geplanten Kombinationsbestrahlungen zu definieren.

AP3, 4 und 5:

Da es sich hierbei um Tierversuche handelt, haben wir mit der Ausarbeitung des entsprechenden Tierversuchsantrages begonnen.

4. Geplante Weiterarbeiten

AP1:

Wiederholung der bislang durchgeführten Arbeiten mit der neu entwickelten Kombinationsbestrahlungsvorrichtung

AP3, 4 und 5:

Finalisierung des Tierversuchsantrages und Einreichung bei der Behörde, Bearbeitung von Rückfragen

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 036D
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt KAU VIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt D		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2019	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 875.430,00 EUR	Projektleiter: Dr. Rapp	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Das solare Spektrum enthält unterschiedliche spektrale Komponenten: UVA, -B, sichtbares Licht und Infrarot, die jeweils ein unterschiedliches biologisches Wirk- und Schädigungsprofil aufweisen. Für das Verständnis der schädlichen Wirkung für den Menschen und für eine daraus resultierende relevante Risikoabschätzung ist es essentiell, die kombinierte Aktion von UV- bis IR-Strahlung in ihrer biologischen Wirksamkeit in Modellsystemen der Haut zu untersuchen. Durch die Analyse unterschiedlicher Parameter in 2D- wie auch in speziellen, Gewebe-relevanten 3D-organotypischen Kulturen zur Identifizierung und Langzeitregeneration der epidermalen Stammzellen und der in vivo Maushaut soll es ermöglicht werden, die Wirkmechanismen kombinierter Strahlung auf zellulärer und (epi-)genetischer Ebene aufzuklären.

Das Teilprojekt D ist dabei in folgenden Fragestellungen involviert: Planung, Bau und Validierung der Strahlungsquelle mit der Möglichkeit unterschiedliche spektrale Anteile gewichtet einzusetzen. Charakterisierung des DNA Schadensprofils der Kombinationsstrahlung im Vergleich zu den individuellen Strahlqualitäten. Charakterisierung der DNA Reparaturkinetiken im Vergleich der Kombinationsbestrahlung mit den einzelnen spektralen Komponenten. Differenzierte Charakterisierung der DNA Schadensprofile in Zellen die der Hautalterung unterlegen sind, im Vergleich zu nicht gealterten Zellen.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

Für die Umsetzung wird eine kombinierte und bezüglich UVA und –B variable Strahlenquelle, für alle AGs entwickelt. Die Forschungsschwerpunkte der Verbundpartner sind: Gewebe- und Telomerregulation (AG1); epigenetische Kontrolle zellulärer Funktionen auf DNA- bzw. Histon-Ebene (AG2); IR-Signaling/Mitochondrienintegrität und AhR-Signaling (AG3); DNA Reparatur und Damage Signaling (AG4); Die enge Zusammenarbeit der interdisziplinär aufgestellten AGs schafft Synergieeffekte, die neben der wissenschaftlichen Diskussion den Austausch von Methoden und Materialien, gemeinsame Publikationen sowie die Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern betreffen.

Die Arbeitspakete und Meilensteine des Teilprojekts D sind:

- Konstruktion, Charakterisierung und Validierung der Strahlungsquelle
Planung, Simulation und praktische Umsetzung der Konstruktion der Kombinationsstrahlenquelle inklusive Einkopplung in ein Mikroskop (MS1)
- Wellenlängenabhängigkeit der DNA Schadensantwort
Charakterisierung der Schadensantwort im Lebendzellsystem bei Kombinations- und Einzel-Bestrahlung (MS2+3)
- DNA Schadensprofile der Kombinationsbestrahlung
Messung der DNA Schadensprofile nach isolierter und kombinierter Exposition (MS4)

- DNA Schadensantwort und Zellalterung
Vergleichende Charakterisierung der DNA Reparatur in gealterten, Chondrozyten-ähnlichen Fibroblasten und nicht gealterten Fibroblasten, unter Verwendung der Lebendzellmikroskopie (MS5).

