

## Fortschrittsbericht

# Forschungsvorhaben zum Förderkonzept „FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“

Berichtszeitraum

1. Januar - 30. Juni 2023



## Fortschrittsbericht

Forschungsvorhaben  
zum Förderkonzept  
„FORKA - Forschung  
für den Rückbau  
kerntechnischer  
Anlagen“

Berichtszeitraum  
1. Januar - 30. Juni 2023

Vom Bundesministerium  
für Bildung und Forschung  
geförderte Vorhaben

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Vorwort**

*„Deutschland steht in den nächsten Jahrzehnten vor erheblichen Rückbau- und Entsorgungsaufgaben, die aus der Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung und aus früherer staatlicher Förderung kerntechnischer Entwicklungen resultieren.“*

(Auszug aus dem Förderkonzept „FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“)

Mit dem Förderkonzept „FORKA - Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen“ unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) durch die Entwicklung, Optimierung und Erprobung anwendungsorientierter Technologien und Verfahren die Bewältigung der anstehenden Aufgaben.

Im Auftrag des BMBF informiert die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH halbjährlich über den Stand der im Rahmen von FORKA geförderten Forschungsprojekte. Dazu gibt sie eine eigene Fortschrittsberichtsreihe heraus. Jeder Fortschrittsbericht stellt eine Sammlung von Einzelberichten der geförderten Projekte dar, die von den Forschungsstellen selbst als Dokumentation ihres Arbeitsfortschritts in einheitlicher Form erstellt werden.

Berichte ab dem Jahr 2017 sind über die Webseite des Projektträgers GRS ([www.projekttraeger.grs.de](http://www.projekttraeger.grs.de)) öffentlich verfügbar. Auf Fortschrittsberichte aus früheren Jahren kann über die Webseite des Projektträgers Karlsruhe (<http://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/wte/287.php>) zugegriffen werden.

Die inhaltliche Gliederung der Berichtssammlung orientiert sich an den fachlichen Schwerpunkten des Förderkonzeptes FORKA (Bekanntmachung der Förderrichtlinie zum Förderkonzept FORKA von 2021). Die Anordnung der Berichte innerhalb der fachlichen Schwerpunkte erfolgt nach aufsteigenden Förderkennzeichen

Verantwortlich für den Inhalt der Fortschrittsberichte sind deren Verfasser. Die GRS übernimmt keine Gewähr insbesondere für Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

<b>Förderkennzeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
<b>01.</b>	<b>Zerlege- und Dekontaminationsverfahren</b>	
15S9424	Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung (ProSeil)	7
15S9425A	VP: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS), TP: Parametervalidierung zum Tiefschnitt von hochbewehrtem Stahlbeton und Erprobung eines neuartigen Anbaugeräts zur Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen	10
15S9425B	VP: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS), TP: Konzeptionierung eines hochflexiblen Anbaugerätes als Prüfstand zur experimentellen Untersuchung für die Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen sowie Neukonzeptionierung eines Absaugsystems für den Materialabtransport	13
15S9425C	VP: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS), TP: Fachkundige Planungs- und Projektberatung zu den Anforderungen an ein mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung und deren Umsetzung sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	16
15S9429A	VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil), TP: Simulationsbasierte Werkzeugauslegung und Untersuchung des Einsatzverhaltens	19
15S9429B	VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil), TP: Bindungs- und fertigungsspezifische Seilschleifwerkzeugentwicklung	23
15S9429C	VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil), TP: Einfluss der Verwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung auf die im industriellen Rückbau verwendete Maschinenteknologie	26
15S9429D	VP: Hocheffiziente Seilschleifwerkzeuge mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil), TP: Anwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung im industriellen Rückbau.	29
15S9429E	VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil), TP: Auslegung und Herstellung neuartiger Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schneidstoffanordnung.	31
15S9430A	VP: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogentrennschleifen (CAMGprofit) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, TP: CAMG-Prozess	35
15S9430B	VP: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogentrennschleifen (CAMGprofit) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, TP: CAMG-Anwendung	39
15S9434A	VP: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA), TP: Entwicklung von Werkzeugen zur In-Situ-Analyse von Betoneigenschaften, Radionukliden und hydraulischer Loch-zu-Loch-Permeabilität sowie Befundkartierung	45
15S9434B	VP: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA), TP: Analytik für die Beprobung von Beton	49
15S9434C	VP: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA), TP: Elektronische Ergebnisdokumentation, Beprobungsplanung und Wissensmanagement	51
15S9435A	VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe), TP: Entwicklung eines innovativen Verfahrens für die Erstellung eines BIM-Modells für die zu bearbeitenden Räumlichkeiten einschließlich der Integration von Störstellen	55
15S9435B	VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe), TP: Praxisversuche und praxisorientierte Beratung bei Anwendung des BIM-Modells für Planung und Durchführung der Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessung	59
15S9439A	VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE), TP: Prototypbau einer autonomen Anlage zur Dekontamination und radiologischen Messung	62
15S9439B	VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE), TP: Autonome Laserablation und radiologische Vormessung	65

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
<b>02.</b>	<b>Freigabeverfahren und konventionelle Entsorgungswege</b>	
15S9409A	VP: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenflussverteilungen (EMPRADO), TP: Berechnung der Neutronenflussverteilung in reaktornahen Bauteilen und deren Validierung an Experimenten als Basis der Aktivitätsrechnungen	68
15S9409B	VP: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenflussverteilungen (EMPRADO), TP: Entwicklung und Anwendung einer Rechenmethode zur genauen Bestimmung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau	71
15S9431A	VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie (QGRIS), TP: Gerätebau und -entwicklung	74
15S9431B	VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie (QGRIS), TP: Bildrekonstruktionsverfahren	81
15S9431C	VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, Richtungsaufgelöster In-Situ-Gammaspektrometrie (QGRIS), TP: Experimentelle Untersuchungen und Simulation	84
15S9431D	VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie (QGRIS), TP: Qualifizierung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	87
<b>03.</b>	<b>Behandlung radioaktiver Abfälle</b>	
15S9423A	VP: Nass-Siebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen (NaMaSK), TP: Durchführung der Versuche mit inaktivem Probenmaterial	90
15S9423B	VP: Nass-Siebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen (NaMaSK), TP: Durchführung von Versuchen mit radioaktivem Probenmaterial	93
15S9428A	VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA), TP: Projektkoordination sowie ökologische und radiologische Bewertungen	96
15S9428B	VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA), TP: Entwicklung von Recyclingstrategien und Identifizierung von ökonomischen Verwertungswegen	100
15S9428C	VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA), TP: Identifikation und Bereitstellung von Komponenten zur Untersuchung sowie Integration relevanter Ergebnisse zur Berücksichtigung im Rückbau	103
15S9428D	VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA), TP: Ermittlung des intrinsischen Materialwerte	107
15S9433A	VP: Weiterentwicklung u. Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle mit C-14-Recycling auf Basis der elektrochemischer Totaloxidation (C14-Recycling), TP: Weiterentwicklung u. Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Fraktionierung des Anodengases	111
15S9433B	VP: Weiterentw. und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C-14-haltiger flüss. org. Abfälle (C14-Recycling), TP: Weiterentwicklung des Verfahrens zur totzeitarmen C-14 Bestimmung mittels Flüssigszintillation und Untersuchungen zur Freimessung von C-14-Rückständen n. elektrochemischer Behandlung	113
15S9433C	VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling), TP: Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Isotopentrennung zur Rückgewinnung von C14	115
15S9441	Konditionierung von mittelaktiven (ILW) Ionentauscherabfällen aus der Chemischen System Dekontamination (SRT)	118
15S9442	Charakterisierung und Dekontamination von i-Grafiten (i-GraDe)	121

<b>Förderkennzeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
<b>04</b>	<b>Abfalldeklaration und Zwischenlagerung</b>	
15S9422A	VP: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO), TP: Intuitive VR/AV Multi-Robotersteuerung für ein anwendungsnahes Rückbauszenario	123
15S9422B	VP: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO), TP: Ortsaufgelöste radiologische Charakterisierung zur Sortierung	126
15S9422C	VP: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO), TP: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	129
15S9436A	VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO), TP: Koordination und Erstellung der BIM Modelle	133
15S9436B	VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO), TP: BIM, Game-Engine, optimierte Verpackungsplanung und FLUKA Simulation	136
15S9436C	VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO), TP: Datenbank	139
15S9432	Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines bildgebenden, zerstörungsfreien Analyse- und Deklarationsverfahrens für radioaktive Abfallgebinde, basierend auf lasergetriebenen Neutronenquellen (ZARA-LAN)	142
15S9443	Aus- und Weiterbildung sowie Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen und Abfallprodukten aus Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen (EduCTUM)	146
<b>05.</b>	<b>Umwelt- und Strahlenschutz</b>	
15S9437A	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS), TP: Einfluss von natürlichen nanopartikulären Phasen auf die Radionuklidverteilung im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze	148
15S9437B	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS), TP: Remobilisierung von Radionukliden, Charakterisierung mikrobieller Diversität im Boden und die Beeinflussung durch Radionuklide und Wurzelexsudate	151
15S9437C	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS), TP: Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den RN-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen	154
15S9437D	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS), TP: Radioökologische Modellierung	157
15S9437E	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS), TP: Geochemische Modellierung der in den Teilprojekten A und B untersuchten Systeme	159
<b>06.</b>	<b>Mensch und Organisation</b>	
15S9419	Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau (KernTrafo)	161
15S9426A	VP: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Rückbaukompetenzen)	167
15S9426B	VP: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Rückbaukompetenzen)	170



<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9424
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung (ProSeil)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> vom 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 490.926,41 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> denkena@ifw.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit einer Methode zur systematischen Auslegung des trockenen Seilschleifens metallischer Werkstoffe unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren, die eine deutliche Steigerung der Standzeit von Seilschleifprozessen von mindestens 50 % gegenüber konventionell ausgelegten Prozessen ermöglicht. Da bei der Bearbeitung von Metall kein Selbstschärfeeffekt der eingesetzten Schleifperlen auftritt, werden beim Seilschleifen dieser Werkstoffe derzeit ausschließlich einschichtig belegte Schleifperlen eingesetzt. Im Gegensatz zu den mehrschichtigen Schleifperlen liegt hier nur eine Lage Schleifkörner in der Bindung vor. Ist diese verschlissen, muss das komplette Seil ausgetauscht werden, sodass hohe Werkzeugkosten entstehen. In Kombination mit hohen thermischen Werkzeugbeanspruchungen ist die Standzeit der Diamantseilschleifwerkzeuge gering. Zudem kann bei vielen Rückbauanwendungen nicht mittels Wasser gekühlt werden, was zum Erreichen der thermischen Stabilitätsgrenze der Gummierung von etwa 100 °C führt. Aus diesen Gründen werden die temperaturrelevanten Systemgrößen Werkzeugspezifikation, Kühlung und freie Seillänge variiert und ihr Einfluss auf die Wärmebilanz bestimmt. Das entstandene empirische Modell verwendet die temperaturrelevanten Eingangsgrößen Kühlleistung, freie Werkzeuglänge und Werkzeugspezifikation und wird durch experimentelle Untersuchungen validiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1 Erweiterung des Versuchsstandes

Erweiterung des bestehenden Versuchsstandes zur Durchführung der geplanten Untersuchungen.

#### AP 1.2 Thermodynamische Betrachtung

Quantifizierung der im Seilschleifen relevanten Wärmeströme.

### AP 2 Einfluss der Werkzeugspezifikation

Kenntnis des Einflusses der Werkzeugspezifikation auf die Wärmebilanz.

### AP 3 Einsatzuntersuchungen und Verschleiß

Untersuchung des Verschleißverhaltens der Werkzeuge.

### AP 4 Modellbildung

Modellbildung aus den gewonnenen Erkenntnissen der vorherigen APs.

### AP 5 Validierung und Leistungsuntersuchung

Validierung des Modells und Einordnung des Prozesses in den Stand der Technik.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP4: Ziel des vierten Arbeitspakets ist die Modellbildung zur Vorhersage der Werkzeugtemperatur beim Seilschleifen unter Berücksichtigung temperaturrelevanter Faktoren. In den vorherigen Arbeitspaketen konnte bereits gezeigt werden, dass die Kühlleistung der Druckluftkühlung abhängig von der Anzahl der verwendeten Düsen ist. Es hat sich herausgestellt, dass bei mehr als zwei Vortex-Düsen ein Druckabfall entsteht, der die Kühlleistung reduziert. Daraufhin wurde mittels eines quantitativen Modells die Kühlleistung in der Kühleinheit bestimmt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die erzwungene Konvektion hauptsächlich für die Kühlleistung verantwortlich ist. In den ersten Validierungsversuchen konnte bereits gezeigt werden, dass mit optimierter Kühlung die Standzeit der Werkzeuge gesteigert werden konnte.

Diese Effekte wurden im aktuellen Berichtszeitraum tiefergehend untersucht. Dazu wurden Standzeituntersuchungen bei unterschiedlichen Prozessstellgrößen untersucht. Dabei wurde die Vorschubgeschwindigkeit mit 3, 5 und 7 mm/min untersucht. Die Schnittgeschwindigkeit wurde weiterhin konstant bei 20 m/s gehalten. Dabei lag der Fokus auf der Auswertung des Verschleißverhaltens der Werkzeuge. Dazu wurden mittels Mikroskop kontinuierlich die Schleifsegmente und die Gummierung zwischen den Segmenten untersucht.

Im Vergleich zeigt sich, dass mit 5 mm/min bereits die Leistungsfähigkeit der Werkzeuge erreicht wird. Die Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit auf 7 mm/min führt dazu, dass bereits nach ca. 3.500 cm<sup>2</sup> die Schleifsegmente nicht mehr einsatzfähig sind. Dies ist in Abbildung 1 zu sehen. Bei hoher Vorschubgeschwindigkeit kommt es hier zum Starken Abnutzen der einschichtigen Schleifsegmente, wodurch es zu einem sehr starken Reibungs- und Kraftanstieg kommt und das Werkzeug früh versagt.

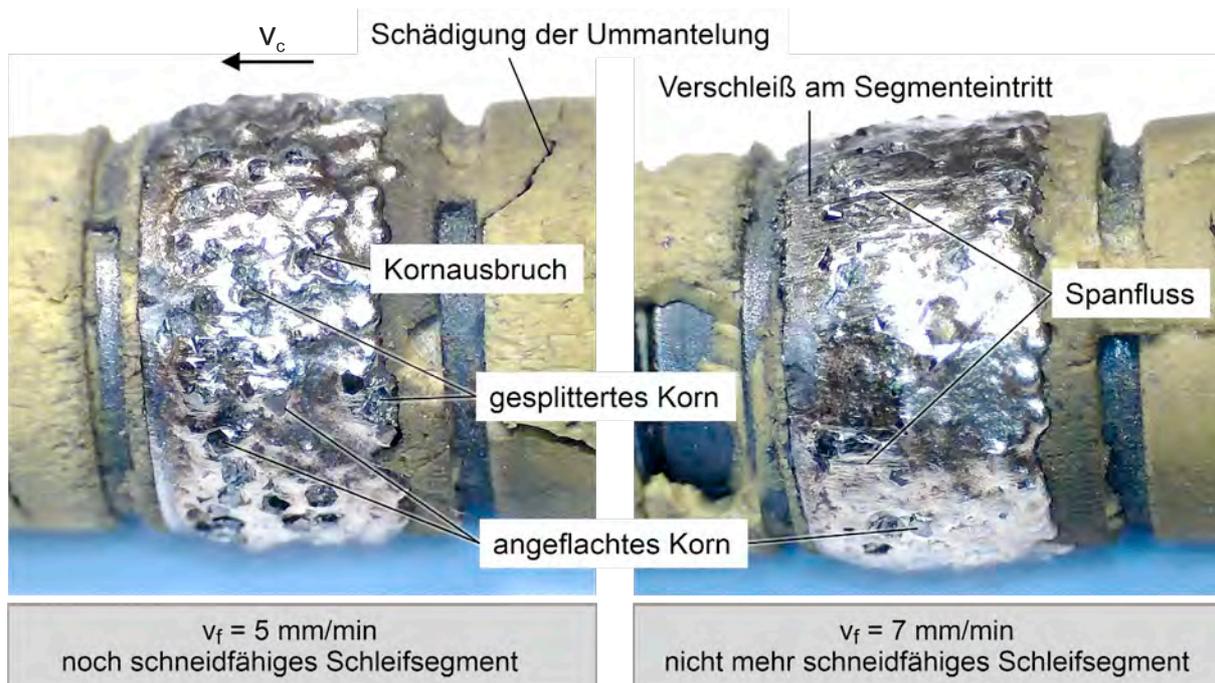
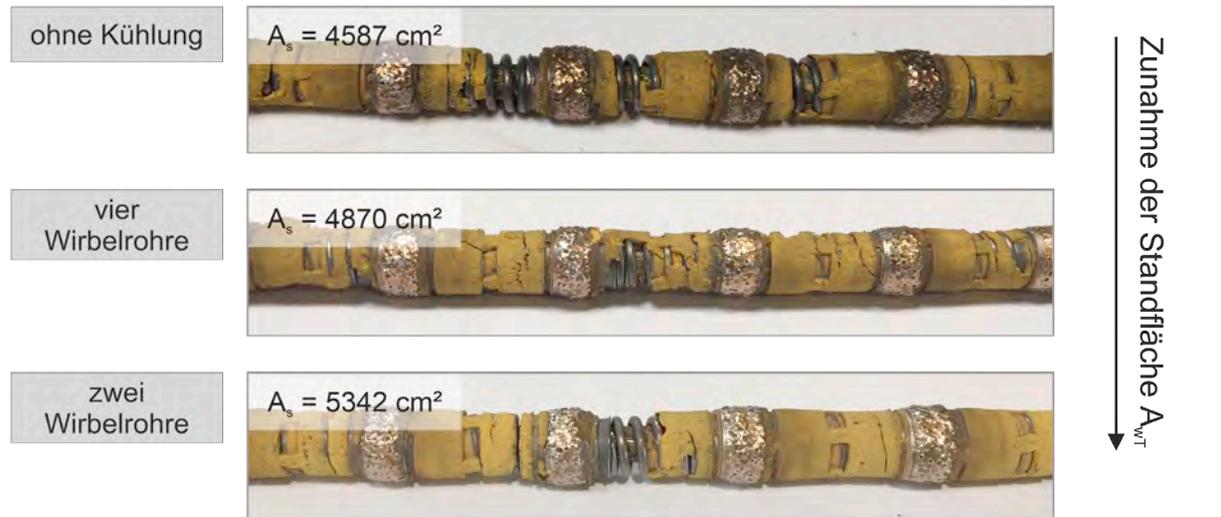


Abbildung 1: Mikroskopischer Segmentverschleiß in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

Im weiteren Verlauf wurden Untersuchungen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt mit unterschiedlicher Kühlleistung. Hier bestätigt sich in allen Fällen, dass die thermische Versprödung der Gummierung standzeitbestimmend ist. Die thermisch bedingte Versprödung der Gummierung führt zu Rissbildung im Gummi, wodurch die Segmente nicht mehr fixiert werden und frei drehbar auf dem Seil sind. Tritt dieser Effekt in größeren Bereichen auf dem Seil auf, steigt die Belastung der Abstandsfedern, wodurch diese

versagen und zusammengedrückt werden. Dadurch werden Bereiche des Trägerseils freigelegt und es kann zum plötzlichen Versagen des Werkzeugs durch Seilriss kommen. Deswegen wird der Punkt, an dem die Segmente nicht mehr ausreichend fixiert werden als Standzeitende angenommen. Die festgestellte Abnahme der Schnittfähigkeit der Werkzeuge führt zu einer erhöhten thermischen Belastung der Gummierung und damit zu einem früheren Erreichen der Werkzeugstandzeit. In Abbildung 2 sind die Werkzeuge am Versuchsende dargestellt. Zu sehen sind die Risse in der Gummierung und freigelegte Abstandsfedern am Ende der Standzeit. Durch die optimierte Kühlstrategie ist es jedoch möglich die Werkzeugstandzeit auf 5.342 cm<sup>2</sup> zu erhöhen, was einer Erhöhung um 16 % entspricht.



Prozessstellgrößen:	Werkzeug:	Werkstück:
$v_c = 20$ m/s	Husqvarna C1000	Versuchsblock aus
$v_f = 5$ mm/min	$d_s = 10,3$ mm	Baustahl S355 JR
$p_v = 2,5$ bar	$n_s = 44$ 1/m	
Kühlung variiert	$\lambda = 0,220$	

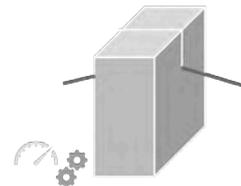


Abbildung 2: Vergleich der Werkzeugummantelung in Abhängigkeit der Kühlung

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP2: Im zweiten Arbeitspaket wird der Einfluss der Werkzeugspezifikation auf das Einsatzverhalten untersucht. Es ist in Absprache mit verschiedenen Herstellern der Seile geplant, die Segmentlänge im ersten Schritt in drei Stufen zu variieren. Diese Versuche sollen abgeschlossen werden.

AP4: Das begonnene Modell zur Vorhersage der Prozesstemperaturen wird weiterfortgeführt und um die Ergebnisse aus AP2 erweitert.

AP5: Es wird mit der Validierung der Leistungsfähigkeit des neuen Modells begonnen.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Denkena, B., Krödel, A., Heller, C. (2021): Model based dry wire grinding of steel, 15. Internationales Symposium „Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle“ (KONTEC), Dresden

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS) TP: Parametervalidierung zum Tiefenschnitt von hochbewehrtem Stahlbeton und Erprobung eines neuartigen Anbaugeräts zur Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen"	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 825.374,50 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing Sascha Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts „MAARISS“ ist die Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit aus den Projekten „INAS“ (Abtrags- und Trenntechnologien in einer Verfahrenskombination aus Hinterschneid- und Frästechnologie) und „DefAhS“ (Trennverfahren von hochbewehrtem Stahlbeton mittels Kombinationswerkzeug aus Wendeschneidplatten und Schlaglamellen) hin zu einem Demonstrator für den Einsatz in einer kerntechnischen Anlage. Mit der Entwicklung einer hybriden Frästrommel und dem erfolgreichen Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton wurden im Forschungsprojekt „DefAhS“ deutlich die Verfahrensweise und die Machbarkeit aufgezeigt.

Im Verbundprojekt „Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung“ („MAARISS“) kooperiert das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) als Forschungseinrichtung mit den Industriepartnern Herrenknecht AG und Kraftanlagen Heidelberg GmbH. Die bereits patentierte Frästrommel soll von ihren aktuellen Dimensionen in eine kompaktere und leichtere Bauweise überführt werden. Ebenfalls soll die Absaugung direkt an der Abtragseinheit erforscht und überarbeitet werden, welches für den finalen Einsatz in einer kerntechnischen Anlage entscheidend ist. Vor Ort sollen Risse in Stahlbetonstrukturen automatisiert überfräst werden, um eine anschließende Freimessung durch das Personal zu ermöglichen. Da die im Arbeitspaket „Tiefenschnittparametervalidierung“ gewonnenen Ergebnisse gezeigt haben, dass bei dem Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton mit diesem hybriden Fräsverfahren die erforderlichen Drehmomente, Rückstellkräfte und Vibrationen am Anbaugerät so hoch sind, dass keine leichte Bauweise möglich ist, wurde am 22.03.2023 offiziell eine Zieländerung eingereicht und akzeptiert. Teil der Zieländerung ist es, den bestehenden DefAhS-Demonstrator umzubauen und mit Sensorik zu erweitern, dass zum Ende des Projektes ein Prototyp vorgestellt werden kann.

Der definierte Abtrag von Stahlbeton stellt insbesondere beim Rückbau von nuklearen Anlagen einen zentralen Punkt dar. Durch eine selektive Entnahme von kontaminiertem Material kann der überwiegende und unbelastete Anteil der Gesamtmasse wieder dem normalen Recyclingkreislauf zugeführt werden. Ein Problem besteht aktuell beim lokal begrenzten Tiefenabtrag von Stahlbetonen, z.B. bei Rissen oder Ausbrüchen, so dass die entstehenden Oberflächen im Anschluss freimessbar sind.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- Arbeitspaket 0: Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik
- Arbeitspaket 1: Analyse des Stands der Technik
- Arbeitspaket 2: Schnittprozessanalyse und -verbesserung
- Arbeitspaket 3: Absaugungskonzept für den Materialabtransport
- Arbeitspaket 4: Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
- Arbeitspaket 5: Datenerfassung / Integration von Datenanalysen
- Arbeitspaket 6: Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
- Arbeitspaket 7: Vor-Ort-Tests

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

In AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ wurde eine neue Werkzeugbestückung, engeres Spacing und 12-Punkt Lamellen getestet. Beim Einsatz von 12-Punkt Lamellen konnte kein wesentlicher Unterschied beim Abtragsverhalten festgestellt werden. Gleiches zeigten auch Laserscans der Betonoberfläche.

Es wurde ein Kamerasystem, bestehend aus drei hochauflösenden, fernbedienbaren Videokameras im Versuchstand eingebaut. Durch die Positionierung nahe der Trommel kann der Fräsprozess genau beobachtet und analysiert werden.

Der Versuch von einem Zyklus aus 3 Abtragungsschritten (Beton-Beton-Stahl) zu einem 2-Schritt-Zyklus (Beton-Stahl) zu wechseln war nicht erfolgreich.

Die vorlaufenden Trennscheiben am Trommelrand haben die orthogonale Bewehrung am Rand durchtrennt und die Bewehrungsstäbe wurden durch die Trommeldrehung aus der Nut geschlagen. Beim Herausschleudern des abgetrennten Bewehrungsstabs wurden teilweise WSP beschädigt. Dieser Vorgang konnte durch das installierte Kamerasystem mit Videoaufnahmen genau aufgezeichnet und live beobachtet werden, wodurch der Versuch schnell unterbrochen, und größere Beschädigungen verhindert werden konnten. Der Schnitt von parallel liegender Bewehrung führte zu Beschädigungen an der WSP-Reihe, die dauerhaft Kontakt mit der Bewehrung hatten. Die parallele Bewehrung konnte mit dem bisherigen Abtragszyklus gut freigelegt werden. Ebenso führte die Zustellung der Trommel zu einem gleichmäßigen definierten Abtrag. Das wiederkehrende Problem des Betonstegs im Randbereich der Nut bei diesem Werkzeugaufbau konnte durch ein engeres Spacing und mehrfache Spurbelegung nicht reduziert werden.

In AP5 wurden aufgrund der Zieländerung die Anforderungen und Arbeitsaufgaben angepasst. Die bisherigen Arbeiten haben sich darum gedreht, die Detektion der Stahlstrukturen und die Oberflächenbeschaffenheit während des Prozesses zu untersuchen. Hierfür wurde eine Vielzahl an möglichen Analyseverfahren (Hallsonden, Wärmebilder, Laseraufnahmen, Vibrationen des Gesamtsystems, Schallanalysen, etc.) auf ihre Tauglichkeit geprüft. Jedes dieser Analyseverfahren weist jedoch Schwächen und Risiken auf, weshalb geplant war, ein bereits ausgefeiltes, von Spezialisten entwickeltes System für den späteren Demonstrator zuzukaufen. Hierfür wurden verschiedene Möglichkeiten recherchiert und bereits Kontakt zu Firmen aufgenommen (Beispiele: Profonometer für Stahlerkennung beispielsweise von der Firma Hilti oder Gesamtsysteme u.a. der Firma JenOptic, Optris oder Phyttec). Aufgrund der erwähnten Zieländerung war ein solches System nun jedoch nicht mehr notwendig. Ziel ist es daher, die durchgeführte Recherche und Tests auszuwerten, zu analysieren und Ergebnisse aufzuzeigen.

So wird der bisherige DefAhS-Demonstrator mit einer Sensorfusion ausgestattet, um als Prototyp das neue hybride Fräsverfahren besser analysieren und durchführen zu können. Zudem soll in AP5 daran gearbeitet werden, dass alle Betriebsparameter genau eingestellt und erfasst werden können. Diese Teilaufgabe wurde bereits erfüllt.

Für AP7 wurde das Trägergerät geliefert.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Es sollen weitere Fräsversuche mit paralleler Bewehrung durchgeführt werden, da die Achsen bei diesen Versuchen beschädigt wurden und daher noch keine aussagekräftigen Daten zu der Bewehrungslage gesammelt werden konnten. Zudem steht eine Wartung des Gesamtsystems durch Herrenknecht an. In AP5 werden die Recherchen und erhaltenen Daten aus Versuchen ausgewertet und ein fertiges Konzept geplant. Zum Abschluss des Projektes ist eine Vorstellung des umgebauten Demonstrators vor interessiertem Publikum der Rückbaubranche sowie dem konventionellen Bau geplant.

Im AP3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ wurde ein finaler Prototyp einer Absaugdüse angefertigt. Die Funktion wurde mit Fräsversuchen am DefAhS-Demonstrator geprüft. Anhand der die Düsengeometrie wurde eine Konstruktionszeichnung und eine Skizze der Schlauchführung von HK erstellt. Diese Pläne sollen hinsichtlich der Strömungsmechanik und der technischen Umsetzung geprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen“ (DefAhS)

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Herrenknecht AG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS) TP: Konzeptionierung eines hochflexiblen Anbaugerätes als Prüfstand zur experimentellen Untersuchung für die Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen sowie Neukonzeptionierung eines Absaugsystems für den Materialabtransport"	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 334.657,75 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. Frederic Seng	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> seng.frederic@herrenknecht.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts „MAARISS“ ist die Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit aus den Projekten „INAS“ (Abtrags- und Trenntechnologien in einer Verfahrenskombination aus Hinterschneid- und Frästechnologie) und „DefAhS“ (Trennverfahren von hochbewehrtem Stahlbeton mittels Kombinationswerkzeug aus Wendeschneidplatten und Schlaglamellen) hin zu einem Demonstrator für den Einsatz in einer kerntechnischen Anlage. Mit der Entwicklung einer hybriden Frästrommel und dem erfolgreichen Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton wurden im Forschungsprojekt „DefAhS“ deutlich die Verfahrensweise und die Machbarkeit aufgezeigt.

Im Verbundprojekt „Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung“ („MAARISS“) kooperiert das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) als Forschungseinrichtung mit den Industriepartnern Herrenknecht AG und Kraftanlagen Heidelberg GmbH. Die bereits patentierte Frästrommel soll von ihren aktuellen Dimensionen in eine kompaktere und leichtere Bauweise überführt werden. Ebenfalls soll die Absaugung direkt an der Abtragseinheit erforscht und überarbeitet werden, welches für den finalen Einsatz in einer kerntechnischen Anlage entscheidend ist. Vor Ort sollen Risse in Stahlbetonstrukturen automatisiert überfräst werden, um eine anschließende Freimessung durch das Personal zu ermöglichen. Da die im Arbeitspaket „Tiefenschnittparametervalidierung“ gewonnenen Ergebnisse gezeigt haben, dass bei dem Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton mit diesem hybriden Fräsverfahren die erforderlichen Drehmomente, Rückstellkräfte und Vibrationen am Anbaugerät so hoch sind, dass keine leichte Bauweise möglich ist, wurde am 22.03.2023 offiziell eine Zieländerung eingereicht und akzeptiert. Teil der Zieländerung ist es, den bestehenden DefAhS-Demonstrator umzubauen und mit Sensorik zu erweitern, dass zum Ende des Projektes ein Prototyp vorgestellt werden kann.

Der definierte Abtrag von Stahlbeton stellt insbesondere beim Rückbau von nuklearen Anlagen einen zentralen Punkt dar. Durch eine selektive Entnahme von kontaminiertem Material kann der überwiegende und unbelastete Anteil der Gesamtmasse wieder dem normalen Recyclingkreislauf zugeführt werden. Ein Problem besteht aktuell beim lokal begrenzten Tiefenabtrag von Stahlbetonen, z.B. bei Rissen oder Ausbrüchen, so dass die entstehenden Oberflächen im Anschluss freimessbar sind.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- Arbeitspaket 0: Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik
- Arbeitspaket 1: Analyse des Stands der Technik
- Arbeitspaket 2: Schnittprozessanalyse und -verbesserung
- Arbeitspaket 3: Absaugungskonzept für den Materialabtransport
- Arbeitspaket 4: Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
- Arbeitspaket 5: Datenerfassung / Integration von Datenanalysen
- Arbeitspaket 6: Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
- Arbeitspaket 7: Vor-Ort-Tests

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

In AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ wurde der Schnittprozess am DefAhS-Versuchsstand mit neuer optimierter Werkzeugbestückung durch das KIT durchgeführt. Unter den gegebenen Schnittparameter-Einstellungen konnten jedoch keine nennenswerten Erfolge bei der Abtragsleistung erzielt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch versucht den bisherigen in mehreren Arbeitsschritten unterteilten Prozessablauf (Zyklus) für die Freilegung und den Abtrag der Stahlbewehrung durch deren Kombination zu vereinfachen. Diese Möglichkeit konnte wegen aufgetretenen Beschädigungen an den Wendeschneidplatten (WSP) für den Stahlabtrag jedoch nicht bestätigt werden und wird daher nicht weiterverfolgt. Desweiteren wurde auch die unterschiedliche räumliche Lage der Bewehrungsstäbe in den durch das KIT durchgeführten Versuchen zur Verifizierung des Schnittprozesses getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Freilegung der Bewehrungsstäbe unabhängig von deren räumlichen Lage zuverlässig funktioniert. Demgegenüber bewirken die leicht vorseilenden Trennscheiben im Randbereich das frühzeitige Ausbrechen von noch nicht vollständig zerspannten Bewehrungsstäben. Dadurch wurden die WSPs zumindest teilweise beschädigt. Zudem sind auch WSP-Beschädigungen beim Abtrag der in Längsrichtung angeordneten Bewehrungsstäben teilweise aufgetreten.

Wie bereits in der Vergangenheit festgestellt befindet sich sowohl in der Nutmitte als auch im Randbereich unmittelbar neben dem Trennscheibenschnitt eine kleine Restbetonerhebung (Stegbildung) und somit der Bewehrungsstab an diesen Stellen nicht vollständig freigelegt ist. Dies führt ebenfalls zu teilweisen Beschädigungen der WSP ausschließlich in diesen Teilbereichen.

Demzufolge wurde durch HK die Werkzeugbestückung im Detail untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass der Abstand (das sogenannte Spacing) der Schlaglamellen in diesen Teilbereichen deutlich größer (6 – 8 mm) ist. Daraufhin wurde durch HK die Werkzeugbestückung konstruktiv komplett überarbeitet und ein Konzeptentwurf (3D-CAD) erstellt. Auf dieser Basis wurden die ersten Fertigungszeichnungen abgeleitet.

Im AP3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ wurden die erforderlichen strömungstechnischen Optimierungen aus den Erkenntnissen der Versuchsdurchführungen und den theoretischen Untersuchungen durch das KIT zusammengestellt und abschließend im Rahmen eines Vor-Ort-Termines gemeinsam im Detail besprochen.

In AP6 „Umsetzung des neuen Demonstrator“ wurden im Hinblick auf die erforderlichen Service- und Wartungsarbeiten am DefAhS-Versuchsstand die relevanten Bauteile und Betriebsmittel vor Ort am KIT begutachtet, beprobt und erfasst. Die Ersatzteile wurden aufgelistet und bei den Lieferanten bestellt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

In AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ werden alle notwendigen Fertigungszeichnungen für die neue überarbeitete Werkzeugbestückung erstellt. Danach wird die Neu- und Nachbearbeitung der Bauteile angefragt und bestellt. Nach Lieferung der bestellten Bauteile erfolgt die Montage, Inbetriebnahme und Versuchsdurchführung mit der neuen Werkzeugbestückung am DefAhS-Versuchsstand.

Im AP3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ wird der im 3D-CAD erstellte Konzeptentwurf hinsichtlich den gemeinsam mit dem KIT bereits abgestimmten erforderlichen strömungstechnischen Optimierungen durch HK final bearbeitet.

In AP6 „Umsetzung des neuen Demonstrator“ werden die eingeplanten Service- und Wartungsarbeiten am DefAhS-Versuchsstand zeitnah in Abstimmung mit dem KIT durch HK vor Ort am KIT durchgeführt.

Zum Abschluss des Projektes ist eine Vorstellung des umgebauten Demonstrators vor interessiertem Publikum der Rückbaubranche sowie der konventionellen Baubranche eingeplant.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen“ (DefAhS)

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Kraftanlagen Heidelberg GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS) TP: Fachkundige Planungs- und Projektberatung zu den Anforderungen an ein mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung und deren Umsetzung sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 70.869,12 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Jonas Braun	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> jonas.braun@kraftanlagen.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts „MAARISS“ ist die Fortführung der Forschungs- und Entwicklungsarbeit aus den Projekten „INAS“ (Abtrags- und Trenntechnologien in einer Verfahrenskombination aus Hinterschneid- und Frästechnologie) und „DefAhS“ (Trennverfahren von hochbewehrtem Stahlbeton mittels Kombinationswerkzeug aus Wendeschneidplatten und Schlaglamellen) hin zu einem Demonstrator für den Einsatz in einer kerntechnischen Anlage. Mit der Entwicklung einer hybriden Frästrommel und dem erfolgreichen Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton wurden im Forschungsprojekt „DefAhS“ deutlich die Verfahrensweise und die Machbarkeit aufgezeigt.

Im Verbundprojekt „Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung“ („MAARISS“) kooperiert das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) als Forschungseinrichtung mit den Industriepartnern Herrenknecht AG und Kraftanlagen Heidelberg GmbH. Die bereits patentierte Frästrommel soll von ihren aktuellen Dimensionen in eine kompaktere und leichtere Bauweise überführt werden. Ebenfalls soll die Absaugung direkt an der Abtragseinheit erforscht und überarbeitet werden, welches für den finalen Einsatz in einer kerntechnischen Anlage entscheidend ist. Vor Ort sollen Risse in Stahlbetonstrukturen automatisiert überfräst werden, um eine anschließende Freimessung durch das Personal zu ermöglichen. Da die im Arbeitspaket „Tiefenschnittparametervalidierung“ gewonnenen Ergebnisse gezeigt haben, dass bei dem Abtrag von hochbewehrtem Stahlbeton mit diesem hybriden Fräsverfahren die erforderlichen Drehmomente, Rückstellkräfte und Vibrationen am Anbaugerät so hoch sind, dass keine leichte Bauweise möglich ist, wurde am 22.03.2023 offiziell eine Zieländerung eingereicht und akzeptiert. Teil der Zieländerung ist es, den bestehenden DefAhS-Demonstrator umzubauen und mit Sensorik zu erweitern, dass zum Ende des Projektes ein Prototyp vorgestellt werden kann.

Der definierte Abtrag von Stahlbeton stellt insbesondere beim Rückbau von nuklearen Anlagen einen zentralen Punkt dar. Durch eine selektive Entnahme von kontaminiertem Material kann der überwiegende und unbelastete Anteil der Gesamtmasse wieder dem normalen Recyclingkreislauf zugeführt werden. Ein Problem besteht aktuell beim lokal begrenzten Tiefenabtrag von Stahlbetonen, z.B. bei Rissen oder Ausbrüchen, so dass die entstehenden Oberflächen im Anschluss freimessbar sind.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- Arbeitspaket 0: Beratung und Kontaktaufnahme zu Experten aus dem Bereich der Kerntechnik
- Arbeitspaket 1: Analyse des Stands der Technik
- Arbeitspaket 2: Schnittprozessanalyse und -verbesserung
- Arbeitspaket 3: Absaugungskonzept für den Materialabtransport
- Arbeitspaket 4: Neuentwicklung eines hochmobilen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
- Arbeitspaket 5: Datenerfassung / Integration von Datenanalysen
- Arbeitspaket 6: Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts (Abtragseinheit mit Adapterstück)
- Arbeitspaket 7: Vor-Ort-Tests

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Im Rahmen des AP2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ wurde eine neue Werkzeugbestückung, engeres Spacing und 12-Punktlamellen getestet. Es wurde ein Kamerasystem, bestehend aus drei hochauflösenden, fernbedienbaren Videokameras im Versuchstand eingebaut. Durch die Positionierung, nahe der Trommel, kann der Fräsprozess genau beobachtet und analysiert werden. Der Versuch von einem Zyklus aus 3 Abtragungsschritten (Beton-Beton-Stahl) zu einem 2-Schritt-Zyklus (Beton-Stahl) zu wechseln war nicht erfolgreich.

In AP5 „Datenerfassung / Integration von Datenanalysen“ wurden aufgrund der Zieländerung die Anforderungen und Arbeitsaufgaben angepasst. Die bisherigen Arbeiten haben sich damit befasst, die Detektion der Stahlstrukturen und die Oberflächenbeschaffenheit während des Prozesses zu untersuchen. Aufgrund der erwähnten Zieländerung war ein solches System nun jedoch nicht mehr notwendig. Der bisherige DefAhS-Demonstrator wird mit einer Sensorfusion ausgestattet, um als Prototyp das neue hybride Fräsverfahren besser analysieren und durchführen zu können. Zudem wurde daran gearbeitet, dass alle Betriebsparameter genau eingestellt und erfasst werden können.

Die Konstruktion des Werkzeugs wurde im AP6 „Umsetzung und Integration des neuen Anbaugeräts“ auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse aus den AP3 sowie AP5 weiter optimiert.

Für AP7 „Vor-Ort-Tests“ wurde auch das Trägergerät an das KIT geliefert. Die Tests sollen nach der Zieländerung und Anpassung der Arbeitspakete am Standort des KIT stattfinden.

Kraftanlagen Heidelberg unterstützte hierbei, im Rahmen des AP 0, die Projektpartner in den jeweiligen Arbeitspaketen durch das Einbringen von Erfahrungen und spez. Knowhow, das im Rückbau von kerntechnischen Anlagen gesammelt werden konnte.

Weiter startete KAH im Berichtszeitraum mit der Koordination und Planung für das AP7 „Vor-Ort-Tests“ des Demonstrators. Dazu wurden potenzielle Interessenvertreter eruiert und angefragt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Es sollen weitere Fräsversuche mit paralleler Bewehrung durchgeführt werden, da die Achsen bei diesen Versuchen beschädigt wurden und daher noch keine aussagekräftigen Daten zu der Bewehrungslage gesammelt werden konnten. Zudem steht eine Wartung des Gesamtsystems durch Herrenknecht an. In AP5 werden die Recherchen und erhaltenen Daten aus Versuchen ausgewertet und ein fertiges Konzept geplant. Zum Abschluss des Projektes ist eine Vorstellung des umgebauten Demonstrators vor interessiertem Publikum der Rückbaubranche, sowie dem konventionellen Bau, geplant.

Im AP3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“ wurde ein finaler Prototyp einer Absaugdüse angefertigt. Die Funktion wurde mit Fräsversuchen am DefAhS-Demonstrator geprüft. Anhand der Düsengeometrie wurde eine Konstruktionszeichnung und eine Skizze der Schlauchführung von HK erstellt. Diese Pläne sollen hinsichtlich der Strömungsmechanik und der technischen Umsetzung geprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

Im AP7 „Vor-Ort-Tests“ werden nun die Ergebnisse des Forschungsprojekts in Form einer Präsentation des Demonstrators vor Interessenvertreter und potenziellen Anwendern vorgeführt.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Definierter Abtrag hochbewehrter Stahlbetonstrukturen“ (DefAhS)

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie TP: Simulationsbasierte Werkzeugauslegung und Untersuchung des Einsatzverhaltens	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 461.508,47 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> denkena@ifw.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeugen, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Durch eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sollen die Prozesskräfte gleichmäßig auf die verschiedenen Körner verteilt und so ein einheitlich geringer Verschleiß erreicht werden. In der Folge kann die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen gesteigert werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel, mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

**AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse****AP 4:**

Basierend auf den bisherigen Projektergebnissen wurden von den Projektpartnern IFAM und DIABÜ die ersten vollständigen Seilwerkzeuge hergestellt. Für die folgenden Einsatzversuche standen insgesamt vier Prototypen mit zwei unterschiedlichen Bindungen und zwei unterschiedlichen Kornspezifikationen mit jeweils 2,5 m Länge zur Verfügung (vgl. Abbildung 3). Bezüglich der Bindungen wurden die zwei Bindungen ausgewählt, die in den vorangegangenen Arbeitspaketen die höchste Härte und die größten Kornhaltekräfte beim Einzelkornschleifen gezeigt haben. Dies sind die Bindungen aus Eisen-Kupfer-Phosphor (FeCuP) und Eisen-Kobalt-Bronze (FeCoBz). Als Kornwerkstoff wurde kubisches Bornitrid der Spezifikation cBN50 im unbeschichteten und titanbeschichteten Zustand verwendet.

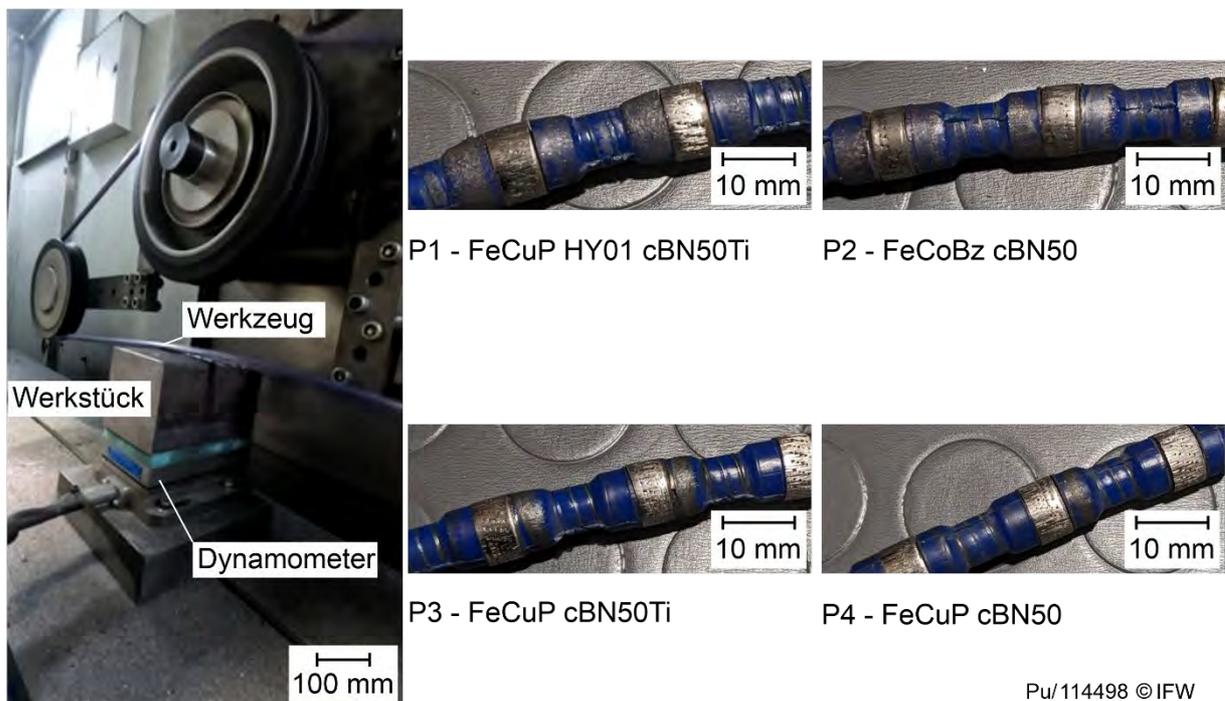


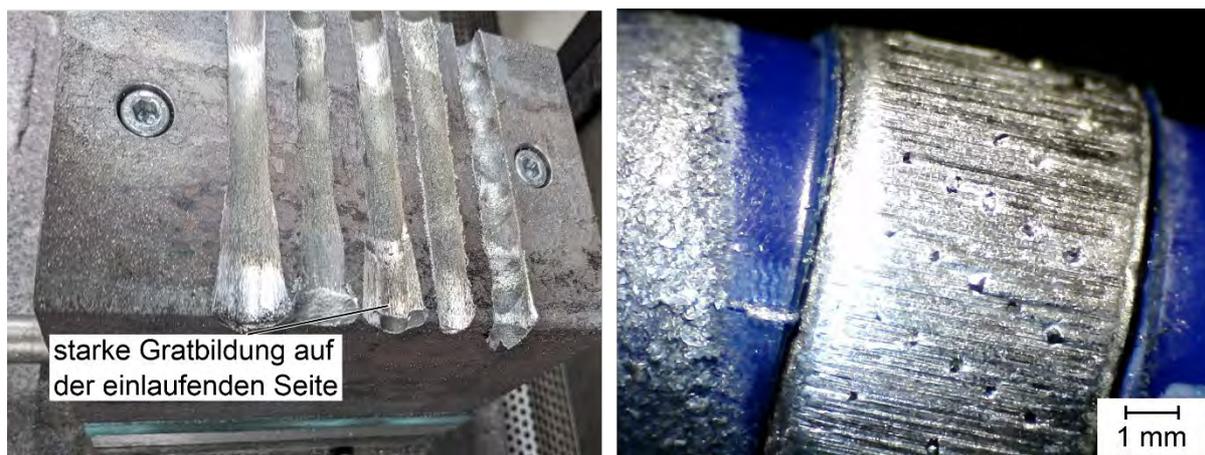
Abbildung 3 Versuchsaufbau in der Schleifmaschine und Bilder der Prototypen-Werkzeuge mit deterministischem Muster

Die Seile wurden auf dem Versuchsstand des IFW für kurze Seilschleifwerkzeuge eingesetzt (Abbildung 3 links). Als Referenz dienen ein galvanisch belegtes Diamantseil der Fa. Tyrolit (DWM-S) und ein gelötetes Diamantseil der Fa. Husqvarna (C1000).

In einem ersten Schritt wurde mit den gesinterten Prototypen jeweils ein Schärffstein (Winter Nr. 3) getrennt, um überschüssige Gummiummantelung zu entfernen und um einen initialen Kornüberstand herzustellen. Anschließend wurde ein Block des Stahls S355JR mit den Abmessungen 100 x 100 x 170 mm quer zur langen Seite getrennt, sodass sich eine Kontaktlänge von 100 mm ergab. In Absprache mit den Projektpartnern wurde zunächst eine Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 15$  m/s gewählt. Der Aufbau wurde währenddessen mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $v_f = 4$  mm/min abgesenkt. Da bei diesen Prozessstellgrößen starke Schwin-

gungen im Seil bei einem geringen Schnittfortschritt zu beobachten waren, wurde die Schnittgeschwindigkeit auf  $v_c = 10$  m/s gesenkt. Damit konnten die Schnitte erfolgreich beendet werden. In allen Versuchen wurden die Seile CNC-gesteuert um 90 mm, gemessen von der Werkstückoberseite, abgesenkt. Die resultierende Schnitttiefe unterscheidet sich zum Teil erheblich von der theoretisch maximal möglichen Schnitttiefe.

Während die industriell gefertigten Werkzeuge eine effektive Schnitttiefe von bis zu 45 mm erreichen, erzielen die Prototypen im Mittel nur eine Schnitttiefe von 10 mm. Beim Schleifen mit den Seilen mit deterministischer Kornanordnung treten hohe Normalkräfte von bis zu 180 N auf. Gleichzeitig sind die Tangentialkräfte mit 60 N vergleichsweise niedrig. Die Seile werden also stark auf das Werkstück gepresst ohne viel Material abzutragen. Dies zeigt sich in der ausgeprägten Gratbildung an der einlaufenden Seite des Werkstücks (Abbildung 4, links). Dort wird das Material stark plastisch verformt. Der primäre Grund dafür ist ein fehlender Kornüberstand. Dies ist auf der Mikroskopaufnahme in Abbildung 4 (rechts) erkennbar. Hinzu kommt, dass bei einem Teil der Schleifsegmente ganze Bereiche entweder nicht im Eingriff sind oder keine sichtbaren Körner aufweisen. Ursache dafür sind Ungenauigkeiten bei der Herstellung einer einheitlichen Zylindrizität der Segmente bzw. der vollständigen Befüllung aller Kavitäten. Ohne eine ausreichende Zahl an einsatzfähigen Abrasivkörnern kann kein effizienter Materialabtrag stattfinden. Stattdessen reibt primär die Bindung über das Werkstück.



Pu/114498 © IFW

Abbildung 4 Links: Werkstück nach dem Schleifen mit verschiedenen Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung. Rechts: Mikroskopaufnahme eines Schleifsegmentes nach einem Versuch.

Mit den Projektpartnern wurden entsprechende Maßnahmen beschlossen, um die Einsatzfähigkeit der Prototypen zu verbessern. Diese sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

#### 4. Geplante Weiterarbeit

**AP 4:** Die bereits vorhandenen Prototypen werden auf der Seilschärfmaschine beim Projektpartner DIABÜ geschärft, um die Bindung abzutragen sodass die Schleifkörner ausreichend aus der Bindung herausstehen. Anschließend erfolgen weitere Einsatzversuche am IFW. Zusätzlich wird der Herstellprozess der Segmente vom IFAM weiter optimiert, um eine vollständige Befüllung aller Kavitäten zu gewährleisten.

**AP 5:** Geplant ist die Durchführung erster Referenzversuche mit industriell gefertigten Seilschleifwerkzeugen auf der Portalseilsäge am IFW.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) – Institutsteil Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie (SiebSeil) TP: Bindungs- und fertigungsspezifische Seilschleifwerkzeugentwicklung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 464.794,30 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Thomas Weißgärber	<b>E-Mail-Adresse des/des Projektleiters/-in:</b> thomas.weißgärber@ifam-dd.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom Fraunhofer IFAM Dresden und der DIABÜ GmbH entwickelten Variante eines Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

**AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung**

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

**AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogrammunkten)**

Im aufgeführten Berichtszeitraum ist das Ziel der Arbeitspakete AP3.3 und AP3.4 die Herstellung erster Testmuster für die Validierung der Werkzeuge als Schleifseil. Auf Basis der bereits vorab erfolgten Evaluierung der Legierungssysteme, der Auslegung der Setzmuster und der Untersuchung und Bewertung der Parameter des avisierten additiven Fertigungsverfahrens, wurden in dem Berichtszeitraum Serien von CBN beladenen Testperlen für Analogieuntersuchungen erstellt.

So konnten im Berichtszeitraum die Technologiegrundlagen für eine Fertigung über 3D-Druckprozesse weiter ausgebaut und im Rahmen der Drucke für die Testseil-Schleifperlen die Parameter für die Prozesse verfeinert werden. Die Ziele wie konstanter Druckprozess bei maximaler Bau- und minimaler Fehlerrate bei der Setzung von Schneidpartikeln konnten erfolgreich spezifiziert werden. Es wurden bei den Entwicklungsarbeiten die relevanten und komplexen Zusammenhänge kontinuierlich und iterativ unter Laborbedingungen verbessert. So konnten für die verschiedenen Legierungssysteme signifikante Verarbeitungs- und Fertigungsparameter weiter bewertet werden. Durch weitere Anpassung der CBN-Schleifpartikel, welche in die Versuche mit eingebunden wurden, konnte durch das optimierte Zusammenspiel von Setzwerkzeugen und Materialparametern eine fast vollständige CBN-Füllung der Kavitäten erreicht werden (Abbildung 1).



Abbildung 5: Nach dem CBN bestücken der Schneidperlenkörper im 3D Druck unter Laborbedingungen für die Schleifseil-Einsatztest. ©Fraunhofer IFAM

Bei den im Berichtszeitraum erstellten Testperlen für die Analogietests mit Kurzseilen konnten mit den bereits in Vorversuchen ausgearbeiteten Setzmusteranordnungen SM-1 (gerade) und einer CBN Beladung von 8,2 vol.-% umgesetzt und anschließend beim Projektpartner IFW der Universität Hannover auf dem Analogieteststand geprüft werden. Für diese Testseil-Schleifperlen wurden 5 CBN-Lagen mit Versatz in den Lagen verwendet. Über diese Herangehensweise soll der allzeit stetige CBN-Eingriff im Schleifprozess sichergestellt werden. Für die Finalisierung der gedruckten Schleifperlen wurden am Fraunhofer IFAM Dresden erste Anhaltspunkte für ein Wärmebehandlungsprogramm evaluiert. Ziel hierbei war die Bauteilschwindung mit dem Aufschumpfen der gedruckten Schleifkörper auf die Seil-Trägerhülsen zu optimieren und gesichert zu erzeugen. Je nach verwendeten Bindungs-Legierungssystem wurde hierbei ein sinterbedingter linearer Schwindungswert der Bauteile von 17 % ermittelt.

Auf dieser Basis der beschriebenen Druck- und Wärmebehandlungsversuche wurden dann Schleifperlenproben gefertigt und zusammen mit den relevanten Wärmebehandlungsparametern den Projektpartner DIABÜ zur Umsetzung als Schleifseil bereitgestellt.

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

**AP3.3:** Die Entwicklung der hybriden Schleifsegmente wird hin zu optimierten Geometrieparametern der Schleifperlen geführt. Hierbei stehen eine Mischbeladung von CBN und weiteren Schleifpartikeln im Fokus der arbeiten. Eine Optimierung der Bindungsmatrix auf ein verbessertes Rückstellverhalten soll hier ebenfalls adressiert werden.

**AP3.4:** In diesem Arbeitspaket ist die Fertigung von Testperlen für die Erstellung von Schleifseilen für die weiteren Einsatz- und Validierungstest vorgesehen. Die Ergebnisse stellen hierbei die Grundlage für die in Arbeitspaket 4 zu erstellenden Schleifperlen dar.

**AP4.1:** Das Arbeitspaket dient zur Erstellung und Umsetzung von Seil-Schleifwerkzeuge für die Anwendungstests bei den beteiligten Projektpartnern. Bei diesem Arbeitspunkt geht es somit, neben der Erstellung von Testseilen, um weitere Prozessoptimierung als Basis-Datenpool für die anschließenden Kalkulationen zur Anwendungsumsetzung und der Wirtschaftlichkeit.

**AP5.1:** Der Arbeitspunkt greift die Daten aus den vorangegangenen Versuchsreihen auf und überführt diese in Kalkulationen, Berechnungen und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des im Projekt betrachteten Bauteil- und Fertigungsansatzes.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> CEDIMA Diamantwerkzeug und Maschinenbaugesellschaft mbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie TP: Einfluss der Verwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung auf die im industriellen Rückbau verwendete Maschinentechologie	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 56.618,71 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Mirko Kniese	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> mirko.kniese@cedima.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

### **AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-**

**punkten)**

**AP 1.1:** Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines parametrischen Simulationsmodells zur Simulation des Seilschleifens mit Schleifsegmenten mit deterministischer Kornanordnung.

Um die Nutzbarkeit des Simulationsmodells für die industriellen Praxis sicherzustellen und Erfahrungen aus der Industrie für den Aufbau des Simulationsmodells zu nutzen, wurden in Gesprächen mit den Projektpartnern Anforderungen an die Simulation festgelegt. Zusätzlich zu den Setzmustern der Schleifsegmente sollen die Geometrie des Werkstücks (z. B. Block, Rohr), das Werkstückmaterial (Stahl, Beton) und die Prozessstellgrößen einstellbar sein. Relevante Ausgangsgrößen sind die Kräfte am einzelnen Korn und die Gesamtprozesskraft, die resultierende Maschinenleistung, die erreichbare Schnittfläche bzw. der Verschleiß der Schleifsegmente.