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zu Projektbeginn wurde zum 1.9.2014 mit der Realisierung des Prototypens zur kombinierten Bestrahlung mit UV-A, -B, VIS und IR Strahlung begonnen. Dafür wurden spektrale Spezifikationen von mehr als 30 verschiedenen Strahlungsquellen gesammelt, in Kooperation mit Projektpartner B selbst vermessen und aufgearbeitet. Um diese Daten quantitativ nutzen zu können wurde eine Simulation erstellt, welche die Kombination verschiedenster Lampentypen unter Berücksichtigung des Abstandsquadratgesetzes und der Charakteristika der Strahlkombinierer ermöglicht. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden 7 Strahlungsquellen in Bezug auf Ihre biologische Aktivität als Einzelquelle charakterisiert und mit existierenden Daten bekannter Strahlenquellen verglichen. Dafür wurden Strangbrüche mittel Comet-assay, CPD Indiktion mittels Antikörper-Färbung sowie Überlebenskurven gemessen. Basierend auf diesen Daten wurde ein Designvorschlag für die Kombinationsbestrahlungsanlage entworfen und beim ersten Verbundtreffen zur Diskussion vorgelegt. Unter Berücksichtigung der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurde mit der Realisierung der Kombinationsbestrahlungsquelle begonnen. Die geplante Strahlungsquelle besteht aus vier einzeln regelbaren Strahlungsquellen (UVB, UVA, VIS, IR), welche über einen Strahlenkombineraufbau miteinander kombiniert werden. Dies ermöglicht die individuelle spektrale Wichtung der einzelnen Komponenten und ein möglichst sonnenähnliches Spektrum, wie im Antrag avisiert. Der Prototyp ist in folgenden Punkten fertiggestellt: UV-A, UV-B und IR-Quelle, mechanische Realisation. Zum Ende des Berichtszeitraumes fehlen noch die VIS-Quelle sowie die Strahlkombinierer. Mit einer Fertigstellung und ersten dosimetrische Vermessung ist in den nächsten Wochen zu rechnen.

Darüber hinaus wurde mit der Planung/Berechnung der Einkopplung der Strahlen-Quelle in das Fluoreszenzmikroskop begonnen. Ein erster Ansatz dieses Bauteils wird gerade erstellt.

In Hinblick auf maximale synergistische Effekte innerhalb des Konsortiums wurde beim ersten Treffen eine Diskussion zur einheitlichen Wahl des Zellsystems geführt. Darauf aufbauend wurde der p53 profiziente humanen Keratinozyten HaSKpw-clone7 für das gesamte Konsortium als Basiszelllinie gewählt. Dieser wird momentan von der Arbeitsgruppe 1 für alle Mitglieder zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Vorbereitungen dazu wurden hier bereits erbracht.

4. Geplante Weiterarbeiten

Im folgenden Berichtszeitraum wird die Kombinationsstrahlungsquelle fertiggestellt. Daran schließt sich die präzise dosimetrische Charakterisierung und Validierung an. Nach erfolgter Validierung und Diskussion der Ergebnisse (im Rahmen des nächsten Verbundtreffens) soll die Bestrahlungsanlage für alle Projektpartner gebaut und zur Verfügung gestellt werden. Als weiterer Schritt im Projekt 1D ist die Einkopplung ins Mikroskop, wie im Arbeitsplan beschrieben, vorzunehmen.

Mit der fertiggestellten Bestrahlungsanlage werden initial die DNA Schadensprofile für die einzelnen Strahlungsqualitäten erstellt. Diese werden mit den oben genannten Endpunkten charakterisiert und quantitativ erfasst. In diesem Rahmen wird sich die Analyse auf den gemeinsam verwendeten Zelltyp konzentrieren. Daran anschließend werden die ersten Kombinationsbestrahlungen mit jeweils zwei spektralen Bereichen (UVA+UVB, UVA+IR, UVB+IR, UVA+VIS, UVB+VIS, VIS+IR) untersucht.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 037A
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt A		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2018	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 992.585,00 EUR	Projektleiter: Dr. Jakob	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

In dem hier vorgestellten Projekt soll der Einfluss der Organisation des Chromatins in Säugerzellen auf die Strahlenantwort und Reparatur der erzeugten Schäden untersucht werden. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei in dem Wechselspiel von Chromatinstruktur und Schadenskomplexität, wie sie bei Verwendung dichtungisierender Teilchenstrahlung auftritt. In Zusammenarbeit der Arbeitsgruppen Prof. Dr. M. Löbrich (TU Darmstadt) und Prof. Dr. G. Iliakis (Universität Duisburg-Essen) werden dazu verschiedene Schwerpunkte bearbeitet und die übergeordnete Fragestellung aus unterschiedlichen Blickwinkeln angegangen. Über das Ziel hinaus, wissenschaftliche Ergebnisse und Erkenntnisse zu gewinnen, soll wissenschaftlicher Nachwuchs ausgebildet werden, um so zum Kompetenzerhalt in der Strahlenforschung beizutragen. Dazu dient die Einstellung von Doktoranden und die Rekrutierung beziehungsweise Weiterbeschäftigung von talentierten Postdoktoranden, die neben der eigentlichen Forschungsarbeit durch die Vernetzung im Verbundprojekt sowie die regelmäßigen Seminare über strahlenbiologische und strahlenbiophysikalische Themen an die Strahlenforschung herangeführt bzw. die vorhandenen Kenntnisse vertieft werden.