Das Simulationsmodell wurde um andere Geometrien erweitert. Der Verschleiß des Einzelkorns ist nun integriert, um auch nach einem Kornversagen Aussagen über das Schleifverhalten des Setzmusters zu tätigen. Diese Ergänzungen ermöglichen eine differenzierte Simulation des Schleifprozesses.

In der Diskussion ergaben sich weitere mögliche Erweiterungen, wie das Schwingungsverhalten des Seiles und die Rotation.

**AP 1.2:** Es wurden weitere Simulationen auf der Basis eines zentral zusammengesetzten Versuchsplanes durchgeführt. Dabei wurden die Korngröße, das Setzmuster und die Prozessstellgrößen systematisch variiert. Anhand der dabei generierten Daten wurde ein lineares Regressionsmodell erstellt, welches den Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen (Korngröße, Setzmuster und Prozessstellgrößen) und der mittleren Spannungsdicke je Korn beschreibt. Hier zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Kornabstand und der mittleren Eindringtiefe des einzelnen Korns. Die Spannungsdicke wird außerdem signifikant durch den axialen Kornabstand und den Versatz der Schleifkörner beeinflusst. Mit einem solchen Regressionsmodell ist es möglich, eine Optimierung des Setzmusters anhand verschiedener Zielgrößen vorzunehmen

**AP 3:** Es wurden Analogieversuche mit Einzelperlen durchgeführt, um eine wirtschaftlichere Zielerreichung zu ermöglichen, wurde dies auf Ringe reduziert. Mit diesen soll die Kornhaltkraft in einer bestimmten Bindung dargestellt werden, um damit die optimale Bindung für die Einsatzuntersuchungen zu ermitteln. Zwei Bindungssysteme sind ausgewählt.

**AP 4:** Die ersten Testversuche mit kurzen Seilen wurden durchgeführt. In den Versuchen beim IFW konnte bislang keine Vergleichbarkeit zu derzeit marktüblichen Seilen erreicht werden. Nach Analyse der Versuche werden nun bestimmte Parameter verändert.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

**AP 1.1:** Das Simulationsmodell wird stetig erweitert und angepasst.

**AP 1.2:** Es werden weitere Simulationen mit dem Ziel der optimalen Setzparameter und Korngrößen durchgeführt. Zusätzlich werden Simulation mit den neu erarbeiteten Parametern durchgeführt. Das Simulationsmodell wird erweitert und erhält neue Parameter.

**AP 3:** Nach den ersten Versuchen werden weitere Vergleiche erstellt. Des Weiteren soll noch einmal der Schneidstoff CBN durch Diamant ersetzt werden, um die Vergleichbarkeit zu den marktüblichen Werkzeugen herzustellen.

**AP 4:** Nach den ersten Testaufbauten werden die endgültigen Testabläufe für die Einsatzuntersuchungen entwickelt.

**AP 5:** Die maschinenseitigen Voraussetzungen für den praxisnahen Einsatz werden geschaffen

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 1559429D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> CCD Diamanttechnik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie TP: Anwendung von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Schneidstoffanordnung im industriellen Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 51.151,28 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Uwe Gerecke...	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> ug@ccd-diamanttechnik.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

#### AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

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

Im ersten Halbjahr 2023 hat CCD Diamanttechnik mehrere Vorhaben bei industriellen Auftraggebern umgesetzt, bei denen unter anderem Seilschleifmaschinen zum Einsatz kamen. Dabei wurden unter anderem Trennschnitte in Schiffspropeller aus Aluminiumbronze, in Walzwerkwalzen aus hochlegiertem Chromstahl sowie verschiedene Feuerfestmaterialien ausgeführt. Es konnten bisher nur konventionelle handelsübliche Seile verwendet werden, da Siebseile noch nicht in den erforderlichen Längen verfügbar waren.

Die gewonnenen Referenzdaten liefern Hinweise auf die Potentiale aber auch auf die aktuellen Grenzen des Seilschleifverfahrens. Letztere sind oft wirtschaftlicher Natur und stärken die Erwartung, durch Verbesserung der Werkzeuge und Weiterentwicklung der Maschinen weitere Aufgabengebiete für die Seilschleiftechnik zu erschließen. In vielen Bereichen des industriellen Rückbaus werden aktuell herkömmlichen „rustikalen“ Verfahren allein aus finanziellen Gründen der Vorzug gewährt, obschon die Auftraggeber eigentlich aus Arbeitsschutz- und Umweltaspekten für Alternativen offen sind.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Die Verfügbarkeit von Siebseilen in geeigneten Längen von mindestens 6,50m bis 20m steht bevor. Diese Seile werden dann zeitnah bei geeigneten Projekten zum Einsatz kommen. Dafür stellt die Firma Cedima eine Antriebsmaschine zur Verfügung, die es ermöglicht, auch auf Baustellen während des Betriebes laufend mehrere Einsatz Parameter zu erfassen und zu dokumentieren.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Diverse Anwendungen der Seilschleiftechnik im industriellen Bereich

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9429E
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> DIABÜ-Diamantwerkzeuge Heinz Büttner GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Hocheffiziente Seilschleifsegmente mittels additiver Siebdrucktechnologie TP: Auslegung und Herstellung neuartiger Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schneidstoffanordnung.	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 77.060,70 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dirk Büttner	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> buettner@diabue.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das übergeordnete Projektziel dieses Vorhabens ist die Verfügbarkeit neuartiger Seilschleifwerkzeuge, um die Produktivität des trockenen Seilschleifprozesses im kerntechnischen Rückbau deutlich zu steigern. Gleichzeitig soll die Erzeugung von radioaktiv kontaminierten Sekundärstoffen, wie Altwerkzeuge, durch eine erhöhte Standzeit der Werkzeuge verringert werden. Dies soll durch eine definierte Anordnung der Schneidpartikel erreicht werden. Eine deterministische Anordnung der Schleifkörner sorgt für eine gleichmäßige Verteilung der Prozesskräfte auf die verschiedenen Körner und damit für einen einheitlichen Verschleiß. Auf diese Weise kann eine Reduktion der Prozesskräfte erreicht und die Zeitspanfläche durch eine Erhöhung der Prozessstellgrößen erhöht werden. Die Herstellung von Schleifsegmenten mit definierter Kornanordnung erfolgt auf Grundlage einer vom IFAM Dresden und DIABÜ entwickelten Variante des Siebdruckverfahrens. Im Rahmen dieses Projektes werden außerdem neue Bindungswerkstoffe untersucht, mit dem Ziel mehrlagige und selbstschärfende Schleifsegmente im Siebdruckverfahren herzustellen. In diesem Zusammenhang werden auch die technischen Grundlagen für eine massentaugliche Fertigung geschaffen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1: Auslegung der Schleifsegmente und Bindungswerkstoffe

Entwicklung eines parametrischen Simulationsmodells des Seilschleifens für die Auslegung deterministischer Kornanordnungen. Parallel dazu werden geeignete Bindungswerkstoffe für die Herstellung mehrlagiger Schleifsegmente im Siebdruckverfahren identifiziert.

### AP 2: Fertigungsentwicklung Prototypenperlen

Untersuchung der fertigungstechnischen Realisierbarkeit verschiedener Schleifkornmuster und Herstellung von Prototypen mit ausgewählten Setzmustern.

### AP 3: Analogieuntersuchungen mithilfe einer Ritzscheibe und iterative Optimierung

Untersuchung der hergestellten Schleifperlen mittels einer Ritzscheibe und iterative Anpassung der Werkzeuge. Optimierung des Herstellprozesses und Entwicklung hybrider Schleifsegmente.

### AP 4: Einsatzuntersuchungen/Validierung

Ermittlung der Prozessgrenzen von Seilschleifwerkzeugen mit deterministischer Kornanordnung anhand von kurzen Seilen auf einem Analogieprüfstand.

### **AP 5: Optimierung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeitsmodell**

Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neuen Seilschleifwerkzeuge an praxisnahen Probekörpern und auf einem Rückbauprojekt. Erarbeitung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Seilschleifwerkzeuge mit deterministischer Schleifkornanordnung.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-** **punkten)**

AP1: Das Ziel dieses Arbeitspakets ist weiterhin die Verfügbarkeit eines parametrischen Simulationsmodells zur Simulation des Seilschleifens mit Schleifsegmenten mit deterministischer Kornanordnung sowie die Identifikation geeigneter Bindungswerkstoffe, welche im Siebdruckverfahren nutzbar sind und die Leistungsfähigkeit der Schleifsegmente, durch z. B. eine Selbstschärfung, erhöhen.

Die deterministischen Kornanordnungen wurden ausgewählt/festgelegt und am IFAM 3D-gedruckt. Zusätzlich wurden neue Recherchen für besser geeignete Bindungswerkstoffe durchgeführt.

Für die Druck- und Pastenentwicklung wurden weitere Metallpulver ausgesucht. Parallel wurden wieder externe Pasten- und Druckversuche auf Basis der gewonnen Erkenntnisse erneut in Auftrag gegeben.

Die beauftragten Pasten- und Druckversuche zeigen immer noch prozessbedingte Nachteile, wie Poren oder Fehlstellen.

Hier wurden weitere Versuche mit dem Ziel der Prozesssicherheit und Verfahrensoptimierung gemacht. Die Schneidkörner sitzen zwar besser gehalten aber immer noch zu locker in den gedruckten Kavitäten. Die Laboruntersuchungen mit dem Mikroskop zeigten, dass im Vergleich zu Diamantpartikeln die CBN-Partikel wesentlich schwieriger in die Kavitäten der Bindungsmatrix passen. Das liegt in erste Linie an der gestreckten und ungleichmäßigen Kornform vom CBN. Die Anpassung der Sinterparameter brachte bisher nur eine geringe Verbesserung der erzielten Gefügedichte. Durch zusätzliche Sintertests und Parameteroptimierungen im ersten Halbjahr 2023 konnte das jetzt gesteigert verbessert werden.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-** **punkten)**

AP1: Die initiierten Versuche mit neuen Bindungsmaterialien, die bei tieferen Sintertemperaturen  $\leq 900^\circ\text{C}$  mit Flüssigphasen die Schleifpartikel dichter umschließen, wurden weiterentwickelt. Das erste Prototypenseil mit der neuen Tieftemperaturmatrix ist fertig und soll kurzfristig im Sägeeinsatz getestet werden. Bei positivem Sägeeinsatz ist geplant die Bindung im 3D-Druck zu verarbeiten.

AP2: Es wurden die ersten Prototypen mit ausgewählten Setzmustern und CBN hergestellt, die Teile bei DIABÜ gesintert und daraus 4 jeweils 2,4 m lange Sägeseiile für den Versuchsstand Spritzgegossen.

AP3: Parallel hat DIABÜ weitere Prototypen mit einem bei DIABÜ neu entwickelten Setzmuster extern herstellen lassen, das auch auf dem Prüfstand vom IFW und in der Sägepraxis getestet werden soll.

Der Test des DIABÜ Setzmusters am IFW steht immer noch aus, da weiter an der Optimierung der Kavitätendichte gearbeitet wird.

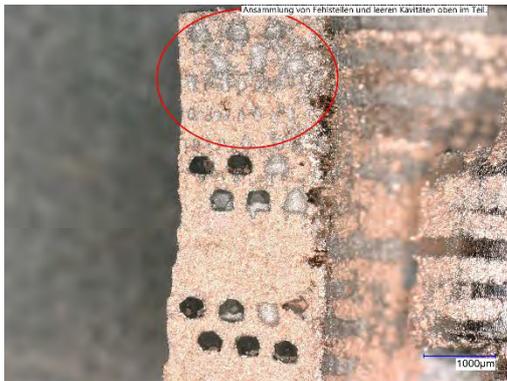
Durch die Anpassung der Druckparameter (höhe der Kavitäten), die Bindungszusammensetzung und die Sinterparameter konnte die Gefügedichte aktuell erhöht werden.

Ein zusätzliches Seil zum Sägen von Hartgestein geht in die Testreihe, um die verbesserte Kornhaftung zu bestätigen.

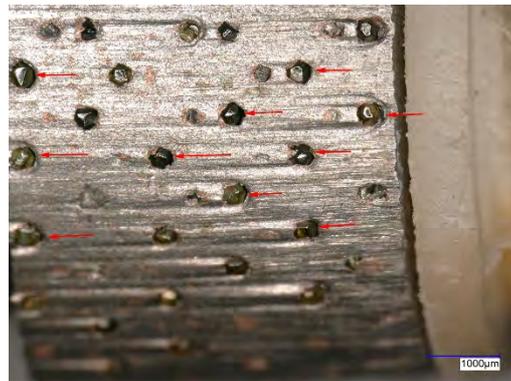
Das IFAM hat eine weitere Schleifsegmentvariante mit 10 Lagen CBN gefertigt, die bereits bei DIABÜ dicht gesintert wurde. Das neue 2,4 m Seil ist aktuell in der Produktion und soll Mitte August auf den Prüfstand beim IFW.

AP4: 4 x 2,4 m CBN-Seile wurden auf dem Analogieprüfstand zum Sägen von Stahl eingesetzt. Das Schärpen der CBN-Seile ist kritisch. Die Perlen werden noch nicht optimal gleichmäßig rund geschärft, damit alle Körner am Umfang gleich herausstehen.

### Beispielbilder DIABÜ



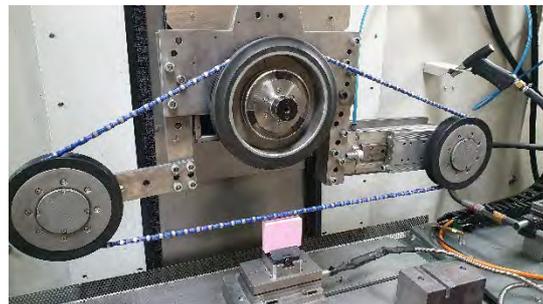
Fehlstellen in Matrix externe Schneidperle



Extern gefertigte Perle DC185, Korn gelockert



Prototypenseile CBN 2,4 m Länge



Versuchsstand Schärpen der CBN-Seile



Schnittfuge in Stahl mit CBN-Seil



Verschleißoberfläche CBN-Seil

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9430A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Werkstoffkunde	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogenrennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen TP: CAMG-Prozess	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.400.000 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Thomas Hassel	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hassel@iw.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie ergeben sich in Deutschland neue Herausforderungen bei der technischen Realisierung von Stilllegungs- und Rückbauprojekten. Hierzu sind robuste und sicher durchführbare Technologien erforderlich, die fernhantiert und unter einer Wasserabdeckung zum Einsatz kommen können. Durch die Klassifizierung möglicher Trennverfahren für metallische Werkstoffe in TRL (Technology Readiness Level) von 1-9 kann eine qualifizierte, situationsbedingte Auswahl der Verfahren getroffen werden, wodurch die Sicherheit des Rückbauprozesses erhöht wird. Einen besonderen Vorteil stellen dabei die thermischen Trennverfahren, auf Grund des vereinfachten Manipulationsaufwandes durch das rückstellkraftfreie Arbeiten, dar.

In diesem Forschungsvorhaben soll die Entwicklung des automatisierten CAMG-Schneidverfahrens, welches aktuell bei einem TRL von 4-7 einzuordnen ist, vorangetrieben werden. Durch die Aufbringung von verschleißfesten Schneidwerkstoffen mittels additiver Fertigung soll eine deutliche Verringerung des Scheibenverschleißes ermöglicht werden.

Einen weiteren Punkt in dem das Verfahren optimiert werden muss, stellt die Stromübertragung auf die rotierende Elektrode dar. Derzeit ist die Übertragung von Arbeitsströmen zwischen 850-3000 A nur durch große taktile Stromübertrager oder durch eine Stromübertragung mittels flüssigem Quecksilber möglich.

Zielsetzung des Projektes ist sowohl das Verfahren als auch die Schneidwerkstoffe weiterzuentwickeln und im Portfolio der thermischen Schneidverfahren für den kerntechnischen Rückbau zu etablieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgt der Bau einer sowohl leistungs- sowie anwendungsfähigen Demonstratoranlage mittels welcher diese Technik (CAMG-Verfahren) auf TRL > 8 angehoben werden soll.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Durchführung des Projektes gliedert sich in drei Komplexe. Im Komplex A wird der Scheibenelektrodenverschleiß bewertet indem zunächst gut verfügbare und günstige Werkstoffe für den Prozess als Elektrode genutzt werden. Für die unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffe

werden die Schneiddaten durch mechanisierte Schneidversuche ermittelt. Die Verschleißergebnisse werden in Bezug zu der Schneidleistung diskutiert und hinsichtlich der Gesamtprozessleistung interpretiert. Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen werden Elektroden additiv gefertigt. Mittels eines draht-/pulverbasierten koaxialen Laserschweißprozesses werden Hartauftragungen in Umfangsrichtung auf einen Grundkörper aufgeschweißt. Durchgeführt wird dieser Fertigungsprozess an einem Roboterschweißplatz, wozu im Rahmen des Projektes eine Anlage installiert wird. Somit ist ein Werkstoffscreening hinsichtlich der Schneidwerkstoffe sowie ein quantitativer Überblick über das Potential der verfügbaren Schneidwerkstoffe möglich.

Damit zukünftig sichergestellt werden kann, dass die Planung der thermischen Zerlegung mit höchstmöglicher Sicherheit erfolgt, soll in Komplex B nach neuesten Erkenntnissen ein Prototyp eines Schneidgerätes entwickelt werden. Das Stromübertragungsmodul muss hierbei in Zusammenarbeit mit dem Partner EWN neu ausgelegt werden, um einen entsprechend hohen Leistungsbereich abdecken zu können. Bisherige Erfolge der Flüssigmetallstromübertragung werden genutzt und Gallium als nicht gefährdende Variante für den Flüssigkeitsstromübertrager gewählt. Wesentliche Schwerpunkte im Entwicklungsprozess sind die elektrische Auslegung und die Kapselung des Moduls.

Während der Projektlaufzeit und abschließend am Projektende werden in Komplex C die Entwicklungen zur Schneidelektrode aus Komplex A und dem Aufbau der Anlage im Komplex B zusammengeführt. Somit kann die Funktionsfähigkeit der Anlage sicher abgebildet werden und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Gesamtvorhaben durchgeführt werden.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)**

- In Arbeitspaket A/3 wurden neben den Eisen- und Kupferbasiswerkstoffen die Untersuchungen auf Nickel- und Kobaltbasislegierungen ausgeweitet. Vor dem Hintergrund des guten Verschleißverhaltens und der Warmfestigkeit sind diese Werkstoffe interessant für die Anwendung als Elektrode. Im ersten Schritt konnten einfache dreidimensionale Strukturen erzeugt werden. Dafür wurden ausschließlich pulverbasierte Zusatzwerkstoffe verwendet. Die größte Herausforderung dieser Werkstoffgruppen war das spröde Werkstoffverhalten und die geringe Haftfestigkeit auf dem Substrat.
- Zur Reduktion der Entwicklungszeit wurde der in Arbeitspaket A/4 geplante Modellversuch durchgeführt. Aus erzeugten planaren 3D Strukturen wurden ca. 300 mm lange stabförmige Elektroden gefertigt, welche unter Wasser gegen das zu schneidende Material gefahren wurden. Hierzu wurde die Abschweißvorrichtung zum Unterwasserschweißen von Stabelektroden, welche am UWTW entwickelt worden ist, genutzt. Es wurde dabei ein Schweißstromkreis gebildet und ein Lichtbogen gegenüber dem Stahlwerkstoff gezündet. Dieser Lichtbogen simulierte die thermochemischen Randbedingungen im CAMG Prozess. Bei der rückblickenden Betrachtung musste festgestellt werden, dass die einzelnen Vorbereitungsschritte keine signifikante Zeitersparnis zu der Durchführung des realen CAMG-Versuches bringen. Dies liegt unter anderem daran, dass für bisher nicht verwendete Werkstoffe wie Kobalt erst eine eigene Parameterstudie an der Abschweißvorrichtung durchgeführt werden muss, um einen stabilen Lichtbogen erzeugen zu können.
- Aufgrund der Ergebnisse in Arbeitspaket A/2 werden neben geeigneten Legierungen hinaus ebenfalls Verbundwerkstoffe betrachtet. Dazu wurden verschiedene Konzepte beispielsweise in Form von Teilchen-, Faser-, oder Schichtverbundwerkstoffen entwickelt und in Arbeitspaket A/3 getestet. Hauptsächlich wurde versucht, hochschmelzende Partikel auf der Basis von Wolframkarbid oder Kohlenstoff zu integrieren.

- Im Rahmen von Arbeitspaket A/6 wurden erste Scheiben auf der Basis von Kupfer, Nickel und Kobalt getestet. Der wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit gewählten Kupferwerkstoffe hatte keinen positiven Effekt und erzeugte einen deutlicheren Verschleiß als die reine Elektrode aus Baustahl. Die größten Schnittlängen konnten mit einem NiCr-Werkstoff erzeugt werden.
- Für die Anwendung des CAMG-Verfahrens im Rückbau ist die ökonomische Betrachtung des Verfahrens von großer Wichtigkeit. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner in Arbeitspaket A/8 der erste Ansatz des Kostenmodells weiterentwickelt. Dabei profitierte das Modell von beiden Seiten durch die vertiefte Prozesskenntnis und die praktischen Erfahrungen in der Anwendung. Insgesamt konnten die Zielgröße Kosten pro Schnittmeter identifiziert werden, welche abhängig von der zu trennenden Dicke ist. Grundlegende Eingangsgrößen sind die Personalkosten, die Materialkosten für die Grundscheiben und den Zusatzwerkstoff und die Prozesskosten für das Laserauftragsschweißen und das Wasserstrahlschneiden.
- In Arbeitspaket B/4 wird der Fokus auf ein System zum schnellen, unkomplizierten Wechsel der Elektrode gelegt. Verschiedene Systeme wurden betrachtet und für die Anwendung in einer CAMG-Anlage geprüft. Da für dieses thermische Trennverfahren ein sehr hoher Strom notwendig ist, muss die Übertagung von dem Stromübertragungsmodul auf die Elektrode möglichst verlustfrei und auf kurzem Weg erfolgen. Die Verwendung eines mechanischen Spannsystems erweist sich für diesen Anwendungsfall zunächst als nicht sinnvoll. Alle Bauteile die in diesem Bereich zusätzlich verbaut werden und kontaktlos nebeneinander angeordnet sind, bieten potenzielle Angriffspunkte für das Zünden eines Lichtbogens und sprechen somit gegen die Integration eines derartigen Mechanismus. Sowohl die Rotation der Welle und Elektrode sowie die eingeschränkte Motorik der Mitarbeiter, bedingt durch die Schutzkleidung, die einen Elektrodenwechsel durchführen müssen, fordern jedoch eine einfache und zu verlässliche Sicherung der Elektroden und einen leichten Wechsel.
- Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Technikumsanlage erfolgt im Rahmen des Arbeitspakets B/5. Dazu wurden bereits die gefertigten Bauteile aus den Arbeitspaketen B/2 und B/3 mit den entsprechenden Kaufteilen zu Baugruppen zusammengebaut und einzeln auf ihre Funktion geprüft. Neben der mechanischen Funktion werden zu dem alle Baugruppen auf die Dichtheit gegenüber dem Wasser, in dem die Anlage eingesetzt werden soll, getestet. In diesem Arbeitspaket erfolgen immer wieder Optimierungsprozesse, um das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten zu erreichen.
- Im Arbeitspaket B/7 erfolgten Schneiduntersuchungen der in Komplex A hergestellten Elektroden. Es werden erste Betriebsdaten ermittelt, um die Qualität und die Leistungsfähigkeit der additiv hergestellten Schneidstoffe zu prüfen. Dabei wird der Verschleiß an der Elektrode dokumentiert und näher untersucht und die Prozessdaten in Form von Strom und Spannung erfasst.
- Für das Arbeitstakt B/8 wurde mit dem Projektpartner EWN über die Schnittkosten gesprochen und festgelegt wie ein Vergleich mit bisher verwendeten Verfahren hergestellt werden kann.
- In Arbeitspaket C/1 wurde der aktuelle Stand der Gesamtdokumentation mit den neusten Erkenntnissen überarbeitet. Die Bearbeitung der Arbeitspakete aus dem Arbeitspaket Komplex C läuft parallel zu den anderen beiden Komplexen und wird ständig fortgeführt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

- In den Arbeitspaketen A4 bis A6 soll die Umsetzung der entwickelten Verbundkonzepte erfolgen. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf Teilchenverbundwerkstoffen mit Wolframcarbid.
- Nach dem Testen der verschiedenen Verbundkonzepte wird in Arbeitspaket A/7 ein Ranking mit dem aktuellen Zwischenstand erstellt. Diese Liste dient als Grundlage für die Entscheidung, welche Konzepte und Legierungen weiterverfolgt und näher untersucht werden sollen. Der wichtigste Entscheidungsfaktor ist die erreichte Schnittleistung. Dieser Parameter ist neben der ökonomischen Betrachtung der entscheidende Faktor für den Projektpartner EWN, um einen Einsatz des CAMG Verfahrens in Rückbauprozessen einzuplanen.
- Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Technikumsanlage soll in dem Arbeitspaket B/5 erfolgen. Dazu wurden bereits die ersten gefertigten Bauteile aus den Arbeitspaketen B/2 und B/3 mit den entsprechenden Kaufteilen zu Baugruppen zusammengebaut und einzeln auf ihre Funktion geprüft. Dies wird je nach Fertigungsstand fortlaufend weitergeführt.
- Im Arbeitspaket B/7 wird die Fugenqualität in Bezug auf die unterschiedlichen Elektroden näher betrachtet. Die Ergebnisse der Schneidversuche werden in einer Gesamtanalyse mit Bezug auf die Robustheit und die Anwendungsfähigkeit diskutiert, sodass der TRL der Elektroden durch die Untersuchungen in diesem Arbeitspaket möglich wird.
- In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner EWN soll in dem Arbeitstakt B/8 genau definiert werden wie ein Schnitt in Bezug auf die Kosten abgebildet werden kann und welche Prozessbestandteile in welcher Gewichtung bei einer Berechnung mit einfließen.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es kann zurzeit kein Bezug zu anderen Vorhaben hergestellt werden.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9430B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das Kontaktlichtbogenrennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen TP: CAMG-Anwendung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 147.772,23 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. (FH) Torsten Wollermann	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> torsten.wollermann@ewn-gmbh.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie ergeben sich in Deutschland neue Herausforderungen bei der technischen Realisierung von Stilllegungs- und Rückbauprojekten.

Für den Rückbau von kontaminierten und aktivierten Metallstrukturen (z. B. Reaktorbauteile) stellt das fernhantierte Arbeiten unter einer Wasserabdeckung eine wichtige technologische Rolle dar. Hierzu sind robuste und sicher durchführbare Technologien erforderlich, die fernhantiert unter einer Wasserabdeckung zum Einsatz kommen können, welche als Alternativverfahren nebeneinander in einer Art „Werkzeugkasten“ für den Einsatz in möglichen Rückbautechnologien angeordnet sind.

Schon in der Angebotsplanung sind Unternehmen gefordert, Rückbauaufgaben sehr konkret bzw. umfassend zu planen und die Trenntechniken festzulegen, welche nach dem Stand der Technik umfassend bzgl. den Sicherheitsanforderungen als auch den Einsatzbedingungen entsprechend geprüft werden müssen. Im Forschungsprojekt wird das CAMG-Schneiden thematisiert, um es für den praktischen Einsatz vorzubereiten. Zielsetzung des Projektes ist es, sowohl das CAMG-Verfahren als auch die Schneidwerkstoffe einsatzbereit zu entwickeln und in das Portfolio der thermischen Schneidverfahren für den Rückbau kerntechnischer Anlagen einzureihen. Das Gesamtziel des Projektes lässt sich durch zwei wesentliche Teilziele erreichen. Zum einen ist die Maschinenteknologie des CAMG-Schneidverfahrens aus dem labor-technischen Bereich in den anwendungstechnischen Bereich zu übertragen.

Durch die Klassifizierung möglicher Trennverfahren für metallische Werkstoffe in TRL (Technology Readiness Level) von 1-9 kann eine qualifizierte, situationsbedingte Auswahl der Verfahren getroffen werden, wodurch die Sicherheit des Rückbauprozesses erhöht wird. Einen besonderen Vorteil stellen dabei die thermischen Trennverfahren, auf Grund des vereinfachten Manipulationsaufwandes durch das rückstellkraftfreie Arbeiten, dar.

In diesem Forschungsvorhaben soll die Entwicklung des automatisierten CAMG-Schneidverfahrens, welches aktuell bei einem TRL von 4-7 einzuordnen ist, vorangetrieben werden. Durch die Aufbringung von verschleißfesten Schneidwerkstoffen mittels additiver Fertigung soll eine deutliche Verringerung des Scheibenverschleißes ermöglicht werden.

Einen weiteren Punkt in dem das Verfahren optimiert werden muss, stellt die Stromübertragung auf die rotierende Elektrode dar. Derzeit ist die Übertragung von Arbeitsströmen zwischen 850-3000 A nur durch große taktile Stromüberträger oder durch eine Stromübertragung mit flüssigem Quecksilber möglich.

Zielsetzung des Projektes ist sowohl das Verfahren als auch die Schneidwerkstoffe weiterzuentwickeln und im Portfolio der thermischen Schneidverfahren für den kerntechnischen Rückbau zu etablieren. Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgt der Bau einer sowohl leistungs- sowie anwendungsfähigen Demonstratoranlage mittels welcher die Technik (CAMG-Verfahren) auf TRL > 8 angehoben werden soll.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstoffkunde (UWTH) der Gottfried-Wilhelm Leibniz Universität Hannover erfolgt sowohl der Aufbau einer leistungsfähigen und anwendungsfähigen Demonstratoranlage, um die Technik auf einen TRL > 8 zu heben. Parallel dazu wird die Scheibenelektrode als zentraler Punkt der Forschung fokussiert, da die Kenntnisse zur Beständigkeit und zum Verschleißverhalten noch nicht ausreichend für die Anwendung vorhanden sind.

Die Durchführung des Projektes gliedert sich in drei Komplexe. In Komplex A wird der Scheibenelektrodenverschleiß bewertet indem zunächst gut verfügbare und günstige Werkstoffe für den Prozess als Elektrode genutzt werden. Für die unterschiedlichen Elektrodenwerkstoffe werden die Schneiddaten durch mechanisierte Schneidversuche ermittelt. Die Verschleißergebnisse werden in Bezug zur Schneidleistung diskutiert und hinsichtlich der Gesamtprozessleistung interpretiert. Basierend auf den so gewonnenen Erkenntnissen werden Elektroden additiv gefertigt. Mittels eines draht-/pulverbasierten coaxialen Laserschweißprozesses werden Hartauftragungen in Umfangsrichtung auf einen Grundkörper aufgeschweißt. Durchgeführt wird dieser Fertigungsprozess an einem Roboterschweißplatz, wozu im Rahmen des Projektes eine Anlage installiert wird. Somit ist ein Werkstoffscreening hinsichtlich der Schneidwerkstoffe sowie ein quantitativer Überblick über das Potential der verfügbaren Schneidwerkstoffe möglich.

Damit zukünftig sichergestellt werden kann, dass die Planung der thermischen Zerlegung mit höchstmöglicher Sicherheit erfolgt, soll in Komplex B nach neuesten Erkenntnissen ein Prototyp eines Schneidgerätes entwickelt werden. Das Stromübertragungsmodul muss hierbei in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern neu ausgelegt werden, um einen entsprechend hohen Leistungsbereich abdecken zu können. Bisherige Erfolge der Flüssigmetallstromübertragung werden genutzt und Gallium als nicht gefährdende Variante für den Flüssigkeitsstromüberträger gewählt. Wesentliche Schwerpunkte im Entwicklungsprozess sind die elektrische Auslegung und die Kapselung des Moduls.

Während der Projektlaufzeit und abschließend am Projektende werden in Komplex C die Entwicklungen zur Schneidelektrode aus Komplex A und dem Aufbau der Anlage in Komplex B zusammengeführt. Somit kann die Funktionsfähigkeit der Anlage sicher abgebildet werden und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Gesamtvorhaben durchgeführt werden.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Basierend auf den wissenschaftlichen Recherchen zu den Werkstoffsystemen wurden die aktuellen Erkenntnisse aus dem Arbeitspaket A/2 mit der UWTH weiterführend thematisiert, bewertet und sich über weitere Auswahl Tendenzen verständigt. Im Ergebnis dieser vorliegenden Erkenntnisse werden in den Einzelbetrachtungen grundlegende Werkstoffkriterien zur konstruktiven Ausführung der Schneidelektrode analysiert und als Planungsansatz final untersucht.

- In Arbeitspaket A/3 wurden neben den Eisen- und Kupferbasiswerkstoffen die Untersuchungen auf Nickel- und Kobaltbasislegierungen ausgeweitet. Vor dem Hintergrund des guten Verschleißverhaltens und der Warmfestigkeit sind diese eisenbasierten Werkstoffe für die Anwendung als Elektrode als sehr zielführend einzustufen. Im ersten Schritt konnten einfache dreidimensionale Strukturen erzeugt werden. Dafür wurden ausschließlich pulverbasierte Zusatzwerkstoffe verwendet. Die größte Herausforderung dieser Werkstoffgruppen war das spröde Werkstoffverhalten und die geringe Haftfestigkeit auf dem Substrat.
- Zur Reduktion der Entwicklungszeit wurde der in Arbeitspaket A/4 geplante Modellversuch durchgeführt. Aus erzeugten planaren 3D Strukturen wurden ca. 300 mm lange stabförmige Elektroden gefertigt, welche unter Wasser gegen das zu schneidende Material gefahren wurden. Hierzu wurde die Abschweißvorrichtung zum Unterwasserschweißen von Stabelektroden, welche am UWTH entwickelt worden ist, genutzt. Es wurde dabei ein Schweißstromkreis gebildet und ein Lichtbogen gegenüber dem Stahlwerkstoff gezündet. Dieser Lichtbogen simulierte die thermochemischen Randbedingungen im CAMG Prozess. Bei der rückblickenden Betrachtung musste festgestellt werden, dass die einzelnen Vorbereitungsschritte keine signifikante Zeitersparnis zu der Durchführung des realen CAMG-Versuches bringen. Dies liegt unter anderem daran, dass für bisher nicht verwendete Werkstoffe wie Kobalt erst eine eigene Parameterstudie an der Abschweißvorrichtung durchgeführt werden muss, um einen stabilen Lichtbogen erzeugen zu können.
- Aufgrund der Ergebnisse in Arbeitspaket A/2 werden neben geeigneten Legierungen hinaus ebenfalls Verbundwerkstoffe betrachtet. Dazu wurden verschiedene Konzepte beispielsweise in Form von Teilchen-, Faser-, oder Schichtverbundwerkstoffen entwickelt und in Arbeitspaket A/3 getestet. Hauptsächlich wurde versucht, hochschmelzende Partikel auf der Basis von Wolframkarbid oder Kohlenstoff zu integrieren.
- Im Rahmen von Arbeitspaket A/6 wurden erste Scheiben auf der Basis von Kupfer, Nickel und Kobalt getestet. Die wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit gewählten Kupferwerkstoffe hatten keinen positiven Effekt und erzeugten einen deutlich höheren Verschleiß als die reine Elektrode aus Baustahl. Die größten Schnittlängen konnten mit einem CrNi-Werkstoff erzeugt werden.
- Für die Anwendung des CAMG-Verfahrens im Rückbau ist die ökonomische Betrachtung des Verfahrens von großer Wichtigkeit. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner in Arbeitspaket A/8 der erste Ansatz des Kostenmodells weiterentwickelt. Dabei profitierte das Modell von beiden Seiten durch die vertiefende Prozesskenntnis und den praktischen Erfahrungen in der Anwendung. Insgesamt konnte die Zielgröße „Kosten pro Schnittmeter“ identifiziert werden, welche abhängig von der zu trennenden Dicke ist. Grundlegende Eingangsgrößen sind die Kosten für das Personal, Material für die Grundscheiben einschl. dem Zusatzwerkstoff sowie die Prozesskosten für das Laserauftragungsschweißen bzw. Wasserstrahlschneiden.

- In Arbeitspaket B/4 wird der Fokus auf ein System zum schnellen, unkomplizierten Wechsel der Elektrode gelegt. Verschiedene Systeme wurden betrachtet und für die Anwendung in einer CAMG-Anlage geprüft. Da für dieses thermische Trennverfahren ein sehr hoher Strom notwendig ist, muss die Übertragung von dem Stromübertragungsmodul auf die Elektrode möglichst verlustfrei und auf kurzem Weg erfolgen. Die Verwendung eines mechanischen Spannsystems erweist sich für diesen Anwendungsfall zunächst als nicht sinnvoll. Alle Bauteile die in diesem Bereich zusätzlich verbaut werden und kontaktlos nebeneinander angeordnet sind, bieten potenzielle Angriffspunkte für das Zünden eines Lichtbogens und sprechen somit gegen die Integration eines derartigen Mechanismus. Sowohl die Rotation der Welle und Elektrode sowie die eingeschränkte Motorik der Mitarbeiter, bedingt durch die Schutzkleidung, die einen Elektrodenwechsel durchführen müssen fordern jedoch eine einfache und zuverlässige Sicherung der Elektroden und einen leichten Wechsel.
- Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Technikumsanlage erfolgt im Rahmen des Arbeitspakets B/5. Dazu wurden bereits die gefertigten Bauteile aus den Arbeitspaketen B/2 und B/3 mit den entsprechenden Kaufteilen zu Baugruppen zusammengebaut und einzeln auf ihre Funktion geprüft. Neben der mechanischen Funktion werden zudem alle Baugruppen auf Dichtheit gegenüber des Wassers in dem die Anlage eingesetzt werden soll getestet. In diesem Arbeitspaket erfolgen immer wieder Optimierungsprozesse, um das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten zu erreichen.
- In Arbeitspaket B/7 erfolgten Schneiduntersuchungen der in Komplex A hergestellten Elektroden. Es werden erste Betriebsdaten ermittelt, um die Qualität und die Leistungsfähigkeit der additiv hergestellten Schneidstoffe zu prüfen. Dabei wird der Verschleiß an der Elektrode dokumentiert und näher untersucht und die Prozessdaten in Form von Strom und Spannung erfasst.
- Für das Arbeitspaket B/8 wurde gemeinsam im Projektteam UWTH/EWN über die Schnittkosten gesprochen und festgelegt, wie ein Vergleich mit bisher verwendeten Verfahren hergestellt werden kann.
- In Arbeitspaket C/1 wurde der aktuelle Stand der Gesamtdokumentation mit den neuesten Erkenntnissen überarbeitet. Die Bearbeitung der Arbeitspakete aus dem Arbeitspaket Komplex C läuft parallel zu den anderen beiden Komplexen und wird ständig fortgeführt.
- Weiterführend wurde im Projektteam UWTH/EWN die Erstellung der Vorprüfunterlage (VPU) im Rahmen des Entwurfsstandes (Arbeitspaket C/1), die für die Genehmigung des Einsatzes der CAMG-Technik zum Rückbau von KTA benötigt und erstellt werden muss, vertieft und präzisiert.
- Ausführung des Arbeitspaketes B/1, B/2 und B/4
  - Erstellung und Entwicklung von 3D-Konstruktionsunterlagen zur Darstellung und Bewertung der Baustrukturen bzw. Einrichtungskomponenten, wie z.B. Kernmantel, Unteres Kerngerüst und Rohrbündelsegmente
  - Ableitung von CAD-Modellen zur weiteren Bewertung bezüglich Konstruktionsdetails zur Raum- und Lagebestimmung der Einrichtung im Anwendungsprozess, speziell für die Eingriffs- und Baugrößen der CAMG-Einrichtung
  - Erstellung der Konstruktions- und Fertigungsdokumentation zur Herstellung von Mockups (Planung der konstruktiven Ausführungsunterlagen zur Mockup-Fertigung mit den Einzelteil- und Baugruppenzeichnungen, Stück-/Werkstofflisten einschl. der Zusammenstellung von Bedarfsmaterialien zur Beschaffung notwendiger Blech- und Rohrzuschnitte sowie spezieller Normteilbedarfe)
- In Arbeitspaket C/3 werden die aktuellen Randbedingungen zur Dosisleistungsbetrachtung der durchzuführenden Tätigkeiten sowie der Gesamtdokumentation mit den gewonnenen Erkenntnissen der Gerätekonfiguration verglichen, entsprechend bewertet und zur

weiteren Verwendung charakterisiert. Die Bearbeitung des Arbeitspaketes C/3 wird fortlaufend zu den Paralleltätigkeiten der Arbeitspakete A/B fortgeführt.

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

- Vorstellung der UWTH-Erprobungsergebnisse im Rahmen von Arbeitspaket A/6 mit den ersten Testscheiben auf Basis der untersuchten Zusatz- und Legierungswerkstoffe
  - Nach Auswertung der verschiedenen Verbundkonzepte wird in Arbeitspaket A/7 ein Ranking mit dem aktuellen Zwischenstand erstellt. Diese Liste dient als Grundlage für die Entscheidung, welche Konzepte und Legierungen weiterverfolgt und näher untersucht werden sollen. Der wichtigste Entscheidungsfaktor ist die erreichte Schnittleistung. Dieser Parameter ist neben der wirtschaftlich/technologischen Betrachtung der entscheidende Faktor für den Anwendungsprozess, um die Einführung und Etablierung des CAMG-Verfahrens in den technologischen Rückbauprozess einzubinden.
- In Arbeitspaket B/4 wird der Mechanismus des Spannsystems für die Elektrode nach den neuesten Erkenntnissen und Forschungsergebnissen bewertet und abschließend final festgelegt. Im nachfolgenden Schritt wird das einzusetzende Spannsystem konstruktiv für diese CAMG-Anlage ausgewiesen.
- Weiterführung des Arbeitspaketes B/1, B/2 und B/4
  - Erstellung und Entwicklung von 3D-Konstruktionsunterlagen zur Darstellung und Bewertung der Baustrukturen bzw. Einrichtungskomponenten
  - Erstellung von CAD-Modellen zur weiteren Bewertung bezüglich Konstruktionsdetails zur Raum- und Lagebestimmung der Einrichtung im Anwendungsprozess
  - Erstellung der Konstruktions- und Fertigungsdokumentation zur Herstellung von Mockups (Planung der konstruktiven Ausführungsunterlagen zur Mockup-Fertigung mit den Einzelteil- und Baugruppenzeichnungen, Stück-/Werkstofflisten einschl. der Zusammenstellung von Bedarfsmaterialien zur Beschaffung notwendiger Blech- und Rohrzuschnitte sowie spezieller Normteilbedarfe)
  - Bearbeitung und Finalisierung von Ausschreibungsunterlagen zur Beschaffung der Zukauf- und Normteile zur Fertigung der Mockups.
  - Überarbeitung und Begleitung der technischen Gesamtdokumentation gemäß der notwendigen VPU
- Für den Aufbau und die Inbetriebnahme der Technikumsanlage (Arbeitspaket B/5) wurden bereits die ersten gefertigten Bauteile aus den Arbeitspaketen B/2 und B/3 mit den entsprechenden Kaufteilen zu Baugruppen zusammengebaut und einzeln auf ihre Funktion geprüft. Dies wird je nach Fertigungsstand fortlaufend weitergeführt.
- In Arbeitspaket B/7 werden die Ergebnisse der Schneidversuche (bzgl. Fugenqualität, Elektroden) in einer Gesamtanalyse mit Bezug auf die Robustheit und die Anwendungsfähigkeit diskutiert, sodass der TRL der Elektroden durch die Untersuchungen in diesem Arbeitspaket möglich wird.
- In gemeinsamer Zusammenarbeit der Projektteams UWTH/EWN soll in Arbeitstakt B/8 genau definiert werden, wie ein Schnitt in Bezug auf die Kostenanalyse abgebildet werden kann und welche Prozessbestandteile mit welcher Gewichtung bei einer Gesamtberechnung mit einfließen werden.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es kann zurzeit kein Bezug zu anderen Vorhaben hergestellt werden.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9434A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Dresden, 01062 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA) TP: Entwicklung von Werkzeugen zur In-Situ-Analyse von Betoneigenschaften, Radionukliden und hydraulischer Loch-zu-Loch-Permeabilität sowie Befundkartierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2021 bis 31.08.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.719.613,39 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Uwe Hampel	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> uwe.hampel@tu-dresden.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Während der Beprobung der Betonstrukturen des Reaktorgebäudes im Kernkraftwerk Stade wurden Kontaminationen in der Betonkalotte, also dem unteren Teil des Reaktorsicherheitsbehälters, vorgefunden. Diese wurden durch Primärkreiswasser während des Anlagenbetriebes eingetragen. Es ist davon auszugehen, dass dieses Problem auch andere kerntechnische Anlagen in Deutschland und weltweit betrifft. Für den Rückbau der Betonstrukturen ist ein Ermitteln und Kartieren der Kontaminationen notwendig. Dies erfolgt nach dem aktuellen Stand der Technik durch Kernbohrungen und Laboranalysen des Bohrkernmaterials. Dabei schränken fehlende Zugänglichkeit, baustatische Randbedingungen und Kosten die Zahl der Beprobungsbohrungen ein. Eine Alternative zu Kernbohrungen sind Bohrungen ins Volle. Mit schmalen Bohrlöchern können deutlich mehr Bohrungen gesetzt werden, ohne die Baustatik zu gefährden. Da bei diesem Bohrverfahren keine Bohrkern für eine Analytik zur Verfügung stehen, müssen neue Mess- und Analysetechniken entwickelt werden. Im Verbundvorhaben werden Mess- und Analyseverfahren entwickelt, mit denen es möglich ist, in-situ das Vorhandensein von Kontaminationen, deren Lage im Beton, deren Nuklidvektor, lokale Feuchte und Porosität der Betonmatrix sowie die Präsenz von Borverbindungen zu ermitteln. Für die hydraulische Permeabilität zwischen den Bohrungen werden Modellierungswerkzeuge entwickelt und angewendet. Weiterhin wird ein Konzept zur elektronischen Dokumentation von Daten aus Rückbauprojekten erarbeitet, welches für zukünftige Rückbauprojekte nutzbar ist.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Der Gesamtarbeitsplan des Verbundes sieht die folgenden vier Arbeitspakete (AP) vor.

AP 1: Entwicklung einer rohrgängigen Sonde zur tiefenaufgelösten Bestimmung von Dosisleistung, Feuchte und Porosität:

- Vergleichende Bewertung von Impedanzspektroskopie und Radartechnik,
- Messung der Dosisleistung mittels OSL-Detektoren,
- Entwicklung einer aktiven Sonde zur Bewertung des Strahlungsfeldes,
- Auslegung, Konstruktion, Aufbau u. Erprobung der Messlanze,
- Erprobung der Technik im Feld (KKS) und Bewertung,
- Iterative Verbesserung der Empfindlichkeit und räumlichen Auflösung des Messverfahrens.

AP 2: Entwicklung einer Methodik zur Betonbeprobung durch einen laserbasierten Betonabtrag an Bohrlochwand, pneumatischem Austrag des Aerosols und In-Situ-Analyse der Radionuklide und Bor:

- Vergleich verschiedener Abtragverfahren,
- Entwicklung einer Sonde zur Probennahme in Betonrohren,
- Abscheidung des Probenahmegutes,
- Analyse des Betonabtrags als Funktion der Abtragstiefe im Bohrloch,
- Vergleichsmessungen an realen Strukturen.

AP 3: Entwicklung eines Messverfahrens zur Ermittlung der Loch-zu-Loch-Permeabilität mittels Tracergas:

- Konzepte zur Messung der hydraulischen Durchlassfähigkeit von Arbeitsfugen,
- Permeationsversuche im Labormaßstab,
- Realmaßstäbliche Versuche im KKS,
- Analytische Modellierung und Vorhersagemodell für die Durchlassfähigkeit vorgefundener Betonstrukturen.

AP 4: Kartierung, elektronische Dokumentation, Beprobungsplanung, Wissensmanagement:

- Entwicklung eines Softwaremoduls zur Befundvisualisierung,
- Elektronische Dokumentation,
- Systematische Dokumentation informellen Rückbauwissens,
- Übertragung der Ergebnisse auf weitere Rückbauvorhaben.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

AP 1: Im vergangenen Projektzeitraum wurden die Untersuchungen zu verschiedenen Elektroden-Geometrien zur Bestimmung von Feuchtigkeit und Porosität mittels elektrischer Impedanzspektroskopie (EIS) in engen Bohrlöchern in Beton weiter vorangetrieben. Hierzu wurden potentiell geeignete Elektroden-Geometrien zunächst mit COMSOL®-Multiphysics simuliert. Im Anschluss wurden umfangreiche Experimente an realistischen vom Projektpartner TUD-IfB zur Verfügung gestellten Betonproben (welche identische Stoffwerte und Morphologien Zement, Sand, Korngrößen, Zuschlagstoffe aufweisen) sowie an realen direkt aus dem KKKU stammenden Bohrkernen (mit und ohne Bewehrungsstäben) mit einem handelsüblichen Impedanzspektrometer der Firma "Sciospec" mit den zuvor simulierten Geometrien durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen der Simulation und dem Experiment. Das gegenwärtige Messsystem und die Elektrodenkonfigurationen liefern relativ akzeptable Ergebnisse mit minimalen Störungen durch die Aggregatgrößen. Mit dem vorhandenen Setup kann der Feuchtegehalt (massebezogen) im Beton mit einer Genauigkeit von  $\pm 5\%$  mittels EIS ermittelt werden. Der erste mechanische Prototyp für die Applikation der Messsonde im Bohrloch basierte auf flexiblen Leiterplatten, die mittels pneumatisch aufgeblasenem Balg an die Oberfläche angepresst wurden. Der Entwurf musste leider verworfen werden, da die Oberflächenrauigkeit der realen Bohrlochgeometrie zu einem ungleichmäßigen Andruck der relativ steifen Leiterbahnstrukturen führte. Aus diesem Grund wurden spezielle Federkontaktelektroden beschafft. Die spiralförmigen Federn legen sich sehr gut auch an raue Oberflächen an, wobei sich die anliegende Fläche nicht oder nur geringfügig verändert. Erste Ergebnisse mit diesen Kontaktmustern sind sehr vielversprechend. Zusätzlich wurde ein Prototyp eines Makroendoskops entwickelt, um an der Spitze der Sonde beim Einführen die Oberfläche visualisieren zu können. Dies erlaubt die Lokalisierungen von Dehnungs- und Arbeitsfugen sowie von durchbohrten Armierungseisen. Nach finaler Festlegung der Bohrlochdurchmesser wird die Optik auf diese angepasst und an der Sonde verbaut.

Am IKTP wurden die Eigenschaften der zu entwickelnden Sonde zur Dosisleistungsmessung in Abhängigkeit von der Länge des verwendeten Lichtleiters untersucht. Die detektierte Lichtmenge verringert sich merklich ab einer Länge von zehn Metern, wodurch der praxisgerechte Einsatz in Bohrlöchern von Tiefen im Bereich von einigen Metern möglich ist. Die Messtechnik wurde in ein tragbares, akkubetriebenes Gerät übertragen, sodass der Einsatz im Kernkraftwerk möglich ist. Im März 2023 wurden mit diesem Aufbau Messungen an verschiedenen Bohrlöchern am Abklingbecken und nahe der Loopleitungen am Standort Unterweser durchgeführt. Es ist gelungen, lokalisierte Strahlungsquellen nachzuweisen, die auch hinsichtlich ihrer Aktivität und primären Nuklidzusammensetzung charakterisiert werden konnten. In Bezug auf Entscheidungsmessungen wurde der statistische Kolmogorov-Smirnov-Test auf eine zweidimensionale Variante erweitert, womit eine verbesserte Sensitivität und Spezifität erreicht werden konnte. Dies wurde auf der ANIMMA Konferenz im Juni 2023 präsentiert.

AP 2: Im Berichtszeitraum wurde der bei TUD-WKET vorhandene Versuchsstand mit dem Laser TruPulse nano komplettiert und für umfangreiche Experimente zum Abtrag von Beton eingesetzt. Die Abtragsmenge liegt - parameterabhängig - unter  $0,1 \text{ mg}\cdot\text{mm}^{-2}$ . In ersten Versuchen wurde die Kombination aus Laserablation und massenspektrometrischen Untersuchungen getestet. Bisher konnten keine auswertbaren Messungen durchgeführt werden.

Zur Vorbereitung der Konstruktion der Bohrloch-Lanze wurden die Simulationen zu den Strömungsverhältnissen im Bohrloch gestartet. Die Lanze soll gleichzeitig die Absaugung des mittels Laser abgetragenen Materials und die Zuführung von Druckluft zur Kühlung eines Parabolspiegels gewährleisten. Die aus beiden Prozessen resultierenden Strömungsverhältnisse sollen in weiteren Iterationsschritten mit der Software COMSOL dargestellt werden.

AP 3: Die Proben aus dem Kernkraftwerk wurden mit komplementären Techniken analysiert. Für die Korngrößenverteilung der Zuschlagstoffe wurde makroskopische Bildanalyse verwendet. Mithilfe des Polarisationsmikroskops wurden Gesteine identifiziert, die aus mehreren Quellen stammen, darunter vorwiegend Quarz, Schluff und Vulkangestein mit einem geringen Anteil an fossilienhaltigen Teilchen. Die ursprüngliche Mischungszusammensetzung, der Zementgehalt, Schlackengehalt, Kalksteinanteil, der gesamte Zuschlagstoffgehalt und das Wasser-/Bindemittelverhältnis werden auf der Betrachtungsebene des erhärteten Zementsteins sowie des Betongefüges durch REM-BSE-Bildanalyse und andere Tests abgeschätzt. Hydrationsphasen wurden mittels XRD und TGA analysiert. Die aus Quecksilberdruckporosimetrie ermittelte Porengrößenverteilung lässt darauf schließen, dass der Beton eine qualitativ „recht feine“ Porenstruktur aufweist. Die Druckfestigkeit des Betons beträgt 64 MPa, der Elastizitätsmodul des Betons 29,6 GPa.

AP 4: Für die Darstellung der Probenentnahmestellen wurde ein grundlegend neuer Prototyp in PYTHON entwickelt, der diese Orte in einer 3D-Geometrie visualisiert. Dabei können wichtige Messwerte für Kontaminationen angezeigt und anhand ihrer Werte farblich markiert werden. Zusätzlich werden ergänzende Informationen eingeblendet. Die Implementierung als ParaView- und FreeCAD-Script wurde aufgrund der mangelnden Flexibilität verworfen.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP 1: Im AP 1 werden die experimentellen Arbeiten zur Optimierung geeigneter Elektrodengeometrien für die Impedanzspektroskopie finalisiert und eine finale Elektrodengeometrie

festgelegt. Dazu ist eine finale Fixierung der Bohrlochgeometrie durch PEL bzw. alle Projektpartner erforderlich. Im Anschluss wird ein neuer Sondenprototyp aufgebaut und an Beton-Mockups erprobt. Darüber hinaus werden die Arbeiten zur Radartechnik fortgesetzt.

Der Messaufbau wird mit den gewonnenen Erfahrungen aus dem praktischen Einsatz am KGU weiter optimiert, auch in Bezug auf Schleusbarkeit und Bedienbarkeit unter den Umständen im Kontrollbereich. Messungen in der Kalotte sind für August 2023 avisiert. Weiterhin werden die im März untersuchten Bohrlöcher mit Berylliumoxid-Dosimetern bestückt, dass auch deren Messsignal den Datensatz vervollständigt.

AP 2: Im 2. Halbjahr werden verstärkt Untersuchungen zur Kopplung von Laserabtrag mit analytischen Untersuchungen durchgeführt. Dazu ist insbesondere die Steuerung des Lasers so zu konfigurieren, dass starke Einzelpulse erzeugt werden, die sich spektroskopisch auswerten lassen. Parallel wird die Simulation der Strömungsverhältnisse im Bohrloch weitergeführt, um Daten zur notwendigen Absaugleistung für das ablatierte Material zu erhalten.

AP 3: Derzeit wird ein Versuchsplan erstellt, um Permeabilität, Sorption und Diffusion von Radionukliden zu untersuchen. Für die Gaspermeabilität wird die Cembureau-Methode verwendet sowie ASTM 1585 bzw. RILEM TC 116-PD für Sorptionstests und das Diffusionsprofil. Die analysenreinen Salze Cäsiumchlorid (CsCl) und Strontiumchlorid (SrCl<sub>2</sub>) mit stabilen Isotopen werden verwendet, so dass keine radiochemischen Schutzvorkehrungen erforderlich sind.

AP 4: Im nächsten Schritt ist geplant, die verbleibenden Probenahmedaten in eine Datenbank zu überführen. Die Platzhalter-Geometrien sollen durch Modelle ersetzt werden, die auf den echten CAD-Daten basieren. Dadurch wird eine realistischere Darstellung ermöglicht. Außerdem sollen weitere Visualisierungsoptionen hinzugefügt werden, um die Analyse und Interpretation der Daten zu verbessern.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

derzeit keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Döhler, D. et al., Comparison of Two Approaches for Contamination Detection Using a Fiber Optic Radiation Sensor, ANIMMA 2023, to be published in Conference Record.

Nurjahan, T., In-situ measurement of moisture content and contamination in concrete during decommissioning of nuclear power plants, Kerntec 2023, 13.-15.06.2023, Frankfurt a.M.