Im Teilprojekt (AP1: Einfluss der Chromatinstruktur und strukturbildender Faktoren auf die frühen Ereignisse von Reparaturprozessen nach Bestrahlung) der GSI liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen in der Wechselwirkung heterochromatischer und chromatinmodulierender Faktoren auf die Reparatur komplexer DNA Schäden nach Teilchenbestrahlung. Hierbei wird besonders der Einfluss der Komplexität auf die Auswahl des Reparaturweges untersucht, aber auch die räumliche Lage und gegebenenfalls Umorganisation der Schäden bezüglich des nukleären Heterochromatins im zeitlichen Verlauf der Schadensprozessierung und Reparatur mit einbezogen. Ein besseres Verständnis dieser zellulären Vorgänge und insbesondere die Rolle der Chromatinkompaktierung beziehungsweise der räumlichen Lage der DNA Schäden sollen bessere Vorhersagen und Risikoabschätzungen möglich machen. Strahlenbiologisch relevante molekularbiologische und mechanistische Erkenntnisse können dazu beitragen, die Strahlentherapie von Tumoren im Sinne kombinatorischer Therapieansätze weiterzuentwickeln.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

AP1: Erfassung und Identifizierung strahlungsinduzierter Interaktionspartner strukturbildender heterochromatischer Faktoren. Bestimmung der Relevanz dieser Faktoren oder Interaktionen für die räumlich-zeitliche Organisation der DNA Reparatur und deren Ausgang. Optimierung und Erweiterung von Methoden/Techniken zur Beobachtung und Quantifizierung strahlungsabhängiger Chromatindekondensation. Geklärt werden soll auch die Größenverteilung der Schadensdomänen als Grundlage für die Weiterentwicklung des „Local Effect Models zur Übertragung experimenteller Daten aus Röntgenstrahllexperimenten auf die Effekte nach Teilchenbestrahlung.“

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Nach dem Start des Projektes zum 1. September 2014 wurden im Berichtszeitraum die Stellen ausgeschrieben und das einzustellende Personal rekrutiert. Für die Postdoc-Stelle konnte Frau Dr. Anja Heselich, einer Molekularbiologin, die bereits ausgewiesene Erfahrungen in der Strahlenbiologie mit anderen Strahlungsquellen vorweisen kann, mit Eintrittstermin 17.11.2014 gewonnen werden. Sie kann jetzt hier ihre strahlenbiologische Expertise mit Röntgen und Ionenstrahlung vertiefen. Am 1.12.2014 erfolgte die Einstellung von Frau Nasiye Özgün Korkusuz als TA. Die Doktorandenstelle wurde mit der Biologin Naja Pipaluk Benz eine Kandidatin gefunden, die seit ihrer Teilnahme im Mastermodul Strahlenbiophysik hier an der GSI und ihrer Vertiefung in ihrer Masterarbeit reges Interesse an der Strahlenbiologie gezeigt hat. Die Einstellung wird im Januar erfolgen.

Die praktischen Arbeiten zum Projekt wurden Mitte November mit Einstellung des Postdoktoranden gestartet. Zunächst wurde mit der Etablierung und Optimierung notwendiger Methoden zur Untersuchung relevanter, chromatinassoziierter Proteine begonnen.