Schroefl, C.; Rauf, A.; Anthofer, A.; Kosowski, K.; Jansen, S.; Kormoll, T.; Doehler, D.; Herrmann, M.; Mechtcherine, V.; Bertram, V.; Hampel, U., Assessment of in-fact contaminated concrete inside nuclear power plants to reduce waste amounts after decommissioning, In: WM2023 Conference on nuclear waste management, 26.02.-02.03.2023, Phoenix, Arizona, USA, oral presentation and full paper ID 23220 in online archive <https://www.xcdsystem.com/wmsym/2023/Oralsession.cfm?SessNo=156&SessID=4198>

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9434B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus TP: Analytik für die Beprobung von Beton	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2021 – 31.08.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 151.739,80 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Verbundvorhaben KOBKA sollen Mess- und Analyseverfahren entwickelt werden, mit denen es möglich sein soll, in-situ das Vorhandensein von Kontaminationen, deren Lage im Beton, deren Nuklidvektor, lokale Feuchte und Porosität der Betonmatrix sowie die Präsenz von Borverbindungen zu ermitteln. Für die hydraulische Permeabilität zwischen den Bohrungen werden Modellierungswerkzeuge entwickelt und angewendet. Weiterhin wird ein Konzept zur elektronischen Dokumentation von Daten aus Rückbauprojekten erarbeitet, welches für zukünftige Rückbauprojekte nutzbar ist. Der VKTA ist innerhalb des Projektes vorrangig bei der Betonanalyse bzw. dem Vergleich des Messsystems zur konventionellen Analytik im Labor beteiligt. Gleichzeitig ist der VKTA durch seine verfügbare Infrastruktur in der Lage, gezielt kontaminierte Betonprobekörper herzustellen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 2 Rohrgängiges Probenahmesystem zur In-situ-Analyse radioaktiver Kontamination im Beton und nuklidspezifischer Aktivitäten

AP 2.1 Vergleich verschiedener Abtragsverfahren – Zuarbeit WKET (09/2021-02/2022)

AP 2.4 Analyse des Betonabtrages als Funktion der Abtragstiefe im Bohrloch (05/2023-04/2024)

AP 2.5 Vergleichsmessungen an realen Strukturen (03/2024-08/2024)

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-punkten)

Im betrachteten Projektzeitraum liefen vorbereitende Arbeiten zur Erstellung gezielt kontaminierter Betonprobenkörper. Es wurden radioaktive Standards bestellt. Möglichkeiten zulässigen Umgangs mit radioaktiven Stoffen bei einzelnen Projektpartnern wurde eruiert. Messtechnische Grenzen bei der Bewertung abgeschiedenen Bohrmehls wurden ermittelt. Das Verfahren zur Bewertung des Bohrmehls wurde daraufhin adaptiert.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Fortführung der oben genannten AP, zusätzlich Herstellung kontaminierter Probekörper.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine bekannt

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9434C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> PreussenElektra GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung von Messtechnik zur Beprobung kontaminierter Betonbaukörper kerntechnischer Anlagen während des Rückbaus (KOBKA) TP: Elektronische Ergebnisdokumentation, Beprobungsplanung und Wissensmanagement	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2021 bis 31.08.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 225.142,97 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Wolfgang Bertram	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> wolfgang.bertram@preussenelektra.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Während der Beprobung der Betonstrukturen des Reaktorgebäudes im Kernkraftwerk Stade wurden Kontaminationen in der Betonkalotte, also dem unteren Teil des Reaktorsicherheitsbehälters, vorgefunden. Diese wurden durch Primärkreiswasser während des Anlagenbetriebes eingetragen. Es ist davon auszugehen, dass dieses Problem auch andere kerntechnische Anlagen in Deutschland und weltweit betrifft. Für den Rückbau der Betonstrukturen ist ein Ermitteln und Kartieren der Kontaminationen notwendig. Dies erfolgt nach dem aktuellen Stand der Technik durch Kernbohrungen und Laboranalysen des Bohrkernmaterials. Dabei schränken fehlende Zugänglichkeit, baustatische Randbedingungen und Kosten die Zahl der Beprobungsbohrungen ein. Eine Alternative zu Kernbohrungen sind Bohrungen ins Volle. Mit schmalen Bohrlöchern können deutlich mehr Bohrungen gesetzt werden, ohne die Baustatik zu gefährden. Da bei diesem Bohrverfahren keine Bohrkernkerne für eine Analytik zur Verfügung stehen, müssen neue Mess- und Analysetechniken entwickelt werden. Im Verbundvorhaben werden Mess- und Analyseverfahren entwickelt, mit denen es möglich ist, in-situ das Vorhandensein von Kontaminationen, deren Lage im Beton, deren Nuklidvektor, lokale Feuchte und Porosität der Betonmatrix sowie die Präsenz von Borverbindungen zu ermitteln. Für die hydraulische Permeabilität zwischen den Bohrungen werden Modellierungswerkzeuge entwickelt und angewendet. Weiterhin wird ein Konzept zur elektronischen Dokumentation von Daten aus Rückbauprojekten erarbeitet, welches für zukünftige Rückbauprojekte nutzbar ist.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Der Gesamtarbeitsplan des Verbundes sieht die folgenden vier Arbeitspakete (AP) vor.

AP 1: Entwicklung einer rohrgängigen Sonde zur tiefenaufgelösten Bestimmung von Dosisleistung, Feuchte u. Porosität:

- Vergleichende Bewertung von Impedanzspektroskopie u. Radartechnik
- Messung der Dosisleistung mittels OSL-Detektoren
- Entwicklung einer aktiven Sonde zur Bewertung des Strahlungsfeldes
- Auslegung, Konstruktion, Aufbau u. Erprobung der Messlanze
- Erprobung der Technik im Feld (Kernkraftwerk Stade) u. Bewertung
- Iterative Verbesserung der Empfindlichkeit u. räumlichen Auflösung des Messverfahrens

- AP 2: Entwicklung einer Methodik zur Betonbeprobung durch einen laserbasierten Betonabtrag an Bohrlochwand, pneumatischem Austrag des Aerosols u. In-Situ-Analyse der Radionuklide u. Bor:
- Vergleich verschiedener Abtragverfahren
  - Entwicklung einer Sonde zur Probennahme in Betonrohren
  - Abscheidung des Probenahmegutes
  - Analyse des Betonabtrags als Funktion der Abtragstiefe im Bohrloch
  - Vergleichsmessungen an realen Strukturen
- AP 3: Entwicklung eines Messverfahrens zur Ermittlung der Loch-zu-Loch-Permeabilität mittels Tracergas:
- Konzepte zur Messung der hydraulischen Durchlassfähigkeit von Arbeitsfugen
  - Permeationsversuche im Labormaßstab
  - Realmaßstäbliche Versuche im KKS
  - Analytische Modellierung u. Vorhersagemodell für die Durchlassfähigkeit vorgefundener Betonstrukturen
- AP 4: Kartierung, elektronische Dokumentation, Beprobungsplanung, Wissensmanagement:
- Entwicklung eines Softwaremoduls zur Befundvisualisierung
  - Elektronische Dokumentation
  - Systematische Dokumentation informellen Rückbauwissens
  - Übertragung der Ergebnisse auf weitere Rückbauvorhaben

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

PreussenElektra ist im Verbundvorhaben an AP 4, sowie an AP 1 und 3 im späteren Verlauf beteiligt.

AP 1: Im zurückliegenden Projektzeitraum wurden durch den Projektpartner TUD-PBM die Untersuchungen zu verschiedenen Elektroden-Geometrien zur Bestimmung von Feuchtigkeit und Porosität mittels elektrischer Impedanzspektroskopie (EIS) in engen Bohrlöchern in Beton weiter vorangetrieben. Hierzu wurden potenziell geeignete Elektroden-Geometrien simuliert. Um die Simulationsergebnisse zu verifizieren, wurden umfangreiche Experimente unter Variation des Feuchtigkeitsgehaltes durchgeführt. Dies erfolgte zum einen an realen direkt aus dem Kernkraftwerk Unterweser (KKU) stammenden Bohrkernen und zum anderen an von TUD-IfB bereitgestellten Betonproben, welche identische Stoffwerte und Morphologien (Zement, Sand, Korngrößen, Zuschlagstoffe) wie der Beton aus dem KKU aufweisen. Die Experimente liefen bisher im Labormaßstab. Eine Bewertung der Technik hinsichtlich Nachweisbarkeit und Handhabbarkeit und Berücksichtigung der Untergrundstrahlung soll nun auch am Kraftwerksstandort erfolgen. Da es sich bei dem Feldtest zunächst lediglich um eine Handhabbarkeit handelt, sollen experimentelle Untersuchungen aus radiologischen Gründen gemäß ALARA-Prinzip (*As Low As Reasonably Achievable*) vorerst nicht an der Kalotte im Gebäudesumpf des Kernkraftwerks durchgeführt werden. Stattdessen soll die Messtechnik zunächst an originalem Kernkraftwerksbeton aus dem Reaktorgebäude an bereits freigemessenen Klötzen außerhalb des Kontrollbereichs erprobt werden. Die Vorbereitungen dazu laufen.

Die am IKPT entwickelte Sonde wurde im KKU auf Praxistauglichkeit geprüft. Im Rahmen einer Messkampagne wurden Messungen innerhalb des Containments an verschiedenen Bohrlöchern im Kontrollbereich durchgeführt. Es ist gelungen, Strahlungsquellen zu lokalisieren und

nachzuweisen, die auch hinsichtlich ihrer Aktivität und primären Nuklidzusammensetzung charakterisiert werden konnten.

AP 3: Aus der einschlägigen Literatur geht hervor, dass das Eindringen von Radionukliden in den Kalottenbeton von drei Transportmechanismen bestimmt wird: Permeabilität, Sorption und Diffusion. Um diese Mechanismen zu untersuchen, sollen die Betonbedingungen vor Ort im Inneren des Reaktorgebäudes ermittelt werden. Ursprünglich wurden die Arbeiten für das Kernkraftwerks Stade (KKS) geplant. Auf Grund der dort abgeschlossenen Arbeiten zum Ausbau des Kalottenbetons (der Südpol wurde freigelegt) sind die Planungen auf das Kernkraftwerk Unterweser übertragen worden, das vor der gleichen Problematik steht. Zur Bestimmung der Betoneigenschaften wurde den Projektpartnern eine Bohrkernprobe aus dem Kalottenbereich des Kernkraftwerks Unterweser (KKU) zur radiologischen Bewertung übersandt.

Die von KKU versendete Betonproben wurden mit komplementären Techniken analysiert. Für die Korngrößenverteilung der Zuschlagstoffe wurde eine makroskopische Bildanalyse verwendet. Mithilfe des Polarisationsmikroskops wurden Gesteine identifiziert, die aus mehreren Quellen stammen, darunter vorwiegend Quarz, Schluff und Vulkangestein mit einem geringen Anteil an fossilienhaltigen Teilchen. Die ursprüngliche Mischungszusammensetzung, der Zementgehalt, Schlackengehalt, Kalksteinanteil, der gesamte Zuschlagstoffgehalt und das Wasser-/Bindemittelverhältnis werden auf der Betrachtungsebene des erhärteten Zementsteins sowie des Betongefüges durch eine Rasterelektronenmikroskop-Bildanalyse und andere Tests abgeschätzt. Hydratationsphasen wurden analysiert. Die aus Quecksilberdruckporosimetrie ermittelte Porengrößenverteilung lässt darauf schließen, dass der Beton eine qualitativ „recht feine“ Porenstruktur aufweist.

AP 4: Für die Darstellung der Probenentnahmestellen wurde ein grundlegend neuer Prototyp in PYTHON entwickelt, der diese Orte in einer 3D-Geometrie visualisiert. Dabei können wichtige Messwerte für Kontaminationen angezeigt und anhand ihrer Werte farblich markiert werden. Zusätzlich werden ergänzende Informationen eingeblendet. Die Implementierung als Para-View- und FreeCAD-Script wurde aufgrund der mangelnden Flexibilität verworfen.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP 1: Im AP 1 werden die experimentellen Arbeiten zur Optimierung geeigneter Elektrodengeometrien für die Impedanzspektroskopie finalisiert und eine finale Elektrodengeometrie festgelegt. Dazu ist eine finale Fixierung der Bohrlochgeometrie durch PEL bzw. alle Projektpartner erforderlich. Im Anschluss wird ein neuer Sondenprototyp aufgebaut und an Beton-Mockups erprobt. Darüber hinaus werden die Arbeiten zur Radartechnik fortgesetzt.

Der Messaufbau wird mit den gewonnenen Erfahrungen aus dem praktischen Einsatz am KKU weiter optimiert, auch in Bezug auf Schleusbarkeit und Bedienbarkeit unter den Umständen im Kontrollbereich. Messungen in der Kalotte sind für August 2023 avisiert. Weiterhin werden die im März untersuchten Bohrlöcher mit Berylliumoxid-Dosimetern bestückt, dass auch deren Messsignal den Datensatz vervollständigt.

Die Vorbereitungen schreiten weiter voran, um die Messtechniken an originalem Kernkraftwerksbeton aus dem Reaktorgebäude an bereits freigemessenen Klötzen außerhalb des Kontrollbereichs zu erproben.

AP 3: Der Beton, der die Betoneigenschaften am KKK repräsentiert, ist für den Labormaßstab gegossen worden (Replikat), um die Transporteigenschaften zu untersuchen. Derzeit wird ein Versuchsplan erstellt, um Permeabilität, Sorption und Diffusion von Radionukliden zu untersuchen. Schließlich wird eine numerische Simulation durchgeführt, um den Transport von Radionukliden im Beton abzuschätzen.

AP 4: Im nächsten Schritt ist geplant, die verbleibenden Probenahmedaten in eine Datenbank zu überführen. Die Platzhalter-Geometrien sollen durch Modelle ersetzt werden, die auf den echten CAD-Daten basieren. Dadurch wird eine realistischere Darstellung ermöglicht. Außerdem sollen weitere Visualisierungsoptionen hinzugefügt werden, um die Analyse und Interpretation der Daten zu verbessern.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Derzeit keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Döhler, D. et al., Comparison of Two Approaches for Contamination Detection Using a Fiber Optic Radiation Sensor, ANIMMA 2023, to be published in Conference Record.

Nurjahan, T., In-situ measurement of moisture content and contamination in concrete during decommissioning of nuclear power plants, Kerntec 2023, 13.-15.06.2023, Frankfurt a.M.

Schroefl, C.; Rauf, A.; Anthofer, A.; Kosowski, K.; Jansen, S.; Kormoll, T.; Doehler, D.; Herrmann, M.; Mechtcherine, V.; Bertram, V.; Hampel, U., Assessment of in-fact contaminated concrete inside nuclear power plants to reduce waste amounts after decommissioning, In: WM2023 Conference on nuclear waste management, 26.02.-02.03.2023, Phoenix, Arizona, USA, oral presentation and full paper ID 23220 in online archive

<https://www.xcdsystem.com/wmsym/2023/Oralsession.cfm?SessNo=156&SessID=4198>

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9435A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) <b>Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe) TP: Entwicklung eines innovativen Verfahrens für die Erstellung eines BIM-Modells für die zu bearbeitenden Räumlichkeiten einschließlich der Integration von Störstellen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2022 bis 30.06.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 448.297,58 € (inkl. Projektpauschale)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing Sascha Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiter/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Anschluss an die Abschaltung eines Kernkraftwerks ist der Betreiber verpflichtet, die Anlagen zurückzubauen. Um Anlagenteile aus Kernkraftwerken ausbauen und gemäß Strahlenschutzverordnung freigegeben zu können, muss deren Aktivität unter einem Grenzwert liegen. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen über 100.000 m<sup>2</sup> bis 450.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen [Gentes et al., Abschlussbericht des Forschungsprojekts mit dem Förderkennzeichen: 02S8851, 2015], die für die Freigabe bearbeitet werden müssen.

Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt im bisherigen Verfahren die Raumdatenerfassung manuell. Für die weiteren Verfahrensschritte stehen somit keine digitalen Raummodelle o.ä. zur Verfügung.

Ziel des Forschungsprojekts ViSDeMe ist die digitale Aufnahme und Visualisierung der Räumlichkeiten mit den verschiedenen Störstellen in kerntechnischen Anlagen mit Hilfe von Building Information Modeling (BIM). Auf diese Weise sollen die Räumlichkeiten vor Ort in einem möglichst genauen 3D-Modell abgebildet werden können, wodurch u.a. der Aufwand für die Raumdatenerfassung, Messplanung, Durchführung und Dokumentation der Dekontaminations- und Entscheidungsmessungen für die Anwender in kerntechnischen Anlagen reduziert werden kann. Die genaue Erfassung von Größe, Einbaulage usw. relevanter Störstellen, wie beispielsweise Ankerplatten ist ebenfalls essentiell, da diese Störstellen im Zuge der Entscheidungsmessung separat zu betrachten sind. Ein Schwerpunkt dieses Projekts bildet daher u.a. die Lokalisation von Ankerplatten unterhalb der Dekontaminationsbeschichtung und die genaue Verortung dieser im digitalen Modell.

Das geschilderte Vorgehen zur Digitalisierung des gesamten Verfahrens oder zumindest relevanter Verfahrensschritte wird zusammen mit dem Verbundpartner RWE Nuclear GmbH (im Folgenden: RWE) am Beispiel des Standorts Mülheim-Kärlich untersucht und evaluiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**AP1 (Anforderungskatalog):** Erstellung eines Anforderungskataloges und daraus abgeleitete Geräteauswahl zur Erkennung von Störstellen

**AP2 (Datenaufnahme):** Datenaufnahme von Störstellen und Gebäudestruktur

**AP3 (Punktwolkengenerierung):** Entwicklung eines digitalen Gebäude-Modells

**AP4 (Software-Entwicklung):** Entwicklung und Validierung eines Verfahrens für die Extraktion von Informationen über Störstellen

**AP5 (Modellintegration der Störstellen):** Entwicklung eines Konzepts für Störstellen und Modell-Integration

**AP6 (Visualisierung):** Visualisierung und Validierung von Störstellen im Modell mit VR-Technologie

**AP7 (Praxisphase):** Entwicklung einer Planung für die Dekontaminationsarbeit und Entscheidungsmessung auf Basis des integrierten BIM-Modells

**AP8 (Evaluationsphase):** Auswertung der Ergebnisse am Beispielprojekt

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Die bisher durchgeführten Arbeiten verliefen in enger Kooperation mit **RWE**. In dem angegebenen Berichtszeitraum fanden regelmäßige Online-Projekttreffen statt. Im Rahmen von **AP2** fanden und finden aktuell Versuche zum Testen geeigneter Messverfahren statt. Die endgültige Auswahl der Messtechnik steht noch aus. Aktuell laufen weiterhin die Arbeiten in **AP2**, während parallel dazu die Arbeiten in **AP3** und **AP4** begonnen haben.

### AP2: Datenaufnahme und Aufbau Versuchsstand

#### 3.1 Aufbau Versuchsstand am KIT

Der im Jahr 2022 begonnene Aufbau des Versuchsstandes am KIT wurde im Februar 2023 fertiggestellt. Der Versuchsstand besteht aus Betonwänden mit Öffnungen sowie einbetonierten mit Dekontaminationsbeschichtung überstrichenen Ankerplatten.

#### 3.2 Recherchearbeiten zu Messverfahren

Ein Schwerpunkt dieses Projekts bildet u.a. die genaue Lokalisation von Ankerplatten unterhalb der Dekontaminationsbeschichtung, welche visuell nicht oder kaum sichtbar sind. Die im Jahr 2022 begonnene Recherche zur Erfassung solcher „unsichtbarer“ Ankerplatten, wurde fortgesetzt. Im Jahr 2022 wurden folgende drei potentielle Verfahren ermittelt:

1. Aktive Thermographie
2. Verschiedene Detektionsgeräte der Fa. Hilti
3. Time-of-Flight-Kameras

Im ersten Halbjahr 2023 wurden folgende weitere potentielle Messverfahren ermittelt, welche im weiteren Projektverlauf auf ihre Eignung zu untersuchen sind:

1. Ultraschallmessungen (z.B. mit der BAM)
2. Hochleistungslasermessgerät (z.B. Fraunhofer IPM)
3. Radarsensoren der Fa. OndoSense

#### 3.3 Testmessungen zur Störstellendetektion

Das 1. der oben genannten Messverfahren wurde bereits 2022 durch das **KIT** vor Ort im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich getestet und zwar als prinzipiell geeignet befunden, aber da es sehr zeitaufwändig ist, wird nach Alternativen und/oder Optimierungsmöglichkeiten gesucht.

Zum 2. Verfahren sind Testmessungen am Versuchsstand des **KIT** geplant, welche noch ausstehen. Im Mai 2023 wurde das 3. Verfahren durch **RWE** in Mülheim-Kärlich getestet. Die Testmessungen ergaben, dass das Verfahren nicht zur zuverlässigen Detektion der unter der Beschichtung verborgenen Ankerplatten geeignet ist und somit verworfen wird. Zum Testen des 4. Verfahrens wurde durch **RWE** Kontakt zur Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) hergestellt, welche vor Ort im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich Versuche durchgeführt hat. Die Auswertung der Ergebnisse ergab, dass mit diesem Verfahren keine getrennte Detektion der Ankerplatten sowie der Bewehrung durchgeführt werden kann und es wird somit als nicht geeignet erklärt. Weitere Abstimmungen mit der BAM zu potenziellen anderen Messverfahren sind geplant. Für das 5. Verfahren wurde durch das **KIT** ein Kontakt zum Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) hergestellt, welches Testmessungen am Versuchsstand des **KIT** am TMB durchgeführt hat. Eine erste Einschätzung ergab, dass das Verfahren vielversprechend sein könnte. Eine tiefergehende Auswertung unter Anpassung des Messmodells sowie eine endgültige Bewertung stehen jedoch noch aus.

#### AP3: Punktwolkengenerierung

##### **3.4 Auswertung der 3D-Laserscanner-Aufnahmen und Generierung Gesamtpunktwolke**

Im **AP3** erfolgte die Auswertung der 3D-Laserscanner-Aufnahmen, die im Rahmen des **AP2** in Mülheim-Kärlich durchgeführt wurden. Mit dem 3D-Laserscanner wurde die Geometrie der Räumlichkeiten vermessen. Als Ergebnis wurde eine Gesamtpunktwolke für Ebene -14.5 des Reaktorgebäudes im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich mit über 600 Millionen Messpunkten erzeugt sowie einzelne kleinere Punktwolken von weiteren Räumen auf anderen Ebenen.

##### **3.5 Erstellung Gebäudemodell**

Auf Grundlage der erstellten Gesamtpunktwolke wird das Gebäudemodell der erfassten Räumlichkeiten erstellt. Dabei kommen verschiedene BIM-Softwareprodukte zum Einsatz, welche auf ihre Eignung getestet werden. Die Fertigstellung des Gebäudemodells entspricht dem 1. Meilenstein des Projekts und ist im Oktober 2023 geplant.

#### AP4: Software-Entwicklung

##### **3.6 Untersuchungen zur automatisierten Detektion der sichtbaren Störstellen**

Im **AP4** wurden erste Untersuchungen zur automatisierten Detektion der sichtbaren Störstellen in der Punktwolke mittels Bildverarbeitungsalgorithmen durchgeführt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

In den nächsten Monaten erfolgt die Auswahl und Beschaffung geeigneter Messtechnik für die Detektion der „unsichtbaren“ Störstellen, basierend auf den Vorversuchen sowie die Komplettierung der Datenaufnahme im Rahmen von **AP2**. Parallel dazu wird im **AP3** das Gebäudemodell erstellt sowie weitere Untersuchungen im Rahmen des **AP4** durchgeführt.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Kurzvorstellung auf TMB-Homepage: [www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte\\_7280.php](http://www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte_7280.php)

Eingereichtes Full Paper beim KONTEC Symposium, Dresden, 2023

Eingereichtes peer-review-geprüftes Final Paper beim Forum Bauinformatik, Bochum, 2023

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9435B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWE Nuclear GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe) TP: Praxisversuche und praxisorientierte Beratung bei Anwendung des BIM-Modells für Planung und Durchführung der Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2022 bis 30.06.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 79.738,73 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Stephan Schilp	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiter/-in:</b> Stephan.schilp@rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Anschluss an die Abschaltung eines Kernkraftwerks ist der Betreiber verpflichtet, die Anlagen zurückzubauen. Um Anlagenteile aus Kernkraftwerken ausbauen und gemäß Strahlenschutzverordnung freigegeben zu können, muss deren Aktivität unter einem Grenzwert liegen. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen über 100.000 m<sup>2</sup> bis 450.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen [Gentes et al., Abschlussbericht des Forschungsprojekts mit dem Förderkennzeichen: 02S8851, 2015], die für die Freigabe bearbeitet werden müssen.

Nach aktuellem Stand der Technik erfolgt im bisherigen Verfahren die Raumdatenerfassung manuell. Für die weiteren Verfahrensschritte stehen somit keine digitalen Raummodelle o.ä. zur Verfügung.

Ziel des Forschungsprojekts ViSDeMe ist die digitale Aufnahme und Visualisierung der Räumlichkeiten mit den verschiedenen Störstellen in kerntechnischen Anlagen mit Hilfe von Building Information Modeling (BIM). Auf diese Weise sollen die Räumlichkeiten vor Ort in einem möglichst genauen 3D-Modell abgebildet werden können, wodurch u.a. der Aufwand für die Raumdatenerfassung, Messplanung, Durchführung und Dokumentation der Dekontaminations- und Entscheidungsmessungen für die Anwender in kerntechnischen Anlagen reduziert werden kann. Die genaue Erfassung von Größe, Einbaulage usw. relevanter Störstellen, wie beispielsweise Ankerplatten ist ebenfalls essentiell, da diese Störstellen im Zuge der Entscheidungsmessung separat zu betrachten sind. Ein Schwerpunkt dieses Projekts bildet daher u.a. die Lokalisation von Ankerplatten unterhalb der Dekontaminationsbeschichtung und die genaue Verortung dieser im digitalen Modell.

Das geschilderte Vorgehen zur Digitalisierung des gesamten Verfahrens oder zumindest relevanter Verfahrensschritte wird zusammen mit dem Verbundpartner Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (im Folgenden: TMB) am Beispiel des Standorts Mülheim-Kärlich untersucht und evaluiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP1 (Anforderungskatalog):** Erstellung eines Anforderungskataloges und daraus abgeleitete Geräteauswahl zur Erkennung von Störstellen
- AP2 (Datenaufnahme):** Datenaufnahme von Störstellen und Gebäudestruktur
- AP3 (Punktwolkengenerierung):** Entwicklung eines digitalen Gebäude-Modells
- AP4 (Software-Entwicklung):** Entwicklung und Validierung eines Verfahrens für die Extraktion von Informationen über Störstellen
- AP5 (Modellintegration der Störstellen):** Entwicklung eines Konzepts für Störstellen und Modell-Integration
- AP6 (Visualisierung):** Visualisierung und Validierung von Störstellen im Modell mit VR-Technologie
- AP7 (Praxisphase):** Entwicklung einer Planung für die Dekontaminationsarbeit und Entscheidungsmessung auf Basis des integrierten BIM-Modells
- AP8 (Evaluationsphase):** Auswertung der Ergebnisse am Beispielprojekt

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-punkten)

Die bisher durchgeführten Arbeiten verliefen in enger Kooperation mit **KIT**. In dem angegebenen Berichtszeitraum fanden regelmäßige Online-Projekttreffen statt. Im Rahmen von **AP2** fanden und finden aktuell Versuche zum Testen geeigneter Messverfahren statt. Die endgültige Auswahl der Messtechnik steht noch aus. Aktuell laufen weiterhin die Arbeiten in **AP2**, während parallel dazu die Arbeiten in **AP3** und **AP4** begonnen haben.

Bisherige Tätigkeiten und Termine (Fortführung zum letzten Bericht):

1. Durchführung der Regeltermine
2. Abstimmung zu den bisherigen Ergebnissen der Datenaufnahme und Lokalisierung der Störstellen (**AP 2**)
3. Recherche zu weiteren Verfahren der Erfassung der Störstellen mit dem Fokus auf Ankerplatten (**AP 2**)
4. Projektgespräch ViSDeMe – Zwischentermin (per Teams) zur Bewertung des aktuellen Stands und der weiteren Bearbeitung. Fokus: weitere Messverfahren und Verlängerung AP 2
5. Testversuche des BAM in Mülheim-Kärlich zur Tiefenortung und Bewertung Abschlussbericht zu den Versuchen (**AP 2**)
6. Projektversuche am KIT in Karlsruhe zur Lasermessung und elektromagnetischen Detektion (**AP 2**)
7. Sichtung der Zwischenergebnisse der Punktwolkengenerierung (**AP 3**)
8. Abgleich mit den 2D-Plänen aus Mülheim-Kärlich (**AP 3** und **AP 4**)
9. Begehung vor Ort und Abgleich mit den 3D-Plänen (**AP 3** und **AP 4**)
10. Abgleich mit den Ergebnissen der Raumdatenerfassung mit den 3D-Plänen und gefundenen Störstellen sowie Störstellenklassifizierung (**AP 3** und **AP 4**)

### AP2: Datenaufnahme und Aufbau Versuchsstand

#### 3.2 Rechercharbeiten zu Messverfahren

Ein Schwerpunkt dieses Projekts bildet u.a. die genaue Lokalisation von Ankerplatten unterhalb der Dekontaminationsbeschichtung, welche visuell nicht oder kaum sichtbar sind. Die im Jahr 2022 begonnene Recherche zur Erfassung solcher „unsichtbarer“ Ankerplatten, wurde fortgesetzt. Im Jahr 2022 wurden folgende drei potentielle Verfahren ermittelt:

4. Aktive Thermographie
5. Elektromagnetisches Induktionsverfahren (Detektionsgeräte der Fa. Hilti)
6. Time-of-Flight-Kameras

Im ersten Halbjahr 2023 wurden folgende weitere potentielle Messverfahren ermittelt, welche im weiteren Projektverlauf auf ihre Eignung zu untersuchen sind:

7. Ultraschallmessungen (z.B. mit der BAM)
8. Lasermessungen (z.B. Fraunhofer IPM)
9. Radarsensoren der Fa. OndoSense

### **3.3 Testmessungen zur Störstellendetektion**

Das 1. der oben genannten Messverfahren wurde bereits 2022 durch das **KIT** vor Ort im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich getestet und zwar als prinzipiell geeignet befunden, aber da es sehr zeitaufwändig und somit unwirtschaftlich ist, wieder verworfen.

Zum 2. Verfahren sind Testmessungen am Versuchsstand des **KIT** geplant. Im Mai 2023 wurde das 3. Verfahren durch **RWE** in Mülheim-Kärlich getestet. Die Testmessungen ergaben, dass das Verfahren nicht zur zuverlässigen Detektion der unter der Beschichtung verborgenen Ankerplatten geeignet ist und somit ebenfalls verworfen wird.

Zum Testen des 4. Verfahrens wurde durch **RWE** Kontakt zur Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hergestellt, welche vor Ort im Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich Versuche durchgeführt hat. Die Auswertung der Ergebnisse ergibt, dass mit diesem Verfahren keine getrennte Detektion der Ankerplatten sowie der Bewehrung durchgeführt werden kann und es wird somit als nicht geeignet erklärt. Hier soll noch einmal eine Abstimmung zu den weiteren Erfahrungen der BAM (Fachbereich 8.2 Zerstörungsfreie Prüfmethoden für das Bauwesen) mit potentiellen anderen Verfahren erfolgen. Um auch noch weitere dort erforschte Verfahren zu prüfen, gab es am 24.07.2023 noch einen gemeinsamen Termin mit diesem Fachbereich der BAM.

Für das 5. Verfahren wurde durch das **KIT** ein Kontakt zum Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) hergestellt. Dieses hat am 18.07.2023 am Versuchsstand des **KIT** am TMB Testmessungen durchführen können. Die ersten Ergebnisse zeigten erste Messerfolge, welche durch eine anschließende, tiefere Auswertung und ggf. ein Training des Messmodells geprüft werden müssen.

### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

In den nächsten Monaten erfolgt die Auswahl geeigneter Messtechnik für die Detektion der „unsichtbaren“ Störstellen, basierend auf den Vorversuchen sowie die Komplettierung der Datenaufnahme im Rahmen von **AP2**. Parallel dazu wird im **AP3** das Gebäudemodell erstellt sowie weitere Untersuchungen im Rahmen des **AP4** durchgeführt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.03.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9439A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWE Nuclear GmbH, RWE Platz 2, 45141 Essen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung TP: Prototypbau einer autonomen Anlage zur Dekontamination und radiologischen Messung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.3.2023 bis 28.02.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 397.807,25€
<b>Projektleiter:</b> Herr Dipl.-Ing. Thomas Schubert	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.Schubert@rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts ist, eine automatisierte und autonome robotergestützte Dekontamination der Bauteiloberflächen und radiologische Messung vorher unbekannter individueller Bauteile unterschiedlichster Geometrie, Größe und Oberflächenbeschaffenheit mit simultanen und variablen Mess- und Bearbeitungsverfahren durchzuführen. Als Bearbeitungsverfahren wird ein robotergestütztes Laserablationsverfahren zur Anwendung kommen, während das Messverfahren radiologische Messungen durchführt, die eine qualitative und quantitative Aussage über radioaktive Verunreinigungen am Bauteil ermöglicht. Beide Verfahren erfordern eine besonders hohe Genauigkeit bei der Bauteilerkennung und bei der Anwendung der Wirkparameter wie z.B. bei dem Laser-Fokusabstand im Falle von Laserablation, oder dem einzuhaltenen Abstand Szintillationsdetektoren zur Bauteiloberfläche.

Kern der zu entwickelnden Technik ist es erstmals, gleichzeitig und autonom, die 3D-Erfassung eines Bauteils, seine Reinigung und die Qualitätskontrolle seiner gereinigten Oberfläche, inline im selben Durchgang, mit einem robotergestützten Kombi-Werkzeug durchzuführen und es dann einer ebenfalls autonomen robotergestützten radiologischen Messung zuzuführen, welche auf die im ersten Schritt generierten 3D-Modelldaten des Bauteils zurückgreift.

### Teilprojekt RWE:

RWE entwickelt und plant die technische Umsetzung für die gemeinsam mit dem Projektpartner (Fachinstitut: Fraunhofer Institut IGD in Darmstadt) zu entwickelnde Roboter-gestützte Automatisierungslösung, unterstützt die Entwicklung CE-konformer industrietauglicher Komponenten und deren Aufbau zu einer produktionsfähigen Prototypanlage. Die Arbeitspakete werden dabei in enger Zusammenarbeit unter stetiger Evaluierung der Ergebnisse mit dem IGD bearbeitet.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

AP2 – Ansätze zur Geometrie- und Lageerfassung von Bauteilen, Bahnplanung

AP3 – Dekontamination

AP4 – radiologische Messung (Vormessung)

AP5 – Integration und Evaluation

AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP7 – Projektmanagement

RWE Nuclear GmbH ist Projektkoordinator und ist an allen Arbeitspaketen beteiligt. Zum Projektstart wurden die AP1, AP2, AP3 und AP4 simultan gestartet.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

#### AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

- Zusammenstellung der Dekontaminationsanforderungen
- Zusammenstellung der Anforderungen an die radiologische Messung und Anforderungen der robotergestützten radiologischen Messung an die Bauteilgeometrien
- Beschreibung des Spektrums der zu bearbeitenden Bauteile, Maße und Gewichte
- Ermittlung des Arbeitsvolumens
- Erste Zusammenstellung der physikalischen Parameter für die laserbasierte Bauteildekontamination und Messung
- Vorauswahl geeigneter Roboterarme, Kontakt zu Herstellern
- Erarbeitung eines Konzepts für die Bauteilzufuhr und den Transport, Kontakt zu Herstellern von Zufuhr- und Fördersystemen
- Aufbau von virtuellen Bearbeitungsstationen für die robotergestützte Laserdekontamination mit verschiedenen Robotertypen, Linearschienen und Bearbeitungsköpfen in Kombination mit verschiedenen Bauteilhandhabungssystemen dem Ziel, geeignete Komponenten zusammenzustellen

#### AP2 – Ansätze zur Geometrie- und Lageerfassung von Bauteilen, Bahnplanung

- Ermittlung der technischen Anforderungen an die Geometrie- und Lageerfassung von Bauteilen aus dem Blickwinkel des Bearbeitungs- und Messverfahrens
- Transformation und Auswertung idealer Führungsbahnen für die Laserbearbeitung und Kontaminationsmessung unter Berücksichtigung realer Bearbeitungswerkzeuge auf die Bauteiloberfläche/Geometrie

#### AP3 – Dekontamination (Laserdekont-Verfahren)

- Vorauswahl von Laser-Dekontverfahren, Kontaktaufnahme und Fachgespräche bei Herstellern
- Durchführung von Feldversuchen mit Ablationslasern unterschiedlicher Leistungsklassen und Settings
- Erste Ableitung der physikalischen Wirkparameter für unterschiedliche Laserverfahren und Bearbeitungsköpfe
- Erörterung von Steuerungsmöglichkeiten zur Einstellung der Bearbeitungsparameter mit Herstellern der Laseranlagen
- Technische Anforderungen und Gegebenheiten, die sich aus der Absaugung ergeben
- Untersuchung der Bearbeitungsköpfe im Hinblick auf deren Adaption am Roboterarm
- Erarbeitung von Konzepten zur Adaptierung an verschiedene Robotertypen

AP4 – radiologische Messung (Vormessung)

- Vorauswahl von Messverfahren und Messmitteln, Kontakt zu Herstellern
- Vorauswahl von Messgeräten im Hinblick auf die Anforderungen bestehender Messanweisungen
- Untersuchung von Messgeräten im Hinblick auf ihre Eignung für den Robotereinsatz, Erörterung von Adaptierungsmöglichkeiten und Schnittstellen mit Herstellern
- Ermittlung der Basisanforderungen für die elektronische Dokumentation (zu übermittelnde Daten)

AP7 – Projektmanagement

- Abstimmung und Erstellung einer PSP-Struktur
- Aufbau eines detaillierten Projektterminplans mit MS Project
- Analyse zeitkritischer Projektvorgänge
- Einrichten von Controllingwerkzeugen und Hilfsmitteln
- Organisation und Durchführung von Projektgesprächen im 14-tägigem Rhythmus
- Abstimmung und Einrichtung einer Organisations- und Ablagestruktur (cloudbasiert)
- Erstellung einer Master-Memoliste zur Verfolgung offener Projekttasks
- Etablierung des Projektberichtswesens
- Teilnahme und Vorbereitung der Teilnahme an Fachmessen, Konferenzen

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP1: Spezifizierung geeigneter Roboterarme und Vorbereitung der Beschaffung

AP2: Spezifizierung geeigneter Verfahren für die Geometrieerkennung und Vorbereitung der Beschaffung der erforderlichen Komponenten

AP3: Spezifizierung des Ablationslasers und seiner Bauteile und Schnittstellen für die Adaptierung an einem Roboterarm und Vorbereitung der Beschaffung

AP5: Verarbeitung der Ansätze zu einem Gesamtkonzept und Aufbau eines virtuellen Anlagenprototyps

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Derzeit keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.03.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9439B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200733, 800007 München, für ihr Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Fraunhoferstraße 5, 64283 Darmstadt	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung TP: Autonome Laserablation und radiologische Vormessung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.3.2023 bis 28.02.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.601.161,45 €
<b>Projektleiter:</b> Herr Dipl.-Ing. Thomas Schubert	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.Schubert@rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts ist, eine automatisierte und autonome robotergestützte Dekontamination der Bauteiloberflächen und radiologische Messung vorher unbekannter individueller Bauteile unterschiedlichster Geometrie, Größe und Oberflächenbeschaffenheit mit simultanen und variablen Mess- und Bearbeitungsverfahren durchzuführen. Als Bearbeitungsverfahren wird ein robotergestütztes Laserablationsverfahren zur Anwendung kommen, während das Messverfahren radiologische Messungen durchführt, die eine qualitative und quantitative Aussage über radioaktive Verunreinigungen am Bauteil ermöglicht. Beide Verfahren erfordern eine besonders hohe Genauigkeit bei der Bauteilerkennung und bei der Anwendung der Wirkparameter wie z.B. bei dem Laser-Fokusabstand im Falle von Laserablation, oder dem einzuhaltenen Abstand Szintillationsdetektoren zur Bauteiloberfläche.

Kern der zu entwickelnden Technik ist es erstmals, gleichzeitig und autonom, die 3D-Erfassung eines Bauteils, seine Reinigung und die Qualitätskontrolle seiner gereinigten Oberfläche, inline im selben Durchgang, mit einem robotergestützten Kombi-Werkzeug durchzuführen und es dann einer ebenfalls autonomen robotergestützten radiologischen Messung zuzuführen, welche auf die im ersten Schritt generierten 3D-Modelldaten des Bauteils zurückgreift.

### Teilprojekt IGD:

In enger Abstimmung mit RWE entwickelt das Fraunhofer IGD die notwendige autonome, dynamische, Roboter-gestützte 3D-Digitalisierung und Reinigung beliebiger Objektoberflächen unter Berücksichtigung der Laserablationswirkparameter und Störgeometrien. Des Weiteren entwickelt das Fraunhofer IGD die Bahnplanung für die radiologische Messung und damit Qualitätskontrolle der zu entsorgenden Bauteile, bzw. Baugruppen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

AP2 – Ansätze zur Geometrie- und Lageerfassung von Bauteilen, Bahnplanung

AP3 – Dekontamination

AP4 – radiologische Messung (Vormessung)

AP5 – Integration und Evaluation

AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP7 – Projektmanagement

Das Fraunhofer IGD ist an allen Arbeitspaketen beteiligt.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

#### AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

- Siehe Zwischenbericht RWE; Gemeinsame Festlegung der Systemanforderungen.
- Erster prototypischer Entwurf von einem 3D-Scansystem, welches voraussichtlich aus einer Kombination aus Laserlinienscanner und Vollbilderfassung bestehen wird.
- Definition und Entwurf programmtechnischer Ansätze zur Kollisionsvermeidung im Arbeitsvolumen des Laserablationsscanners.

#### AP2 – Ansätze zur Geometrie- und Lageerfassung von Bauteilen, Bahnplanung

- Ermittlung der technischen Anforderungen an die Geometrie- und Lageerfassung von Bauteilen aus dem Blickwinkel des Bearbeitungs- und Messverfahrens
- Transformation und Auswertung idealer Führungsbahnen für die Laserbearbeitung und Kontaminationsmessung unter Berücksichtigung realer Bearbeitungswerkzeuge auf die Bauteiloberfläche/Geometrie
- Berücksichtigung möglicher Umpositionierprozesse analog Umspannprozessen der zu reinigenden Bauteile/Baugruppen

#### AP3 – Dekontamination (Laserdekont-Verfahren)

- Vorauswahl von Laser-Dekontverfahren, Kontaktaufnahme und Fachgespräche bei Herstellern
- Durchführung von Feldversuchen mit Ablationslasern unterschiedlicher Leistungsklassen und Settings
- Erste Ableitung der physikalischen Wirkparameter für unterschiedliche Laserverfahren und Bearbeitungsköpfe
- Erörterung von Steuerungsmöglichkeiten zur Einstellung der Bearbeitungsparameter mit Herstellern der Laseranlagen
- Technische Anforderungen und Gegebenheiten, die sich aus der Absaugung ergeben
- Untersuchung der Bearbeitungsköpfe im Hinblick auf deren Adaption am Roboterarm
- Erarbeitung von Konzepten zur Adaptierung an verschiedene Robotertypen

#### AP4 – radiologische Messung (Vormessung)

- Vorauswahl von Messverfahren und Messmitteln, Kontakt zu Herstellern
- Vorauswahl von Messgeräten im Hinblick auf die Anforderungen bestehender Messanweisungen
- Untersuchung von Messgeräten im Hinblick auf ihre Eignung für den Robotereinsatz, Erörterung von Adaptierungsmöglichkeiten und Schnittstellen mit Herstellern
- Ermittlung der Basisanforderungen für die elektronische Dokumentation (zu übermittelnde Daten)

AP7 – Projektmanagement

- Von RWE durchgeführt.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP1: Spezifizierung geeigneter Roboterarme und Vorbereitung der Beschaffung

AP2: Spezifizierung geeigneter Verfahren für die Geometrieerkennung und Vorbereitung der Beschaffung der erforderlichen Komponenten

AP3: Spezifizierung des Ablationslasers und seiner Bauteile und Schnittstellen für die Adaptierung an einem Roboterarm und Vorbereitung der Beschaffung

AP5: Verarbeitung der Ansätze zu einem Gesamtkonzept und Aufbau eines virtuellen Anlagenprototyps

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Derzeit keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9409A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenfluenzverteilungen TP: Berechnung der Neutronenfluenzverteilung in reaktornahen Bauteilen und deren Validierung an Experimenten als Basis der Aktivitätsrechnungen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2018 bis 31.03.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 893.472,98 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Jörg Konheiser	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> j.konheiser@hzdr.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundvorhabens ist es, eine standardisierte Methode zu entwickeln, die auf Basis der Leistungsgeschichte eines Kernreaktors die anlagenspezifische Aktivierung und deren zeitliche Veränderung für Reaktorkomponenten und reaktornahe Beton- bzw. Konstruktionselemente berechnet.

Damit ist eine zerstörungsfreie und frühzeitige radiologische Charakterisierung im Bereich der gesamten Reaktor Umgebung möglich, die für eine optimale Planung und Durchführung der Rückbaumaßnahmen benötigt wird. Dieses könnte wesentlich zu einer Minimierung des radioaktiven Abfalls und der Strahlenbelastung des Personals beim Rückbau beitragen. Die Methode wird am Beispiel eines Konvoi-Druckwasserreaktors entwickelt und an Experimenten validiert. Das Verbundprojekt besteht aus zwei Teilprojekten.

In diesem Teilvorhaben werden die dafür benötigten genauen 3D Neutronenfluenzrechnungen durchgeführt. Für solche Simulationen mit komplizierten Geometrien ist die Monte-Carlo Methode ein anerkanntes Verfahren. Zum Einsatz im Projekt kommt deshalb hauptsächlich das international viel verwendete Programm MCNP6. Für das Erstellen des Geometriemodells werden Originalkonstruktionsunterlagen verwendet. Als Referenzkraftwerk wird eine Vor-Konvoi Anlage genutzt. Die Neutronenquelle wird, basierend auf entsprechenden Leistungsgeschichten, als äußere Quelle vorgegeben. Die benötigten Daten dafür werden vom Betreiber bereitgestellt. Wegen der großen räumlichen Dimensionen muss ein Schwerpunkt der Arbeiten in der Optimierung der Simulation liegen. Die Nutzung von varianzreduzierenden Methoden wird dabei unerlässlich sein.

Zur Validierung der Rechenergebnisse werden Neutronenfluenzmessungen auf Basis von Aktivierungsfolien im Referenzkraftwerk durchgeführt. Zusätzlich sind Messungen in anderen KKW geplant. An ausgewählten Stellen werden verschiedene Folien in Reaktornähe installiert und während eines Betriebszyklus bestrahlt. Die erzeugten Aktivitäten werden mit den Rechenergebnissen verglichen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Realisierung des Vorhabens erfolgt in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP). AP 1 (teilweise), 2 und 3 werden in diesem und AP 4 und 5 im anderen Teilprojekt bearbeiten.

AP 1: Erstellung des Geometriemodells

AP 2: Berechnung der Neutronenfluenzverteilung und deren Spektren

- Neutronenquelltermberechnungen
- Berechnung der Neutronenfluenzspektren für die Reaktoreinbauten, den Druckbehälter und die reaktornahen Bauteile

AP 3: Neutronenfluenzmessungen

Neutronenfluenzmessungen werden auf Basis von Aktivierungsfolien durchgeführt. In Absprache mit den Betreibern (PreussenElektra) werden an ausgesuchten und zugänglichen Stellen verschiedene Aktivierungsfolien installiert und innerhalb eines Zyklus bestrahlt. Mittels Gammaskopie oder anderer Methoden werden die entstandenen Aktivitäten gemessen und zur Validierung der Rechnungen genutzt.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 1: Die ersten Vergleiche aus dem Bereich der großen Durchführungen mit den Messungen zeigen, dass hier das Modell verfeinert werden muss. Die Experimente zeigen, dass praktisch die gesamte Neutronenfluenz durch die Tragschilddurchführungen der Primärloopleitungen in die äußeren Räume immigriert. Der Einfluss in diesem Bereich auf die äußere Fluenz ist deshalb sehr groß und eine sehr genaue Modellierung auch von kleineren Elementen ist notwendig. Entsprechende Anpassungen wurden vorgenommen.

AP 2: Mitte Mai wurden die exakten Leistungsdaten des Referenzkraftwerkes 2 übergeben und die Neutronenquelle bzw. deren Verteilung neu bestimmt. Dies traf sowohl auf die Quellberechnung für den Vergleich der Monitore (nur für den letzten Zyklus) als auch für die Quelle für die Gesamtaktivitätsberechnung zu.

Wie bereits in AP1 erwähnt, sind für das Referenzkraftwerk 1 erste Rechnungen auch für die Monitore außerhalb des Tragschildes durchgeführt worden. Wie zu erwarten war, traten größere Differenzen zu Experimenten auf. Überraschend war aber die große Streuung der Ergebnisse. So konnten, in Abhängigkeit der Position der Monitore, sowohl sehr gute als auch gar keine Übereinstimmung erzielt werden. So sind die C/E (Calculation zu Experiment) Verhältnisse im Bereich der Durchführungen zwischen 0.8 und 10, dagegen konnte für die Monitore auf dem Tragschild keine Kongruenz erzielt werden. Einerseits werden als Ursache für die starken Schwankungen örtliche Abschirmeinflüsse auf den thermischen Fluss (die Aktivität wird überwiegend durch thermischen Einfang erzeugt) vermutet und andererseits im Rechenmodell selbst liegen. So sind aus Varianzgründen getrennte Rechnungen für die einzelnen Bereiche durchgeführt worden und somit keine Neutronendiffusion aus den Primärkreislaufräumen berücksichtigt. Entsprechende Sensitivitätsanalysen sollen dieses aufklären.

AP 3. Der erste Satz Monitore, welcher nach der Hälfte des letzten Zyklusses aus Referenzkraftwerk 2 entnommen wurde, wurde im Februar nach Rossendorf geliefert. Danach wurde die Aktivierung mit Gammaskopie bestimmt.

Nach Abschaltung des Referenzkraftwerkes 2 im April wurden sämtliche Monitore entnommen und für den Transport nach Rossendorf vorbereitet.

#### 4. Geplante Weiterarbeit

AP 1: Entsprechend den Erkenntnissen aus den Sensitivitätsanalysen und den Testrechnungen werden die Rechenmodelle angepasst und notwendigen Erweiterungen eingefügt.

AP 2: Zur Aufklärung der Differenzen werden entsprechende Sensitivitätsanalysen und Testrechnungen durchgeführt. So sollte versucht werden anhand von Fotos eventuell aufgetretene Abschirmungen in den Rechnungen zu berücksichtigen. Außerdem sollen sowohl die Auswirkungen von kleinen Ortsverlagerungen der Monitore als auch im Rahmen von Toleranzangaben der Einfluss der Dichte des Betons untersucht werden. Das Modell soll entsprechend modifiziert und neue Rechnungen ausgeführt werden.

AP 3: Die Aktivierungen der Monitore aus Referenzkraftwerk 2 werden mittels Gammaskopimetrie gemessen. Für ausgewählte Monitore wird Nb-93m (Aktivierungsprodukt aus Nb) mittels LSC bestimmt.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

WERREBA Projekt

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Rachamin, R.; Barkleit, A.; Konheiser, J.; Seidl, M.: "Estimation of neutron fluence distribution within German PWR components for decommissioning studies" in EPJ Web of Conferences, submitted

Barkleit, A., Rachamin, R., Pönitz, E., Konheiser, J. "Experimentelle Bestimmung der Aktivierung von deutschen Druckwasserreaktoren zur Validierung der Aktivitätsberechnungen", 10. Radiochemischer Workshop (RCA), 12.-14. 06. 2023, Dresden, Vortrag

Rachamin, R., Konheiser, J., Barkleit, A., Marcus, S., "Activation calculations for decommissioning planning of NPPs", Proc. of 86 Annual Meeting of DPG and DPG Spring Meeting of the Matter and Cosmos Section (SMuK) 2023, March 20-24, 2023 - Invited Lecture.

Rachamin, R., Konheiser, J., Barkleit, A., Marcus, S., "Activation calculations of selected German PWR components using the MCNP-FLUKA codes", AAA Workshop, Garching, Germany, May 10, 2023.

Rachamin, R., Konheiser, J., Barkleit, A., Marcus, S., "Dosimetry and Activation Calculations for Optimal Decommissioning Planning of NPPs", Helmholtz Energy Conference 2023, Koblenz, Germany, June 12-13, 2023.

Rachamin, R., Konheiser, J., Barkleit, A., Marcus, S., "Dosimetry for Decommissioning of Nuclear Power Plants", Proc. of 2023 ANS Annual Meeting, Indianapolis, IN, USA, June 11-14, 2023 - Invited Lecture.

Yadav, P., Rachamin, R., Konheiser, J., "Weight values for MCNP calculations based on Recursive Monte-Carlo method", Proc. of 2023 ANS Annual Meeting, Indianapolis, IN, USA, June 11-14, 2023 - Invited Lecture.

Yadav, P., Rachamin, R., Konheiser, J., Baier, S., "Generation of optimal weight values based on the Recursive Monte Carlo (RMC) method for using in MC deep penetrations calculations", Nuclear Engineering and Design (2023)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9409B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWTH Aachen, Institut für Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (ELS)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenfluenzverteilungen – EMPRADO TP: Entwicklung und Anwendung einer Methode zur genauen Berechnung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.12.2018 bis 30.11.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 694.085,52 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Frank Charlier / Prof. Dr. R. Nabbi	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Charlier@els.rwth-aachen.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundvorhabens ist es, eine standardisierte Methode zu entwickeln, die auf Basis der Leistungsgeschichte eines Kernreaktors die anlagenspezifische Aktivierung und deren zeitliche Veränderung für Reaktorkomponenten und reaktornahe Beton- bzw. Konstruktions-elemente berechnet. Damit wäre eine zerstörungsfreie und frühzeitige radiologische Charakterisierung von Gebäudeteilen im Bereich des Reaktorkerns möglich. Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Bestimmung des aus der Aktivierung resultierenden Strahlenfelds, welches schließlich den radiologischen Status einer Rückbaumaßnahme definiert und einen zentralen Aspekt beim Rückbau eines Kernreaktors darstellt.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgt drei wesentliche Ziele:

- Minimierung des radioaktiven Abfalls durch detaillierte Quantifizierung und Charakterisierung bereits vor dem Rückbau.
- Optimierung der Strahlenschutzmaßnahmen zur Minimierung der Strahlenbelastung des Personals beim Rückbau und der Entsorgung.
- Optimale Planung und Durchführung von Rückbaumaßnahmen.

Der Titel des Teilprojektes der RWTH Aachen lautet:

Entwicklung und Anwendung einer Methode zur genauen Berechnung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Realisierung des Verbundvorhabens erfolgt in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP). Die AP 4 und 5 werden im Teilprojekt 2 der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Endlagersicherheit (ELS) und AP 2 und 3 im anderen Teilprojekt bearbeitet durch das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V. (HZDR), Institut für Ressourcenökologie (IRE). Die Durchführung des AP1 erfolgt durch die beiden beteiligten Institute.

- AP 1: Erstellung des Geometriemodells
- AP 2: Berechnung der Neutronenfluenzverteilung und deren Spektren
  - 2.1: Neutronenquelltermberechnungen

- 2.2: Berechnung der Verteilung
- AP 3: Neutronenflussmessungen zur Modellvalidierung
- AP 4: Berechnung der Aktivitätsverteilung
  - 4.1: Erstellung anlagenspezifischer Aktivierungsquerschnittsdateien
  - 4.2: Berechnung der Aktivitätsverteilung in den einzelnen Strukturen
- AP 5: Bestimmung der Ortsdosisleistungsverteilung (ODL)
  - 5.1: Bestimmung der Energie- und ortsabhängigen Strahlenquellterme
  - 5.2: Simulation des Strahlenfelds und der ODL-Verteilung

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### **AP 4.1: Erstellung Datenbibliothek für Aktivierungswirkungsquerschnitte**

Die im Rahmen von AP-4.1 geplanten Arbeiten sind bereits vor diesem Berichtszeitraum wie vorgesehen durchgeführt worden und sind somit abgeschlossen.

#### **AP 4.2: Berechnung und Verifizierung der 3D-Aktivitätsverteilung**

Die im Rahmen von AP-4.2 geplanten Arbeiten sind bereits vor diesem Berichtszeitraum wie vorgesehen durchgeführt worden und sind somit abgeschlossen.

#### **AP 5.1: Bestimmung der Verteilung der Strahlungsquellterme**

Für jedes RDB-Segment des KONVOI-Modells wurden nuklidspezifische, energieabhängige Quelltermberechnungen (Gamma-Emission) durchgeführt. Des Weiteren wurden die erste Auswertung sowie der Vergleich der gewonnenen Quelltermdateien für RDB der beiden Anlagen (VOR-KONVOI und KONVOI) unternommen, um den Einfluss der Material-zusammensetzung, Betriebsbedingungen und der Neutronenfluss (Aufgrund der Unterschiede der beiden Anlagen) zu ermitteln.

#### **AP 5.2: Simulation des Strahlenfelds und der ODL-Verteilung**

Im Rahmen dieses AP wurden Strahlentransportberechnungen (MCNP-Programm) durchgeführt, um die Beiträge der kernnahen Bauteile und äußeren Strukturen des Reaktors zum Strahlungsfeld und zur Verteilung der daraus resultierenden ODL im gesamten VOR-KONVOI-Anlagenmodell zu bestimmen. Nach Auswertung der Ergebnisse wurde über die additive Kombination das integrale Strahlungsfeld (Gamma-Fluss und ODL) des gesamten Anlagenmodells simuliert. Darüber hinaus wurden an dem Einsatz eines Visualisierungs-verfahrens zur graphischen Darstellung der Ergebnisse der Strahlentransportberechnungen in Form von ODL- und Flussatlanten gearbeitet.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

#### **AP 4.1: Erstellung Datenbibliothek für Aktivierungsberechnungen**

Diesbezüglich sind im nächsten Berichtszeitraum keine weiteren Arbeiten geplant.

#### **AP 4.2: Berechnung der 3D-Aktivitätsverteilung**

Die für AP-4.2 geplanten Arbeiten wurden durchgeführt und sind bereits abgeschlossen.

#### **AP 5.1: Bestimmung der Verteilung der Strahlungsquellterme**

Im Rahmen dieser AP werden Ergänzende detaillierte Quelltermberechnungen für die kerninneren Bauteile sowie äußeren Komponenten (u.a. RDB und Bioschild) einer zweiten Anlage des KONVOI-Typs durchgeführt. Nach der Generierung der Quelltermdateien (nuklidspezifisch, Energieabhängig und integral) werden eine Analyse der einzelnen Dateien sowie ein Vergleich

der Emissionsspektren der Strukturen der beiden Anlagen unternommen: (VOR-KONVOI- und KONVOI-Anlage). Mit dem Abschluss der Quelltermberechnungen für alle Komponenten der beiden Anlagen und Erzeugung der entsprechenden Datenbanken werden die Ziele des Arbeitspakets 5.1 wie geplant gänzlich erreicht.