Ein wichtiges Ziel des Projektes stellt die Identifizierung von Interaktionspartnern der beiden wichtigen heterochromatinassozierten Proteine Kap1 (*KRAB-associated protein 1*) und HP1 (*heterochromatin protein 1*) dar. Hierzu wurden zunächst verschiedene Methoden zur Immunpräzipitation (IP) dieser Proteine an Zelllysaten von NIH/3T3 Mausfibroblasten getestet. Als Modellproteine wurden dafür die beiden Heterochromatin Proteine HP1alpha und HP1beta über die verschiedenen IP Methoden isoliert. Die Etablierung der IP und die Isolation über Protein A bzw. G-gekoppelte Magnetbeads wurden weitestgehend abgeschlossen und wird derzeit für die Isolation von pKap1 und daran gebundene Faktoren optimiert. Der Nachweis isolierter Proteine erfolgt zunächst über proteinchemische Analysen im Westernblot.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach Etablierung und Optimierung der IP wird mit den Untersuchungen in Röntgen-bestrahlten NIH/3T3 Mausfibroblasten begonnen werden, um eine Basis für später erfolgende Experimente mit Ionenstrahlung zu bekommen. Zur weiteren Aufklärung des Mechanismus sollen Untersuchungen an Zellen mit verminderter (*knock-down*) bzw. vollständig unterdrückter (*knock-out*) Expression von HP1 bzw. Kap1 auf ihre Strahlenantwort untersucht werden. Zunächst sollen hierzu klassischen RNAi Methoden angewendet und die Effizienz quantifiziert werden. Sollte der knock-down mittels siRNA nicht ausreichend sein soll das CRISPR-Cas9 System etabliert werden, das erlaubt durch sequenzspezifische Deletion knock-out Zellen zu generieren. Dazu müssen zuerst geeignete Plasmide ausgewählt und vermehrt werden. Der zugehörige Nachweis für eine effiziente Transfektion der Plasmide und Expression der Endonuklease Cas9 soll über die Puromycinresistenz erfolgen. Für den späteren Nachweis einer erfolgreichen Modifikation des Zielgens über das CRISPR-Cas9 System muss zuerst der sogenannte SURVEYOR-Assay etabliert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

Zuwendungsempfänger: Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen		Förderkennzeichen: 02 NUK 037B
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt B		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2018	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 752.328,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Iliakis	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Seit vielen Jahren war die gängige Hypothese in der Strahlenbiologie, dass DSB Reparatur ausschließlich durch die Mechanismen des D-NHEJ und der HRR stattfindet. Allerdings zeigen neuere Arbeiten, die zu einem wesentlichen Anteil aus unserem Institut kommen, dass, bei Versagen des D-NHEJ, nicht HRR sondern eine alternative, backup Form von NHEJ (B-NHEJ) die Funktion von D-NHEJ übernimmt. In den letzten Jahren ist auch das Zusammenwirken von genomischer Architektur und Protein-Modifikation bei der DSB Reparatur in den Fokus geraten. Welcher Reparaturweg gewählt wird, scheint neben der Komplexität des Schadens, auch von der Chromatinstruktur im Schadensbereich bestimmt zu werden. Ziel des vorliegenden Projektes ist es, den Einfluss der Chromatinstruktur auf die Funktion des B-NHEJ zu untersuchen und zu testen, inwiefern die starke Einschränkung dieses Reparaturweges, die in G0 Zellen beobachtet wird, auf die Kondensierung des Chromatins zurückzuführen ist.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Die Rolle der Kondensierung des Chromatins auf die Hemmung von B-NHEJ. DAPI-Färbung in Kombination mit quantitativer Bildanalyse wird für die Quantifizierung der Kondensierung des Chromatins eingesetzt.
- AP2: Der Einfluss von induzierten Änderungen der Chromatinstruktur durch hypotonische Behandlung auf den B-NHEJ in G0-Zellen.
- AP3: Die Zusammenhänge zwischen der Änderung der DNA Methylierung und der Chromatin Kondensierung einerseits und zwischen der Änderung der DNA Methylierung und B-NHEJ andererseits. Dafür wird die Behandlung mit 5-Aza-C und die damit assoziierten Änderungen der Chromatinstruktur durch DAPI Färbung erfasst und quantifiziert. Ziel ist es, unter optimierten Behandlungsbedingungen, die eine maximale Veränderung in der Chromatinstruktur verursachen, die B-NHEJ Aktivität zu quantifizieren. Die DNA Methylierung wird auch mittels Elisa bestimmt und durch Sequenzierung von Bisulfit modifizierter DNA in Gruppen von 3-6 CpGs verifiziert.
- AP4: Der Methylierungsstatus von G0 und G1 Zellen wird untereinander und mit Parametern, die die B-NHEJ Aktivität beeinflussen, verglichen.
- AP5: Der Einfluss von miRNAs, die die Expression von DNA Methyltransferase (DNMT1) regulieren, auf die Aktivität von B-NHEJ.
- AP6: Die Auswirkungen von Proteinen der HP1 Familie durch Überexpression bzw. Suppression mittels RNA-Interferenz auf die B-NHEJ Aktivität.
- AP7: Da Zellen mit Defekten in DNA-PKcs keine Hemmung von B-NHEJ in G0 zeigen, sollen die Wechselwirkungen von DANN-PK auf die Chromatinstruktur analysiert werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Projekt befindet sich erst in der Anfangsphase. Seit September konnten graduell die vom Projekt finanzierten Stellen für Wissenschaftler und Doktoranden besetzt werden.

Auf Grund der relativ langen Periode, die zwischen dem Einreichen des Antrages und der Bewilligung des Projektes verstrichen ist, konnten einige Aspekte der hier in Bearbeitung befindlichen Fragestellungen, finanziert durch Haushaltsmittel, angegangen werden. Dadurch kann das Projekt nun aus einem etwas fortgeschrittenen Ausgangspunkt initiiert werden. Dies betrifft besonders die Analyse der Chromatinstruktur mittels DAPI Färbung, die Untersuchung des Einflusses von Hypotonie auf den B-NHEJ und die Rolle der DNA Methylierung auf dessen Funktion. Grundarbeiten auf diesen Gebieten sind durchgeführt worden und dienen der genaueren Formulierung der oben beschriebenen Aufgaben (siehe Publikation). Unsere zentrale Aufgabe in den kommenden sechs Monaten im Rahmen dieses Projektes wird die Einarbeitung der Doktoranden auf dem Gebiet der Strahlenforschung und ihre Einweisung in die spezielle Problematik der darin enthaltender Forschung sein. Wir sind optimistisch, dass dies uns sehr gut durch den speziellen Einsatz von Dr. Paul-Konietzko, aber auch durch den Einsatz aller Wissenschaftler des Instituts gelingen wird.

4. Geplante Weiterarbeiten

Nach Einteilung der oben formulierten Forschungsaufgaben in die partizipierten Wissenschaftler, werden die relevanten Fragestellungen methodisch angegangen. Mit besonderer Priorität wird untersucht:

- AP1: Ob die Kondensierung des Chromatins durch Behandlung mit hypertonischen Lösungen die Fähigkeit der Zellen mit B-NHEJ zu reparieren stärkt oder schwächt. Da in vielen der bereits durchgeführten Experimente Lig4^{-/-} defiziente Mausezellen eingesetzt worden waren, werden weitere Untersuchungen mit anderen D-NHEJ Mutanten, auch von humanen Zellen, durchgeführt.
- AP3: Der Einfluss der DNA Methylierung auf die Chromatinstruktur wird in verschiedenen Systemen standardisiert und als Ansatz für Versuche auf die DNA Reparatur eingesetzt. Technologien und Methoden, die die Erfassung des Methylierungszustands der Zelle ermöglichen, sollen eingesetzt und optimiert werden.
- AP4: Zum Gewinnen von G1 Zellen aus einer exponentiell wachsenden Kultur soll die zentrifugale Elutriation zum Einsatz kommen. Um genügend G1 Zellen für anschließende Experimente zu erhalten, werden sehr viele Zellen (mindestens 200 x 10⁶) benötigt. Deswegen sollen die Wachstumsbedingungen für die jeweiligen Zellen optimiert und standardisiert werden. Zusätzlich sollen die optimalen Bedingungen für die zentrifugale Elutriation für die jeweiligen Zellen standardisiert werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Das Projekt befindet sich erst in der Anlaufphase. Deswegen können wir vorerst nur eine Publikation die durch Vorarbeiten entstanden ist angeben:

Moscariello, M., Iliakis, G. (2013): Effects of chromatin decondensation on alternative NHEJ. DNA Repair 12, 972-981.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Darmstadt, Karolinenplatz 5, 64289 Darmstadt		Förderkennzeichen: 02 NUK 037C
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt C		
Zuordnung zum FuE-Programm: Nukleare Sicherheitsforschung: Strahlenforschung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014 bis 31.08.2018	Berichtszeitraum: 01.09.2014 bis 31.12.2014	
Gesamtkosten des Vorhabens: 719.412,00 EUR	Projektleiter: Prof. Dr. Löbrich	

1. Vorhabensziele/Bezug zu anderen Vorhaben

Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Untersuchung der Chromatindynamik während der Homologen Rekombination (HR) in der G2-Phase und der Mitose. Mit der Erforschung dieses wissenschaftlichen Feldes soll ein Beitrag zum besseren Verständnis zur Entstehung von Chromosomenaberrationen und chromosomalen Instabilitäten geleistet werden. Dies umfasst die Untersuchung von HR-assoziierten Vorgängen in der Mitose. Hierbei stellt sich die Frage, welche HR-Intermediate die Mitose durchlaufen und welches Schicksal die Zellen im darauf folgenden Zellzyklus erfahren.