#### **AP 5.2: Simulation des Strahlenfelds und der ODL-Verteilung**

Im Rahmen dieses AP konzentrieren sich die geplanten Arbeiten auf Strahlentransportberechnung für eine zweite am Projekt beteiligten Anlage des KONVOI-Typs. Zu diesem Zweck wird als erstes die Berechnung der Verteilung des Gammaflusses und der ODL im Gesamtmodell als Beitrag der Gammaemission bzw. des Quellterms der einzelnen Komponenten der KONVOI-Anlage durchgeführt. Dies erfolgt nach dem bisherigen Simulationsverfahren (VOR-KONVOI-Berechnungen) unter Zugrundlegung der in AP5.1 gewonnenen Quelltermdateien. Anschließend wird das integrale Strahlenfeld (Verteilung des Gammaflusses und der ODL) im Gesamtmodell über additive Kombination der durch die einzelnen im Gesamtmodell erzeugten Verteilungen berechnet.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es handelt sich hierbei um das Teilprojekt eines Verbundprojekts, im Rahmen dessen wechselseitiger Bezug zwischen den beiden Teilprojekten besteht.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

1-M. Nolden, et al. „Radiologische Charakterisierung von Kernreaktoren für den Rückbau“ KONTEC-2021, August, Dresden

2-A. Scaramus et al. “Radiological Characterization of a German PWR” Jahrestagung „Strahlenschutz und Entsorgung“, Sept. 2021, Aachen

3-M. Norden, et al “Development and Application of a High-Dimensional Model for Activity Analysis”, EU-RadWaste 2022, Lyon, France

4-M. Nolden, „Charakterisierung des Aktivitätsinventars von Kernreaktoren und Erstellung einer optimierten“, Dissertation, RWTH-Aachen, August 2022

5-A. Scaramus, et al, “Simulation of the Radiation Field and Dose Rate Distribution of a German PWR based on a highly Nodalized Reactor Model”, KONTEC-2023: Int. Symposium August 2023, Dresden

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hellma Materials GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie TP: Gerätebau und -entwicklung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 534.371,87 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Sibylle Petrak	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Sibylle.Petrak@hellma.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Das Teilprojekt Gerätebau und -entwicklung hat zum Ziel, einen Prototypen eines kollimationsfreien, richtungsaufgelösten In-situ Gammaspektrometers in drei Ausführungsmodellen herzustellen. Der Prototyp soll einerseits die Zusammensetzung der Kontamination (das Radionuklidgemisch) und die Höhe der Kontamination feststellen und andererseits die räumliche Verteilung mit einem bildgebenden Verfahren bestimmen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm (im Berichtszeitraum)

AP 3 Aufbau Messsysteme

3.2 Gerätefertigung (1/2022-7/2022)

3.6 Softwareprogrammierung LabView (4/2022-11/2022)

3.7 Aufbau und Inbetriebnahme Zusatzgeräte (5/2022-9/2022)

3.8 Systemintegration (7/2022-11/2022)

AP 4 Labormessungen, Versuchsreihen

4.3 Durchführung & Auswertung Versuchsreihen HSZG (12/2022-8/2023)

4.4 Fertigstellung der Bildrekonstruktions-Software (10/2022-6/2023)

4.5 Datenfusionierung mit Zusatzgeräten (2/2023-8/2023)

4.6 Datenvisualisierung (5/2023-8/2023)

AP 5 Test & Validierung unter realen Einsatzbedingungen

5.1 Langzeittests zur Temperaturstabilität (7/2023-2/2024)

5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (9/2023-2/2024)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Abgeschlossene Arbeitspakete:

AP 1, 2

Abgeschlossene Programmpunkte:

AP 3.1, 4.1

Laufende Programmpunkte:

AP 3.2 bis 3.8

AP 4.3 bis 4.6

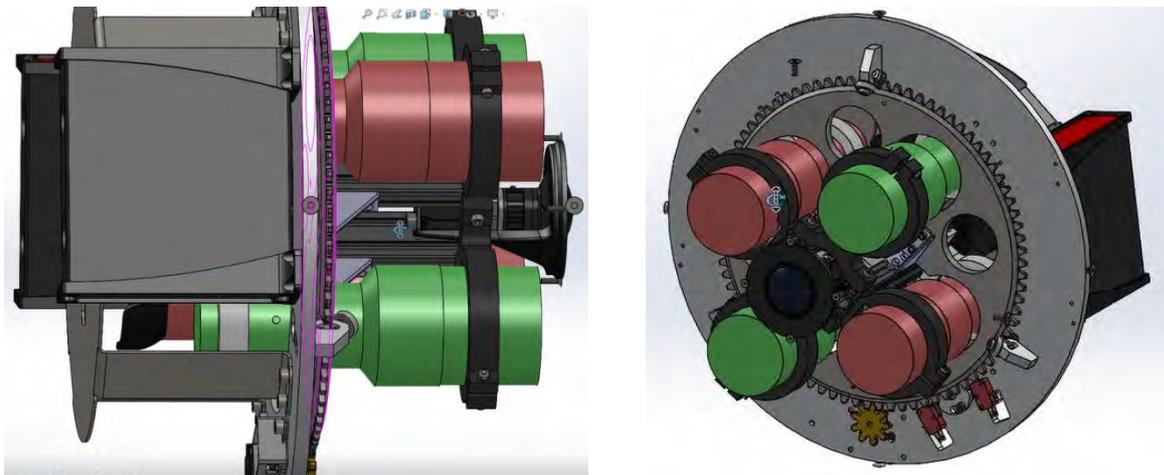
Projektmeetings und Konferenzen:

- Gastgeber für 5. Projektmeeting am 02.03.23 in Jena
- Vortrag auf der Helmholtz Imaging Konferenz Hamburg 14.-16.06.23

Für das Projekt getätigte Investitionen:

- zwei Plastik-Szintillationsdetektoren der Größe 3“x3“

In diesem Berichtszeitraum lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf den Arbeitspaketen 3 und 4. Gemäß dem neuen Meilenstein 3b sind die Arbeiten in **AP 3** auf die Konstruktion und die Gerätefertigung für den RSL4 ausgerichtet. Es wurden zwei Plastik-Szintillationsdetektoren eingekauft, die zusammen mit den vorhandenen zwei Cerbromid-Detektoren vom RSL2 die neue Vierer-Detektorgruppe für den RSL4 bilden. Die Konstruktionsarbeiten für die RSL4 Bau-  
gruppe und Rotationsvorrichtung sind abgeschlossen. Abb. 1 zeigt den SolidWorks Entwurf.



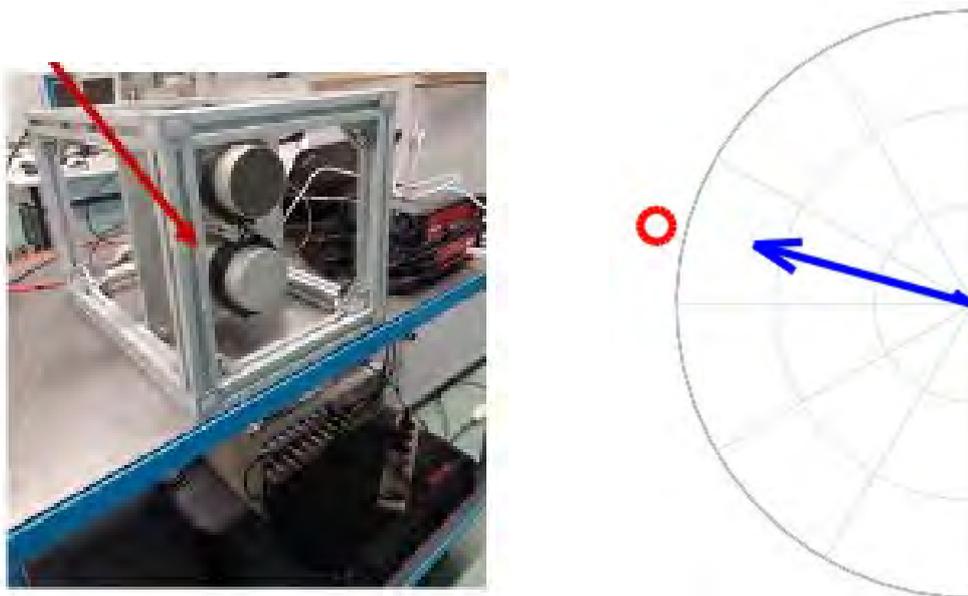
**Abb 1.** Technischer Entwurf für den RSL4 in Vorder- und Seitenansicht.

Das RSL4 Gerät ist – ähnlich wie ein astronomisches Teleskop – von einem Kohlefasertubus umschlossen. Vorn mittig zu den Detektoren befindet sich eine optische Weitwinkelkamera. Die Kamera ist bündig an der Vorderseite angebracht und ihr Sichtfeld ist frei von der Umhau-  
sung. Eine Trägerplatte nimmt die gesamte Last auf. Die vier Detektoren sind auf einem gro-  
ßen Zahnrad befestigt, das drehbar gelagert ist. Das Zahnrad wird von einem Stepper-Motor  
angetrieben. Es gibt zwei Anschläge mit denen die Drehung auf 180° beschränkt werden kann.

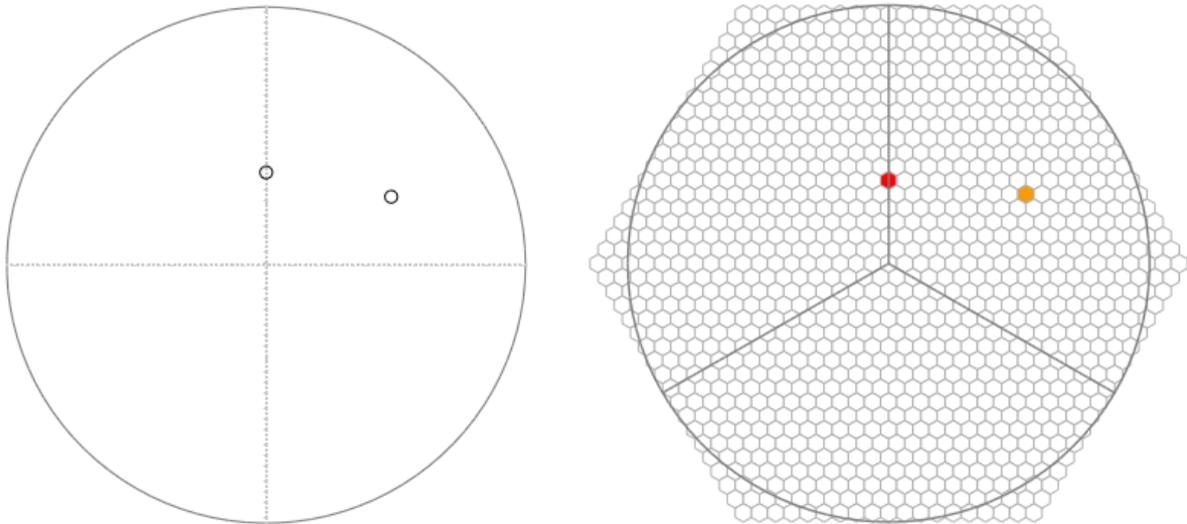
Eine Überwachung der Anschläge verhindert ein Weiterdrehen, womit gleichzeitig eine Beschädigung der Kabel ausgeschlossen wird. Durch die Anschlagüberwachung erhält die Motorsteuerung ein Signal, an welchem Anschlag das Zahnrad ist und kann in die Gegenrichtung umschalten. Im nächsten Messzyklus dreht sich das Zahnrad dann in die entgegengesetzte Richtung. An der Trägerplatte sind zwei CAEN Module befestigt, von denen eines die Hochspannungsversorgung und das andere der Multi-Kanal Digitizer zur Auslese der vier Detektoren sind. Die Detektorkabel werden spiralförmig an einer drehbaren Schnecke befestigt. An der Trägerplatte befindet sich ebenfalls ein Stativgewinde mit einem massiven Aufnahmeblock zur Aufstellung auf einem Stativ.

Die Firma Lastronics GmbH wurde mit der Anfertigung des RSL4 Geräts gemäß dem technischen Entwurf, dem Einkauf aller Einzelteile (zusätzlich zu Detektoren und CAEN Modulen) und der zugehörigen Softwareentwicklung zur Einbindung der Weitwinkelkamera in die bestehende Software beauftragt. Das fertige Gerät soll mit Termin zum 01.09.23 an die Hochschule Zittau/Görlitz übergeben werden.

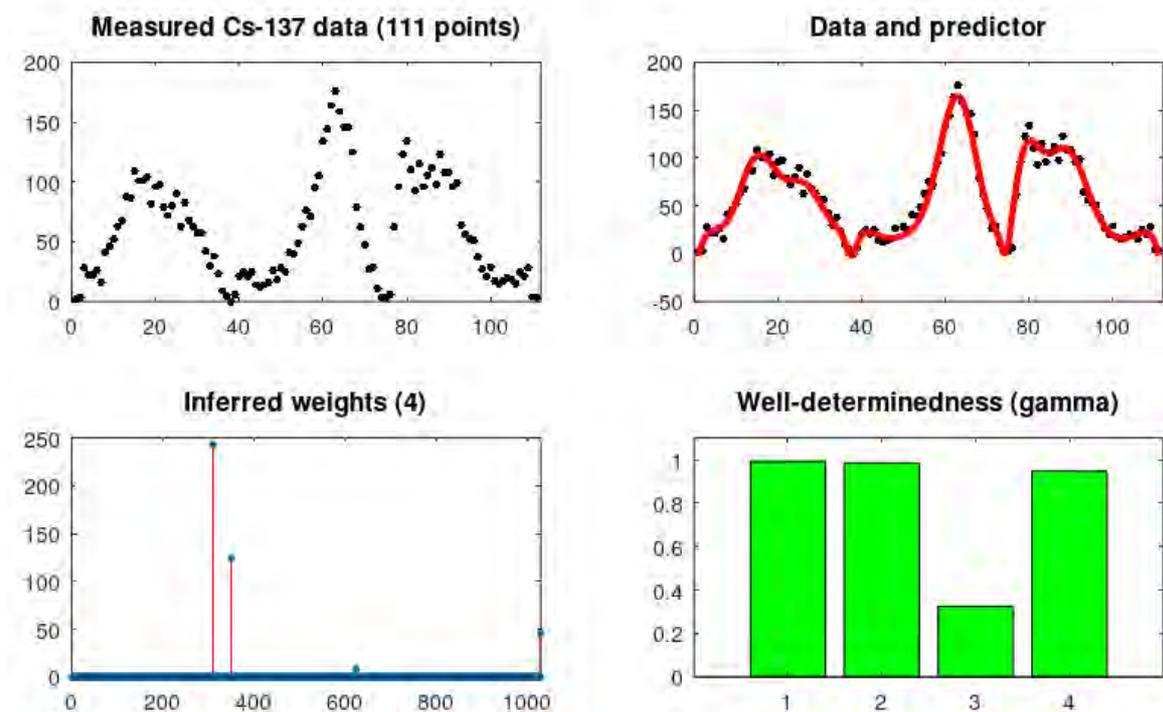
In **AP 4** wird – in enger Kooperation mit dem Projektpartner HSZG – die Bildrekonstruktions-Software weiterentwickelt (**AP 4.4**). Hierzu werden im Strahlenlabor der Hochschule Versuche mit den beiden fertiggestellten Geräten RSL2 und RSL7 durchgeführt, die dann von uns ausgewertet werden. Abb. 2, 3 und 4 zeigen einige der aktuellen Versuchsergebnisse.



**Abb 2.** RSL2 Versuchsaufbau an der HSZG und rekonstruiertes Kamerabild. Die Detektoren standen vertikal in 2 m Abstand zum Castor Versuchsstand. Dort war eine Cs-137 Quelle in 50 cm Höhe platziert. Die Software berechnet ein Modell der wahrscheinlichsten Anzahl von Quellen und deren Richtungen. Die ermittelte Quellenverteilung ist mit blauen Pfeilen dargestellt, welche die Richtungen und Intensitäten anzeigen. In dieser Messung wurde korrekt erkannt, dass nur eine Quelle vorhanden ist. Die tatsächliche Position bei  $14^\circ$  wird durch den roten Punkt angezeigt und stimmt mit dem blauen Pfeil überein.



**Abb 3.** Ergebnis eines RSL7 Versuchsaufbaus vom 23. Mai 2023 an der HSZG. Links ist die Quellenanordnung mit zwei Cs-137 Quellen zu sehen, dargestellt in der Mollweide Projektion. Beide Quellen befinden sich in einer Ebene 1 m vor der Kamera auf einer Höhe von 50 cm. Sie haben einen Abstand von 1 m zueinander. Rechts ist das rekonstruierte Kamerabild dargestellt, ebenfalls in der Mollweide Projektion. Die Farben der Pixel zeigen die Flussdichten am Kamerastandort an. Die Quelle rechts außen hat einen größeren Abstand zur Kamera, was ihre Flussdichte gegenüber der anderen gleich starken Quelle reduziert. Der „Mercedes Stern“ zeigt das 3-achsige Koordinatensystem, welches der 3-achsigen Symmetrie des RSL7 entspricht.



**Abb 4.** Datenbasis für das in Abb. 3 gezeigte Kamerabild. Der Plot „Measured Cs-137 data“ zeigt das Comptonwinkel Histogramm. Die SparseBayes Software ermittelt für dieses

Histogramm ein wahrscheinlichstes Modell der Quellenverteilung, das im Plot „Inferred weights“ zu sehen ist. Auf der x-Achse von „Inferred weights“ sind die Pixel-Nummern angegeben, d.h. die gesuchten Kontaminationsstellen, auf der y-Achse, die registrierten Intensitäten, d.h. die Flussdichte am Kamerastandort. Das letzte Bin bei Nr. 1028 ist immer vorhanden und ist der natürliche Strahlungsuntergrund.

Am 2. März 2023 waren wir Gastgeber für das 5. QGRIS Projektmeeting in Jena. Zum Auftakt gab es am Abend vor dem Treffen eine Betriebsbesichtigung mit anschließendem Abendessen der Projektpartner.

**Außendarstellung des QGRIS-Projekts:**



**Abb 5.** Der RSL7 war im Rahmen der Auftaktveranstaltung für SPIN2030 am 3. Februar 2023 auf dem Stand des VKTA in der Kongresshalle Leipzig zu sehen. SPIN2030 ist die Wissenschaftsagenda des Sächsischen Staatsministeriums für Wissenschaft, Kultur und Tourismus.

Im aktuellen Berichtszeitraum ist die Gruppe von Prof. Burger zum Helmholtz Imaging Zentrum ans DESY nach Hamburg gewechselt. Dort fand vom 14. bis 16. Juni die Helmholtz Imaging Konferenz statt, auf der wir gemeinsam mit Lorenz Kuger – jetzt vom Projektpartner DESY – das QGRIS Projekt präsentiert haben.



**Abb 6.** Präsentation des QGRIS Projekts auf der Helmholtz Imaging Konferenz 2023 in Hamburg. Prof. Burger moderiert die Session „Modern Reconstruction Methods in Imaging“, Dr. Sibylle Petrak und Lorenz Kuger tragen vor. In der Kaffeepause gibt es noch Tipps zur Verbesserung der Algorithmen vom ukrainischen Mathematiker Oleh Melnyk.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Die Arbeiten zu AP 3 und AP 4 sind weitgehend abgeschlossen und sollen in Bälde fertiggestellt werden. Mit den Arbeiten zu AP 5 wurde begonnen. Im Einzelnen ist Folgendes geplant:

**Meilenstein 3b:** Fertigstellung des RSL4 bis zum 1.9. und anschließende Inbetriebnahme.

Weiterarbeit in **AP 4.5:** Es wird eine Software entwickelt, die das Kamerabild live rekonstruiert und dem optischen Bild der Weitwinkelkamera überlagert ist.

Weiterarbeit in **AP 4.6:** Bereits begonnene Arbeiten zur Entwicklung einer graphischen Benutzeroberfläche, welche Gamma-Energiespektren und Kamerabilder für die Anwender visualisiert, sollen abgeschlossen werden.

Weiterarbeit in **AP 5.1:** Der Projektpartner HSZG hat uns darauf hingewiesen, dass die Szintillationsdetektoren stark temperaturabhängig sind, was die Performance der Geräte beeinträchtigt. Die Hochschule führt Versuche in einer Klimakammer durch. In der Masterarbeit von Tobias Rieger wird eine temperaturabhängige Kalibrierung der Szintillationsdetektoren für Cerbromid und Plastik ausgearbeitet. Der Projektpartner informiert uns über den Stand der Arbeiten.

Weiterarbeit in **AP 5.3:** Wir entwickeln eine graphische Benutzeroberfläche zur Kalibration aller Detektoren, die im laufenden Messbetrieb durchgeführt werden kann und intuitiv zu bedienen ist.

**Zusammenarbeit im Projektverbund:** Für die Woche vom 17. bis 21. 7. ist ein Besuch von Frau Dr. Petrak im Strahlenlabor der HSZG geplant. Am 20. 7. wird zudem ein gemeinsames Arbeitstreffen in Zittau stattfinden, an dem auch der Projektpartner VKTA mit 3 Mitarbeitern teilnehmen wird.

**Konferenzen:** Es sind Beiträge für zwei Konferenzen in Vorbereitung. Für die Kontec Konferenz vom 30.8. bis 1.9. in Dresden ist ein Poster-Beitrag; für die Applied Inverse Problems Konferenz (AIP23) vom 4. bis 8.9. in Göttingen ein Vortrag angemeldet. Der Projektpartner DESY organisiert erstmalig ein Minisymposium zum Thema Strahlenschutz und nukleare Sicherheit auf der AIP23, womit die internationale Mathematiker-Community darauf aufmerksam gemacht wird, dass auch im Strahlenschutz und im Rückbau interessante und anspruchsvolle mathematische Aufgaben zu lösen sind, die bisher noch nicht die Aufmerksamkeit erhalten, die sie verdienen.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S59431 B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: QGRIS - Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie TP: Bildrekonstruktionsverfahren	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 06/2021 bis 05/2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 321.192,00 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Martin Burger	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Martin.burger@uni-hamburg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen über Art und Höhe der Radio-nuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann. Zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der Kontamination sind neuartige Algorithmen der Signalverarbeitung erforderlich, die im Teilprojekt Bildrekonstruktionsverfahren von der Arbeitsgruppe von Prof. Martin Burger an der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) entwickelt werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 2 Simulation, Modellierung

2.1 Konzeptionierung verschiedener Imaging Techniken (6/2021-11/2021)

2.6 Modell- und Algorithmenentwicklung (8/2021-9/2022)

AP 3 Aufbau Messsysteme

3.6 Softwareprogrammierung Bildrekonstruktion (3/2022-11/2022)

AP 4 Labormessungen, Versuchsreihen

4.4 Fertigstellung der Bildrekonstruktions-Software (9/2022-7/2023)

4.5 Datenfusionierung mit Zusatzgeräten (2/2023-8/2023)

AP 5 Test & Validierung unter realen Einsatzbedingungen

5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (8/23-2/24)

AP 6 Workshop & Dokumentation

6.1 wissenschaftliche Bewertung & Dokumentation (1/2024-5/2024)

6.3 Planung, Durchführung, Auswertung Workshop (12/2023-5/2024)

## 6.4 Abschlussbericht (2/2024-5/2024)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Der Schwerpunkt der Arbeiten im 1. Halbjahr 2023 lag auf der Entwicklung der Rekonstruktionssoftware hin zur Praxistauglichkeit (AP 4.4 und Beginn AP 5.3). Die Software wurde auf die Rekonstruktion von Quellen mit folgenden Eigenschaften implementiert und schrittweise erweitert:

- verschiedene Nuklide
- flexible rechteckige, zweidimensionale Oberfläche, auf der die Quellaktivität verteilt ist
- Korrektur von Mehrfachstreu-Events
- flexible Kamerageometrien zum Testen anderer möglicher Setups für Compton Kameras

Ein großer Teil dieser Arbeit zusammen mit den parallel stattfindenden Tests der Rekonstruktionen bestand darin, realistische Gegebenheiten zu berücksichtigen. So wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der HSZG erarbeitet, dass bspw. die Triggerschwellen in den Streudetektoren der Kamera sowie die Behandlung von Koinzidenzen durch Untergrundstrahlung wesentliche Faktoren in der Rekonstruktionsqualität darstellen. Diese und weitere Aspekte zwischen Anwendung und mathematischer Modellierung wurden während eines Aufenthalts beim Projektpartner HSZG in Zittau Anfang Juni 2023 stärker beleuchtet. Einige Lösungsansätze und deren Umsetzung in der Rekonstruktionssoftware wurden erarbeitet und zum Teil bereits umgesetzt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Fokus der Weiterarbeiten wird die weitere Praxistauglichkeit der Software und der eingebetteten Rekonstruktionsberechnung sein. Typische Schwierigkeiten treten bei der Anwendung mit mehreren Nukliden zugleich auf, bei hoher Untergrundaktivität oder niedriger Emissionsenergie.

Der geplante Aufbau der RSL4 Compton Kamera beinhaltet weiter eine Drehung der Kamera während der Messung. Die entstehende Änderung der Compton-Winkel während der Drehung muss bei der Rekonstruktion berücksichtigt werden und das Vorwärtsmodell entsprechend angepasst. Auch die Rekonstruktionssoftware bedarf für die Integration der neuen Kamera einiger Änderungen.

Ein weiterer offener Punkt ist die praktische Umsetzung der Rekonstruktion während der Messung. Die aktuelle Software erlaubt die schnelle Auswertung von Koinzidenzdateien nach einer Messung, die finale Version soll die Rekonstruktion aber live durchführen. Somit muss programmatisch eine Anbindung an die Messsoftware der Kamera geschaffen werden. Auch die Wahl des Rekonstruktionsalgorithmus kann in diesem Zusammenhang noch einmal validiert werden, da die Simultanübertragung von neuen Messwerten während der Messung theoretisch die Anwendung anderer Algorithmen als bisher erlaubt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Zur bidirektionalen Kameraaufbauten und der Berücksichtigung von Mehrfachstreuung in der Rekonstruktion wurde die mathematische Modellierung ausgearbeitet. Diese Arbeiten wurden im Rahmen von Konferenzen/Workshops vorgestellt (bspw. Tomography Workshop, Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach, Mai 2023 sowie Helmholtz Imaging Conference, Hamburg, Juni 2023).

Die mathematische Modellierung der Mehrfachstreuung, ihre Umsetzung in der Rekonstruktion und erste Ergebnisse wurden in Form eines Proceedings-Artikels bei der Zeitschrift PAMM (Proceeding of Applied Mathematics and Mechanics) eingereicht:

M. Burger, S. Jansen, K. Hölzer, T. Kaden, L. Kuger, H. Lösch, S. Petrak, T. Rieger, and T. Schön-muth, 2023. *Multiple Scatter Correction for Single Plane Compton Camera Imaging in Nuclear Decommissioning*. Submitted.

Im Rahmen der Konferenz *Applied Inverse Problems* im September 2023 wird wie im letzten Halbjahresbericht angekündigt von den Projektteilnehmern Lorenz Kuger und Martin Burger (zusammen mit Samuli Siltanen, Universität Helsinki) ein Minisymposium zum Thema Inverse Problem in Nuklearer Sicherheit und Strahlenschutz organisiert. Die Vorträge im Minisymposium werden sich hauptsächlich mit mathematischen Aspekten von Emissionsbildgebung beschäftigen, bspw. mit Compton Kameras oder passiver Gammaemissionstomographie.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hochschule Zittau/Görlitz	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie TP C: Experimentelle Untersuchungen und Simulation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 410.529,18 € (inkl. PP)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Thomas Schönmath	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> T.Schoenmuth@hszg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagen-teilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen mittels Single Plan Compton Camera (SPCC) über Art und Höhe der Radionuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann.

Im Teilprojekt C werden von der Hochschule Zittau/Görlitz experimentelle Untersuchungen und eine Simulation zu den SPCC-Demonstratoren durchgeführt. Die Simulation mit dem Programm FLUKA unterstützt die Planungs- und Entwurfsphase dieser Demonstratoren. Die HSZG stellt Versuchsmatrizen für die geplanten Messungen auf, die anschließend im Labor Strahlentechnik der HSZG durchgeführt und ausgewertet werden. Außerdem soll die HSZG den Projektpartner Hellma bei der Auswahl, dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines für kerntechnische Anlagen geeigneten 3D Laserscanners unterstützen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm (im Berichtszeitraum)

AP 2 Simulation, Modellierung

a. FLUKA Detektor-Simulation (6/2021-7/2022) – **Ergänzungen**

AP 4 Labormessungen, Versuchsreihen

4.3 Durchführung und Auswertung Versuchsreihen HSZG (12/2022-8/2023)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu den APs)

#### Zu AP 2.4

Ergänzend zu den bisher durchgeführten Simulationen wurde der Frage nachgegangen, inwieweit eine Erhöhung der Detektorabstände in der Compton-Kamera sich positiv auf die räumliche Auflösung in der rekonstruierten Intensitätsverteilung auswirkt. Dafür wurden in den Simulationsrechnungen die Abstände der jeweiligen Detektorpaarungen im RSL7 von 12,5 auf 25 cm verdoppelt. Bei gleicher Anzahl von simulierten Gammaphotonen, die von einer Punktquelle abgegeben werden, führt das naturgemäß zu einer geringeren Anzahl von Koinzidenzereignissen in der Compton-Kamera (Anzahl der Koinzidenzereignisse reduziert sich etwa auf ein Viertel).

Die simulierte Punktquelle lässt sich für den Fall doppelter Detektorabstände jedoch deutlich schärfer, d.h. mit einer besseren räumlichen Auflösung rekonstruieren. Es ist zu prüfen, inwieweit sich eine solche Erhöhung der Detektorabstände konstruktiv umsetzen lässt und der Praxis anwendbar ist. Im Rahmen einer aktuell laufenden Masterarbeit werden diese Untersuchungen durch weitere Variationen der Detektoranordnung im RSL7 fortgesetzt.

#### Zu AP 4.3

##### *Energiekalibrierung der Cerbromid-Detektoren*

Für eine möglichst genaue Berechnung des Comptonwinkels aus den gemessenen Energiewerten der Koinzidenzereignisse ist eine exakte Energiekalibrierung der Detektoren essentiell. Wie im Halbjahresbericht 2-2022 beschrieben, zeigt die Kanallage der detektierten Energien eine starke Abhängigkeit von der Temperatur und einen zusätzlichen zeitlichen Drift nach dem Einschalten der Detektoren („Messdauer“). Der Drift kommt durch ein Erwärmen des Photomultipliers zustande, wodurch sich der Verstärkungsfaktor und damit die Kanallage im Spektrum verändert.