2. Untersuchungsprogramm/Arbeitspakete

- AP1: Bisherige Vorarbeiten haben gezeigt, dass Chromatinremodellierer, wie zum Beispiel ATRX und Rad54, Funktionen bei der Homologen Rekombination einnehmen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll nun im Rahmen dieses APs untersucht werden, bei welchen Schritten der HR die Chromatin-verändernden Funktionen dieser Proteine benötigt werden. Durch die Anwendung der RNA-Interferenz (si- und sh-RNA) und der Herstellung von Knock-out-Zelllinien (CRISPR/Cas9) soll die genaue Funktion dieser Chromatinremodellierer bei einzelnen Schritten der HR mittels fluoreszenzmikroskopischer Methoden und biochemischer Interaktionsstudien analysiert werden.
- AP2: Im zweiten AP soll untersucht werden, mit welchen HR-Intermediaten die Zellen in die Mitose laufen, um welche Strukturen es sich hierbei handelt und welche Proteine an diesen Prozessen beteiligt sind. In der Mitose ist das Chromatin im Gegensatz zur G2-Phase stark kondensiert, so dass sich die Frage stellt, welche HR-assoziierten Proteine an unreparierten DSBs verweilen können und möglicherweise in der Mitose weiterhin Reparaturprozesse durchführen. Um diese Fragestellung zu erörtern, sollen bekannte HR-Proteine, welche an unterschiedlichen Schritten der HR beteiligt sind und somit spezifisch an verschiedene HR-Intermediate binden, in den verschiedenen Phasen der Mitose mikroskopisch visualisiert und charakterisiert werden.

3. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

- AP1: Es wurde damit begonnen shRNA-Zellen zur Depletion von ATRX herzustellen. Des Weiteren wurden Plasmide zur Herstellung von Rad54- und ATRX-Knock-Out-Zellen mittels CRISPR/Cas9 entworfen und bestellt. Ebenfalls wurden verschiedene Bedingungen zur Protein-Depletion mittels siRNA (siRad54 und siATRX) getestet, um eine transiente Herunterregulation zu erzeugen. Die Etablierung dieser Methoden ist zunächst wichtig, um für spätere zelluläre Experimente korrekte Bedingungen zur Protein-Depletion zu ermitteln bzw. um geeignete Zelllinien zu generieren.
- AP2: Es wurde mit der Etablierung von Zelllinien begonnen, welche verschiedene Fluoreszenz-gekoppelte HR-Marker stabil exprimieren. In zurückliegenden Vorarbeiten wurden bereits DNA-Plasmide für Fluoreszenz-gekoppelte HR-Proteine hergestellt (Rad51, Rad52, Rad54 und Mus81), welche nun in humanen Zellen stabil integriert werden sollen. Die Transfektion dieser DNA-Plasmide in humane Zellen wird momentan durchgeführt, um daraus stabil-exprimierende Klone zu isolieren, welche für zelluläre Assays genutzt werden sollen.

4. Geplante Weiterarbeiten

- AP1: Die aus in vivo Experimenten gewonnenen Ergebnisse sollen durch biochemische in vitro Experimente (z. B. ATPase-Assay, DNA-Binde-Assay, homologous-pairing-Assay) verifiziert werden. Für solche Experimente müssen etablierte Proteine der HR (RPA, Rad51 ect.) sowie die zu untersuchenden Proteine (Rad54, ATRX ect.) exprimiert und aufgereinigt werden. Ebenso müssen für solche Plasmid-basierten in vitro Experimente spezielle DNA-/Chromatinkonstrukte generiert werden.
- AP2: Nach erfolgreicher Herstellung und Charakterisierung von oben genannten Zelllinien sollen zunächst Strahlen-induzierte Foci der jeweiligen exprimierenden HR-Proteine in der Mitose visualisiert werden. Es sollen zur weiteren Charakterisierung Kinetiken dieser Foci während der einzelnen mitotischen Phasen erstellt werden, um HR-Proteine zu identifizieren, welche in der Mitose aktiv sind. Darüber hinaus soll durch spezifische Protein-Depletion der zuvor identifizierten HR-Faktoren mittels siRNA/shRNA einzelne Schritte der HR unterbunden werden, um die Konsequenzen des Eintretens der Zelle in die Mitose mit unterschiedlichen HR-Intermediaten untersuchen zu können. Unterstützend sollen zusätzlich chromosomale Studien (Giemsa-Färbung und FISH) durchgeführt werden.

5. Berichte, Veröffentlichungen

Keine.

3 Verzeichnis der Forschungsstellen

Bundesamt für Strahlenschutz, Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter	
02 NUK 024A	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 1 📖 128
02 NUK 035D	Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt D 📖 196
Charité - Universitätsmedizin Berlin, Hindenburgdamm 30, 14195 Berlin	
02 NUK 024E	Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 5 📖 136
Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg	
02 NUK 003A	Verbundprojekt UV-Strahlenschäden: Bedeutung von UVA für Hautkrebs und Hautalterung; TP: Telomerschädigung und genomische Instabilität bei UV-induzierten Hautcarcinogenese 📖 104
02 NUK 036A	Verbundprojekt KAU VIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt A 📖 200
Elbe Kliniken Stade-Buxtehude GmbH, Bremervörder Str. 111, 21682 Stade	
02 NUK 036B	Verbundprojekt KAU VIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt B 📖 202
Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich	
02 NUK 005A	Verbundprojekt Biodosimetrie: Ein systembiologischer Ansatz für die Strahlenbiodosimetrie und die Analyse der individuellen Strahlensensitivität 📖 106
02 NUK 015E	Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt E 📖 110
02 NUK 019C	Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt C 📖 70
02 NUK 020E	Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt E 📖 86
02 NUK 021A	Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt A 📖 88
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung angewandter Forschung e. V., Hansastr. 27 c, 80686 München	
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 📖 20

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossplatz 4, 91054 Erlangen
--

- | | | |
|-------------|--|-------|
| 02 NUK 017G | Verbundprojekt GREWIS: Genetische Risiken und entzündungshemmende Wirkung von dicht-ionisierender Strahlung: Vergleichende Untersuchungen zur Wirkung von Radon in Zell- und Tier-Modellen und in Radon-Patienten; Teilprojekt G | 📖 126 |
| 02 NUK 020C | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt C | 📖 82 |
| 02 NUK 034D | Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt D | 📖 188 |

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 |
| 02 NUK 034C | Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt C | 📖 186 |
| 02 NUK 037A | Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt A | 📖 208 |

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 | 📖 64 |
| 02 NUK 019D | Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt D | 📖 72 |
| 02 NUK 021B | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt B | 📖 90 |

- 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  28
- 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  46
- 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  38
- 02 NUK 021CX** Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt CX  92

<p>Helmholtz Zentrum München Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Ingolstädter Landstr. 1, 85764 Neuherberg</p>

- 02 NUK 015B** Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt B  108
- 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

<p>Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Anton-Günther-Str. 51, 72488 Sigmaringen</p>

- 02 NUK 025BX** Verbundprojekt Pränatale Entwicklung: In-vitro-Untersuchungen zur Wirkung von dicht und dünn ionisierender Strahlung auf die pränatale Entwicklung; Teilprojekt 2  140

<p>Hochschule für angewandte Wissenschaften – Fachhochschule Aschaffenburg, Würzburger Str. 45, 63743 Aschaffenburg</p>
--

- 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 📖 14 |
| 02 NUK 027D | Verbundprojekt SINABEL: Sicherheit der Nasslager für abgebrannte Brennelemente: Experimentelle Analyse, Modellbildung und Validierung für System- und CFD-Dodes; Teilprojekt D: Dichtegeliebene vertikale Austauschbewegungen und radiales Strahlungsverhalten 📖 40 |
| IUF – Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf GmbH, Auf'm Hennekamp 50, 40225 Düsseldorf | |
| 02 NUK 036C | Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt C 📖 204 |
| Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, Grüneburgplatz 1, 60323 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 📖 74 |
| 02 NUK 021F | Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt F 📖 98 |
| 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 📖 68 |
| 02 NUK 020B | Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt B 📖 80 |
| 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 📖 50 |
| 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  32

Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover

- 02 NUK 021G Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt G  100
- 02 NUK 030D Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt D  162

Medipan GmbH, Ludwig-Erhard-Ring 3, 15827 Dahlewitz
--

- 02 NUK 035E Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit; Teilprojekt E  198

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  94
- 02 NUK 021E Verbundprojekt Conditioning: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide mittels Einbau in endlagerrelevante Keramiken; Teilprojekt E  96
- 02 NUK 022A Verbundprojekt In-Ex: Innovative Extinktionsphotometrie zur Charakterisierung eines Mehrkomponenten-Aerosols und zur Feuchtemessung; Teilprojekt A: Qualifizierung innovativer Extinktionsphotometrie  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  22
- 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  44

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  76

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)  56

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  84

Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

- 02 NUK 019A Verbundprojekt ImmoRad: Grundlegende Untersuchungen zur Immobilisierung langlebiger Radionuklide durch die Wechselwirkung mit endlagerrelevanten Sekundärphasen; Teilprojekt A  66

- 02 NUK 020A Verbundprojekt f-Kom: Untersuchungen zum grundlegenden Verständnis der selektiven Komplexierung von f-Elementen; Teilprojekt A  78

- 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  52

- 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  54

- 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  24
- 02 NUK 034A Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt A  182
- 02 NUK 034B Verbundprojekt NeuroRad: Ein Ansatz zur Bewertung neurologischer Strahlenschäden, Teilprojekt B  184
- 02 NUK 036D Verbundprojekt KAUVIR: Kombination statt Addition – UV bis IR Strahlung in der Krebsentstehung und Alterung, Teilprojekt D  206
- 02 NUK 037C Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt C  212
- 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  16
- 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  34
- 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  36
- 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  42
- 02 NUK 035C Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt C  194

- | | |
|--|--|
| 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  26 |
| 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  30 |
| Universität Bremen, Bibliothekstr. 1, 28359 Bremen | |
| 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 des Saarlandes, Campus, 66123 Saarbrücken | |
| 02 NUK 035A | Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt A  190 |
| 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  48 |
| 02 NUK 040B | Verbundprojekt UNSCHRO: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Beschreibung der Schädigung metallischer Rohrleitungen bei turbulenter Durchströmung im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen, Teilprojekt B: Numerische Simulation turbulenter Strömung  60 |
| Universität Stuttgart – Otto-Graf-Institut – Materialprüfanstalt, Pfaffenring 32, 70569 Stuttgart | |
| 02 NUK 040A | Verbundprojekt UNSCHRO: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Beschreibung der Schädigung metallischer Rohrleitungen bei turbulenter Durchströmung im Bereich hoher Drücke und hoher Temperaturen, Teilprojekt A: Mischnähte, Ausströmen  58 |

- | | |
|---|--|
| Universität Ulm, Helmholtzstr. 16, 89081 Ulm | |
| 02 NUK 026C | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt C  148 |
| Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45147 Essen | |
| 02 NUK 024D | Verbundprojekt ZiSS: Identifizierung von molekularen Zielstrukturen und Signalnetzwerken, die Strahlenüberempfindlichkeit und –resistenz beeinflussen; Teilprojekt 4  134 |
| 02 NUK 037B | Verbundprojekt VERCHROMT: Erkennung, Verarbeitung und biologische Konsequenzen von Chromatinschäden nach Teilchenbestrahlung, Teilprojekt B  210 |
| Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Martinistr. 52, 20251 Hamburg | |
| 02 NUK 035B | Verbundprojekt DNA-Reparaturfoci: DNA-Reparaturfoci als Marker der individuellen Strahlenempfindlichkeit, Teilprojekt B  192 |
| Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Langenbeckstr. 1, 55131 Mainz | |
| 02 NUK 026B | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt B  146 |
| Universitätsmedizin Rostock, Schillingallee 35, 18057 Rostock | |
| 02 NUK 026D | Verbundprojekt PASSOS: Personalisierte Abschätzung von Spätfolgen nach Strahlenexposition und Orientierungshilfe für Strahlenanwendungen in der Medizin; Teilprojekt D  150 |
| Verein für Kernverfahrenstechnik und Analytik Rossendorf e. V., Bautzner Landstr. 128, 01328 Dresden | |
| 02 NUK 015G | Verbundprojekt Strahlung und Umwelt II: Radionuklide in der Umwelt, ihr Transport in Nahrungsketten zum und im Menschen, Teilprojekt G  112 |
| 02 NUK 030G | Verbundprojekt TransAqua: Transfer von Radionukliden in aquatischen Ökosystemen; Teilprojekt G  168 |