Es wurde eine Prozedur zur Energiekalibrierung entwickelt, welche die Detektortemperatur während der Messung sowie den zeitlichen Drift berücksichtigt. Kalibriermessungen wurden im Temperaturbereich zwischen 0...30°C durchgeführt, wobei zunächst bei jeder Temperatur über eine Dauer von 4 Stunden der zeitliche Drift als prozentuale Änderung der Kanallage ermittelt wurde. Der Drift zeigt eine logarithmische Abhängigkeit von der Zeit. Unter der Annahme, dass der Drift nach 4 Stunden Messdauer zu vernachlässigen ist, wurde anschließend die eigentliche Kalibrierfunktion, d.h. die Zuordnung der Energie zu den gemessenen *Charge of Pulse*-Werten (*CoP*) durch ein quadratischen Fit der Messwerte bei der gewählten Temperatur ermittelt:

$$E_{Tm}(\text{keV}) = A_{Tm} * CoP^2 + B_{Tm} * CoP + C_{Tm},$$

der Index  $Tm$  bezeichnet die Messtemperatur;  $A_{Tm}$ ,  $B_{Tm}$  und  $C_{Tm}$  sind die zugehörigen Fitparameter. Für die Kalibrierung wurden die charakteristischen Peaks von vier Nukliden (Na-22, Co-60, Cs-137 und Am-241) verwendet. Betrachtet man die Temperaturabhängigkeit der Fitparameter, so zeigen sich vernachlässigbar geringe Abhängigkeiten von A und C und eine deutlich quadratische Abhängigkeit des Parameters B von der Temperatur. Für die temperaturabhängige Kalibrierfunktion wurden daher die Mittelwerte  $\bar{A}$  bzw.  $\bar{C}$  im betrachteten Temperaturbereich die folgende quadratische Funktion  $B(T)$  verwendet:

$$E(T)(\text{keV}) = \bar{A} * CoP^2 + B(T) * CoP + \bar{C}.$$

Mit Hilfe der temperaturabhängigen Kalibrierfunktion lassen sich Spektren bei beliebigen Temperaturen im Bereich von 0...30°C kalibrieren. Dies ist für die Messung mit einer Cs-137-Quelle bei 30°C in der Klimakammer gezeigt: die charakteristischen Peaks wurden mit hoher Genauigkeit bei den erwarteten Energien gefunden.

Aufbauend auf dieser Kalibrierprozedur wird eine Prozedur für die Kalibrierung der PVT-Dektoren entwickelt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Zu AP 4.3

Die Laborexperimente mit *RSL7* und *RSL2* werden im kommenden Berichtszeitraum abgeschlossen. Gegebenenfalls schließen sich weitere Versuchsreihen mit dem Prototypen der Compton-Kamera *RSL4* an.

Zu AP 5.2 und 5.3

Die HSZG wird sich an Validierungsmessungen beim Projektpartner VKTA (AP 5.2) sowie an der Optimierung des Messsystems, der Messprozeduren und der Software (AP 5.3) beteiligen.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Kaden, T., Rieger, T., Alt, S., Schönmuth, T., Lösch, H., Großmann, K., Jansen, S., Burger, M., Kuger, L., Petrak, S., Hölzer, K.: Kombinierte In-situ-Gammaskopie und Gammakamera für den kerntechnischen Rückbau, 10. Radiochemischer Workshop Dresden-Rosendorf (12.-14.06.2023), **Vortrag**

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9431D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Radiologische Charakterisierung von kerntechnischen Anlagen und Gebäuden mittels kollimationsfreier, richtungsaufgelöster In-situ-Gammaspektrometrie, TP: Qualifizierung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2021 bis 31.05.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 237.501,88 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Gesamtziel des Projektes ist die Entwicklung und Umsetzung eines neuartigen Messverfahrens für die Bewertung des radiologischen Zustands von Gebäuden und kerntechnischen Anlagenteilen im Rahmen der radiologischen Erkundung zur Rückbauplanung und Erfolgskontrolle, der Lenkung/Optimierung einzelner Rückbauschritte sowie der schnellen Erkundung im Rahmen der Gefahrenabwehr (Störfallvorsorge). Durch im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren aufwandsärmer gewonnene Informationen über Art und Höhe der Radionuklide lassen sich radiologische Daten einfacher und umfangreicher gewinnen, mit denen der Rückbau dosis- und kostenoptimiert geplant werden kann. Der VKTA hat hier bereits tiefgründige Erfahrungen bei dem Rückbau des Rossendorfer Forschungsreaktor bis zur grünen Wiese sammeln können. Im Projekt ist der VKTA vorrangig für die Gegenüberstellung von konventionellen Messmethoden mit der zu entwickelnden Methode beteiligt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### AP 1 Planung und Entwurf

1.1 Entwicklung Anforderungs- und Messkonzept (6/2021-11/2021)

1.5 Planung AP 4 und AP 5 (8/2021-11/2021)

### AP 2 Simulation, Modellierung

2.3 Festlegung Nuklidvektoren (8/2021-3/2022)

### AP 5 Test & Validierung unter realen Einsatzbedingungen

5.2 Validierungsmessungen am VKTA (7/2023-2/2024)

5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (9/2023-2/2024)

5.4 Gegenüberstellung mit rückbauerprobten Verfahren (9/2023-2/2024)

### AP 6 Workshop & Dokumentation

6.1 Wissenschaftliche Bewertung & Dokumentation (1/2024-5/2024)

6.2 Qualifizierung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (1/2024-5/2024)

6.3 Planung, Durchführung, Auswertung Workshop (12/2023-4/2024)

6.4 Abschlussbericht (3/2024-5/2024)

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

#### AP 5.2 Validierungsmessungen VKTA

Im Zuge des Projektes fanden erste Validierungsmessungen am VKTA an Testgebinden aus Porenbetonstein mit unterschiedlichen radioaktiven Quellen statt. Bei den eingesetzten Nukliden handelte es sich dabei um monoenergetische sowie polyenergetische Kalibrierstrahler. Dabei wurden sowohl Punkt- als auch Volumenkontaminationen simuliert (Abb. 1).

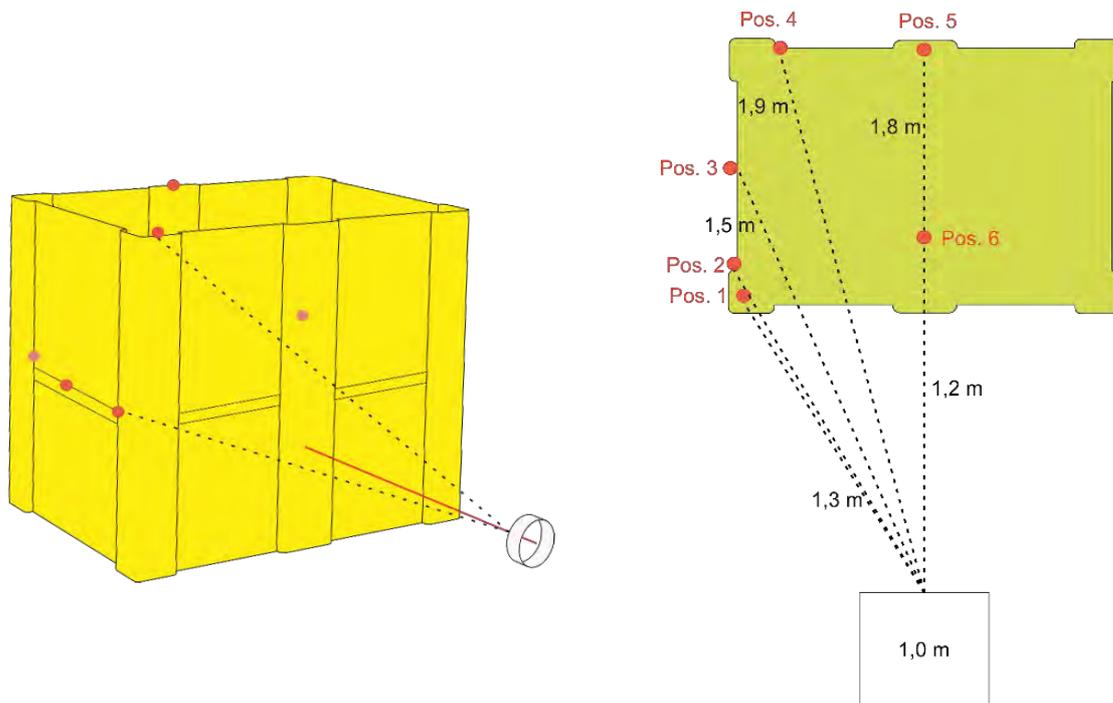


Abb. 1: Darstellung der verschiedenen Quellpositionen am/im Gebinde.

Ziel der Versuche war es, die Leistungsfähigkeit des eingesetzten  $\text{CeBr}_3$  Detektors zu überprüfen und eine Abschätzung des „Sichtfeldes“ zu erhalten. Im Bereich der eingeschränkten Freigabe (Abb. 2 rechts) kann für Cs-137+ eine „Sichttiefe“ von etwa 25 cm in Porenbeton ermittelt werden. Im Bereich der uneingeschränkten Freigabe (Abb. 2 links) zeigt sich, dass hier die Detektion nicht ausreicht, um eine Aussage über die Aktivität zu treffen. Auf eine Rekonstruktion wurde in den Versuchen verzichtet, da hier die Anpassungen des Algorithmus noch nicht abgeschlossen waren.

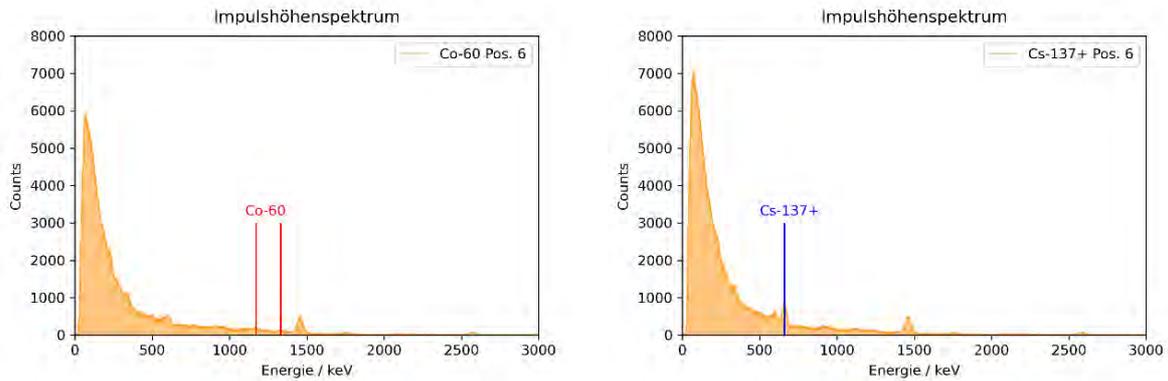


Abb. 2: links: Co-60 Volumenkontamination im Bereich der uneingeschränkten Freigabe (30 kBq), rechts: Eu-152 Volumenkontamination im Bereich der eingeschränkten Freigabe (311 kBq).

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

5.3 Optimierung System, Messprozeduren, Software (9/2023-2/2024)

5.2 Validierungsmessungen am VKTA (7/2023-2/2024)

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

...

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

**Kaden, T., Rieger, T., Alt, S., Schönmath, T., Lösch, H., Großmann, K., Jansen, S., Burger, M., Kuger, L., Petrak, S., Hölzer, K.:** Kombinierte In-situ-Gammaspektrometrie und Gammakamera für den kerntechnischen Rückbau, 10. Radiochemischer Workshop Dresden-Rossendorf (12.-14.06.2023), Vortrag

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9423A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB), Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31, 76131 Karlsruhe	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Nasssiebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen (NAMASK) TP: Durchführung der Versuche mit inaktivem Probenmaterial	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2021 bis 31.12.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 672.256,85 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. S. Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, das aus dem WASS-Schnitt stammende Abfallgemisch (Suspension aus Wasser, inaktiven Abrasivpartikeln und Stahlpartikeln des radioaktiven Stahls) zu trennen. Zuerst wird gesiebt, dann die feine Fraktion abfiltriert und die im Sieb zurückgehaltene grobe Fraktion mit einem Magnetfilter nachbehandelt. Durch den Siebvorgang und die magnetische Abtrennung der Stahlpartikel entsteht ein selektiertes Abrasiv, das der WASS-Anlage für einen erneuten Schnitt wieder zugeführt werden kann. So soll sich der Sekundärabfall um 50-75% reduzieren. Das KIT-TMB und KIT-INE werden den Einsatz von Korrosionsinhibitoren mit anschließender Aufbereitung der Korngemische erproben, um somit das Schneiden ferritischer Stähle zu ermöglichen. Zur Erprobung des MaSK-Verfahrens werden WASS-Schnitte mit ausgewählten nicht radioaktiven austenitischen und ferritischen Stählen durchgeführt. Danach sollen die einzelnen Prozessschritte, Siebung, Filtration und Magnetseparation verbessert werden. Dann werden die Prozessschritte gemeinsam durchgeführt und es wird ermittelt, welche Wiederverwendungsquote erreicht werden kann. Die Versuche mit der Separationsanlage werden am KIT-TMB durchgeführt, so hat bei diesen Versuchen das KIT-TMB die Federführung. Besonders die Verbesserung und Erprobung der einzelnen Prozessschritte werden am KIT-TMB bearbeitet und zur wissenschaftlichen Verwertung genutzt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen
- AP 2: Probenherstellung mit der WASS-Anlage
- AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage
- AP 4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen
- AP 5: Dokumentation der Ergebnisse

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

#### AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage

Die Membranpumpen können nach dem Einbau der Durchflussmesser genauer eingestellt werden, wodurch die Anlage einfacher betrieben werden und die Füllhöhe des Gehäuses präziser eingestellt werden kann.

Es wurden Tests zum Betrieb der Siebkomponente im Überdruck durchgeführt. Dadurch konnte eine höhere Durchflussrate als im Unterdruckbetrieb erreicht werden, allerdings mit stärkerer Pulsation des Suspensionsstroms und einer vergleichsweise geringen Verweilzeit des Siebguts auf dem Siebboden.

Die Extraktion von Feinpartikeln aus dem Siebgehäuse wurde durch den Einbau einer Membran unterhalb des Siebes verbessert. Durch diese Modifikation wird das Feingut direkt entfernt und gelangt nicht in das Siebgehäuse. Durch eine neue Geometrie des Suspensionseinlasses wurden die Durchflussrate und die Verweilzeit des Siebguts erhöht.

Der neu entwickelte kontinuierlich betriebene Magnetfilter wurde von dem händischen Betrieb in den automatisierten Betrieb überführt. Für diesen Magnetfilter ist ein Versuchsstand geplant und aufgebaut worden. Es wurde eine Messmethode entwickelt, mit der man den Abscheidegrad des Magnetfilters bestimmen kann.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

#### AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage

Um die Durchflussrate der Siebkomponente zu bestimmen muss im kontinuierlichen Betrieb eine größere Menge Abrasiv-Stahl-Gemisch behandelt werden.

In weiteren Trennversuchen wird der Siebfehler mittels Siebanalysen des Grobguts bestimmt. Ergänzend werden am KIT-INE chemische Analysen der Fraktionen durchgeführt, um die Stahlkonzentration und den Abscheidegrad zu bestimmen. Anhand der Ergebnisse der Siebanalysen und chemischen Analysen werden die Modifikationen an der Anlage bewertet.

Die Messung zur Bestimmung des Abscheidegrads muss weiter verfeinert werden und es müssen hierfür weitere Trennversuche durchgeführt werden. Mit dem jetzigen Zeitplan sind keine Versuche mit der Abrasiv-Stahl-Mischung von den WASS-Schnitten zeitlich möglich.

Nach jetzigem Zeitplan müsste zudem der Abschlussbericht verfasst werden.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

„Weiterentwicklung eines Separationsverfahrens zur Behandlung des Sekundärabfalls aus der Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidtechnik | Continuously operated separation system for the minimisation of secondary waste produced from the waterjet-abrasive-suspension-cutting“, Paper, Kontec 2023, (Dresden)

Nominierung für Poster bei der NEA Global Forum Rising Stars Workshop in Nuclear Education, Science, Technology and Policy, Massachusetts Institute of Technology, (Cambridge, USA)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9423B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Nass-Siebung und Magnetseparation von Korngemischen zur Minimierung von Sekundärabfällen im Rückbau kerntechnischer Anlagen TP: Durchführung von Versuchen mit radioaktivem Probenmaterial	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2021 bis 31.12.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 692.845,96 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Horst Geckeis	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> horst.geckeis@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ein Verfahren zur Zerlegung eines Reaktordruckbehälters ist das Wasser-Abrasiv-Suspension-Schneidverfahren (WASS), bei dem das Material mit einem speziellen Hochdruckwasserstrahl geschnitten wird. Dieses Verfahren bietet viele technische Vorteile, hat aber den Nachteil zusätzlichen beträchtlichen Sekundärabfalls. Beim WASS-Schnitt von Stahlkomponenten im Rückbau kerntechnischer Anlagen entsteht ein Abfallgemisch aus inaktiven Abrasivpartikeln und radioaktivem Schnittfugenmaterial. Ziel des Vorhabens ist es, das aus WASS-Schnitten stammende Abfallgemisch (Suspension aus Wasser mit inaktiven Abrasivpartikeln und radioaktiven Stahlpartikeln) so zu trennen, dass der Sekundärabfall maßgeblich reduziert werden kann. Das Abfallgemisch wird zunächst gesiebt, dann die feine Fraktion abfiltriert und die im Sieb zurückgehaltene grobe Fraktion mit einem Magnetfilter nachbehandelt (MaSK-Verfahren). Durch den Siebvorgang und die magnetische Abtrennung der Stahlpartikel entsteht ein selektiertes Abrasiv, das der WASS-Anlage für einen erneuten Schnitt wieder zugeführt werden kann. So soll sich der Sekundärabfall um 50-75% reduzieren. Um dieses Verfahren auch für ferritische Stähle anwenden zu können werden Korrosionsinhibitoren erprobt, um die Bildung von Korrosionsprodukten zu verhindern. Zur Erprobung des MaSK-Verfahrens werden WASS-Schnitte mit ausgewählten nicht radioaktiven austenitischen und ferritischen Stählen durchgeführt. Die einzelnen Prozessschritte, Siebung, Filtration und Magnetseparation sollen im Rahmen des Projektes verbessert und bewertet werden. Dann werden die Prozessschritte gemeinsam zur Abtrennung von Korngemischen durchgeführt und es wird ermittelt, welche Wiederverwendungsquote erreicht werden kann. Alle Arbeiten werden gemeinsam von den Verbundpartnern des KIT durchgeführt, wobei die Federführung bei den chemischen Analysen, der Oberflächenanalytik und der Korrosionsinhibition beim INE liegt. Zudem sind Versuche mit radioaktiven Proben im Kontrollbereich des INE vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen
- AP 2: Probenherstellung mit der WASS-Anlage
- AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage
- AP 4: Trennversuche mit radioaktiven Korngemischen

AP 5: Dokumentation der Ergebnisse

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitspaketen)

AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen

In der ersten Hälfte des Jahres 2023 wurden im Anschluss an die Ergebnisse der NMR- und Massenspektrometer-Charakterisierung der im letzten Jahr als wirksamen getesteten kommerziellen Inhibitoren nun reine Verbindungen - hauptsächlich filmbildende Amine - beschafft und als mögliche Korrosionsinhibitoren im neutralen bis leicht alkalischen pH-Bereich untersucht. Die optimale Konzentration jeder Verbindung und die synergistische Wirkung zwischen den Verbindungen wurden durch elektrochemische Analysen ermittelt. Erste Bestrahlungstests wurden mit Cs-137 Quellen im Kalibrierlabor des KIT-SUM durchgeführt, um die Strahlungsbeständigkeit der Inhibitoren zu prüfen. Zu diesem Zweck wurde die Wirksamkeit der Inhibitoren nach der Bestrahlung durch Immersionstests überprüft. Die Bestrahlung wurde, abgestuft in drei verschiedene Größenordnungen, 1 mGy, 100 mGy und 1 Gy gewählt, um den Einfluss ionisierender Strahlung mit zunehmender Dosis auf die Inhibitionseigenschaften der reinen Verbindungen zu untersuchen.

AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage

Durch die Umstellung von einem Batch- zu einem kontinuierlichen Betrieb durch TMB wurden die Entwicklungsarbeiten an den Einzelkomponenten abgeschlossen. Ein neues Magnetfiltersystem wurde in Betrieb genommen (siehe Bericht von KIT-TMB).

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu den Arbeitspaketen)

AP 1: Untersuchungen zur Verwendung von Korrosionsinhibitoren bei ferritischen Stählen

Ausgehend von den Erkenntnissen der Bestrahlungstests im Kalibrierlabor des KIT-SUM sind weitere Bestrahlungsexperimente im Kontrollbereich des KIT-INE geplant, um Korrosionsinhibitoren in Strahlungsumgebungen hochradioaktiver Materialien, wie sie z.B. beim Rückbau auftreten, zu untersuchen. Dazu sollen unter anderem neutronenaktivierte Proben, die als Co-60 Strahlungsquelle fungieren, eingesetzt werden.

Dazu werden Monte-Carlo-Simulation des Strahlungstransports mit dem PENELOPE-Code durchgeführt, um Abschätzungen der zu erwartenden Bestrahlungsdosis (Leitnuklid Co-60) für das radioaktive Korngemisch zu erhalten. Die Simulationsergebnisse werden die Bestrahlungsexperimente im Kontrollbereich ergänzen.

Für die zweite Jahreshälfte sind außerdem theoretische Studien zur Absorption und Inhibition z.B. mittels Methoden der Dichtefunktionaltheorie (DFT) geplant, um theoretische Beschreibungen für das Inhibitionsverhalten der reinen Korrosionsinhibitoren vor und nach einer Bestrahlung zu erlangen.

AP 3: Verbesserung der MaSK-Anlage

Am KIT-TMB werden die Untersuchungen bzw. Berichte zur Verbesserung der MaSK-Anlage bis Anfang 2024 abgeschlossen sein (Ende der Projektlaufzeit am KIT-TMB gemäß Antrag auf kostenneutrale Verlängerung). INE unterstützt weiterhin die Trennversuche am TMB mit analytischen Arbeiten sowie der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

AP 4: Für die verspätete Verfügbarkeit des radioaktiven Korngemischs ist das aktuelle Zeitfenster für die Bereitstellung von ca. November 2023 bis Februar 2024 (Stand März 2023) in Aussicht und liegt damit am Ende des bislang vorgesehenen Projektzeitraums. Daher bietet sich in dieser Hinsicht eine kostenneutrale Projektverlängerung an. Dazu sollen, wenn feststeht, dass das radioaktive Korngemisch am INE verfügbar sein wird, Vorschläge zu vereinfachten Versuchen unterbreitet werden.

Abbruchkriterium: kein Material oder deutlich später verfügbar.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Poster: Corrosion Inhibition of Inactive RPV Steel in Water-Abrasive Suspension (WAS) Cutting Scenario, J. Nwade, F. Becker, D. Schild, M. Plaschke, V. Metz, H. Geckeis (KIT-INE); International Summer School on Experimental Electrochemistry in Warsaw, 22. Juni 2023.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Öko-Institut. Institut für angewandte Ökologie e.V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) - TP: Projektkoordination sowie ökologische und radiologische Bewertungen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 546.386,98 €
<b>Projektleiterin:</b> Dipl. Biol. (t.o.) Angelika Spieth-Achnich	<b>E-Mail-Adresse der Projektleiterin:</b> a.spieth-achtnich@oeko.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotentialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerksbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen.

Ziel des Teilprojektes ist es, eine plan- und termingerechte Bearbeitung aller Arbeitspakete zu gewährleisten.

Weiterhin koordiniert das Öko-Institut inhaltlich die Arbeiten zur Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential und ist zuständig für die umfangreichen Erfassungen der verfügbaren Informationen über Recherchen in Fachliteratur, Interviews bei EnBW sowie Zulieferern.

Schließlich arbeitet das Öko-Institut schwerpunktmäßig zur Ökobilanz, um die Verfahren der Separierung, der Aufbereitung und des Recyclings der relevanten Technologiemetalle im Vergleich zur Primärproduktion umfassend bewerten zu können. Aufbauend auf den Projektergebnissen wird das Öko-Institut unter Berücksichtigung aller radiologischen Szenarien, die der uneingeschränkten Freigabe zugrunde liegen, prüfen und empfehlen, welches Material zum Recycling herausgegeben bzw. uneingeschränkt freigegeben werden kann. Sollte die uneingeschränkte Freigabe nur durch Maßnahmen der Dekontamination oder Einführen prozessualer Schritte wie dem zielgerichteten Entfernen von Gehäuse oder Mantelteilen erreicht werden können, so werden Vorschläge erarbeitet. Abschließend koordiniert das Öko-Institut sämtliche Projektergebnisse zu einer Synopse und skaliert diese anschließend auf sämtliche Kernkraftwerke in Deutschland auf.

In enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern wird für alle betrachteten Anlagenteile eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Kosten und Erlöse gegenüberstellt, durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Das Projekt unter Gesamtkoordination des Öko-Instituts soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential**

#### **AP 1.1: Indizien für hohe Gehalte an Speziallegierungen und Technologiemetallen in Anlagenteilen und Komponenten**

#### **AP 1.2: Einteilung der Komponenten und Materialgruppen nach ihrer Herkunft aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen des Kraftwerks**

Das Öko-Institut koordiniert inhaltlich die Arbeiten in AP 1 und ist zuständig für die umfangreichen Erfassungen der verfügbaren Informationen über Recherchen in Fachliteratur, Interviews bei EnBW sowie Zulieferern.

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2**

#### **AP 2.1: Demontagestudien**

#### **AP 2.2: Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Komponenten**

Das Öko-Institut unterstützt die federführenden Partner für AP 2 bei den Arbeiten.

### **AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts**

#### **AP 3.1: Skizzierung der Verwertung der Materialgruppen und Ableitung Recyclingpotenziale**

### **AP 3.2: Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen**

Das Öko-Institut unterstützt die federführende Electroycling GmbH bei der Ableitung der Recyclingpotentiale sowie der Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen. Zur Durchführung eines Meilensteinworkshops wird das Öko-Institut die Koordination übernehmen und alle Partner entsprechend einbinden.

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung**

#### **AP 4.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

#### **AP 4.2: Ökologische Betrachtung**

#### **AP 4.3: Feststellung notwendiger Optimierungen hinsichtlich Freigabeprozesse**

Die Öko-Bilanz sowie die methodischen Betrachtungen zur Freigabe werden durch das Öko-Institut durchgeführt. Das Öko-Institut unterstützt die TUC bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, indem die optimierten Freigabeprozesse rückgespielt werden.

### **AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland**

Die Forschungspartner verbinden ihre Forschungsergebnisse unter Koordination des Öko-Instituts gemeinsam zu einer Synopse und skalieren diese anschließend auf: Hierbei werden ausgehend von den Ergebnissen aus dem Rückbau der untersuchten Anlagen KKP 1 und KKP 2 entsprechende Hochrechnungen vorgenommen. Es wird dabei bei der Hochrechnung ein konservatives und ein optimistisches Szenario berechnet.

## **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-**

punkten)

Die Inventaraufnahme für interessanten Großkomponenten für KKP 2 sind im Wesentlichen zusammengetragen, für KKP 1 sind die Arbeiten noch nicht vollständig abgeschlossen und werden aktuell fortgeführt (AP 1 und AP 2). Im Mai 2023 wurde eine Forschungsreise zum AKW Zwentendorf in Österreich mit Bezug zu den geplanten Arbeiten durchgeführt. Zu AP 3 wurden bereits zahlreiche Informationen zusammengetragen und ausgewertet. Ein 2-tägiges physisches Projekttreffen in Clausthal (im August 2023) wurde intensiv vorbereitet. Die vorläufigen bisherigen Ergebnisse sollen dort vorgestellt und diskutiert werden, außerdem sollen die in der verbleibenden Projektlaufzeit zu erledigenden Arbeiten geplant und zwischen den Projektpartnern koordiniert werden.

Um den regelmäßigen Austausch zwischen den Projektpartnern sicherzustellen, wurde 14-tägig ein Jour Fixe durchgeführt.

Insgesamt konnte im Berichtszeitraum durch viele parallelaufende Aktivitäten im Vorhaben der zeitliche Rückstand zum Arbeitsplan ein gutes Stück aufgeholt werden.

## **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-**

punkten)

Die Arbeiten AP 1- A 3 sind sehr weit fortgeschritten und werden in Kürze abgeschlossen. Die Arbeiten in AP 4 wurden bereits aufgenommen und werden fortgeführt. Das nächste Projekttreffen wird im August 2023 stattfinden.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Bislang keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Clausthal - Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RecTecKA) TP: Entwicklung von Recyclingstrategien und Identifizierung von ökonomischen Verwertungswegen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 635.516,58 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> daniel.goldmann@tu-clausthal.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotenzialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerkbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen wie z.B. Kobalt, Zinn, Silber, Palladium, Gold und Rhodium. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Dieses Ergebnis stellt einen Fortschritt des Standes der Wissenschaft dar, da solche Untersuchungen bislang nicht stattgefunden haben.

Ziel des Teilprojektes ist eine Erhebung der stofflichen Zusammensetzung der zuvor identifizierten Komponenten und eine anschließende Gehaltsermittlung der enthaltenen Technologiemetalle und Sonderlegierungen mithilfe von Demontagestudien. Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen und Daten werden komplette Demontageverfahren entwickelt. Für ausgewählte werkstofflich interessante Komponenten werden umfassende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung sowie die chemische Analytik durchgeführt. Die bei den Untersuchungen entwickelten Demontage- und Aufbereitungsverfahren werden anschließend mittels einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bewertet und mit den Kosten sowie Erlösen der derzeitigen Entsorgungspraxis verglichen, um die Wirtschaftlichkeit einer umfangreicheren Demontage bzw. Aufbereitung mit dem Ziel der Sondermetallrückgewinnung zu ermitteln. Dafür werden die variablen und fixen Kosten von Demontage, Dekontamination, Aufbereitung und Entsorgung sowie die Erlöse für die Metallfraktionen bzw. Komponenten betrachtet. Diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird in enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern für alle betrachteten Anlagenteile durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt unter Gesamtkoordination des Öko-Instituts soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotenzial**

**AP 1.1: Indizien für hohe Gehalte an Speziallegierungen und Technologiemetallen in Anlagenteilen und Komponenten** (TUC (gemeinsam mit Öl und ECG): Systematische Erfassung der Anlagenteile und Komponenten für weitere Untersuchungen)

**AP 1.2: Einteilung der Komponenten und Materialgruppen nach ihrer Herkunft aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen des Kraftwerks**

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2** (TUC: Koordination)

**AP 2.1: Demontagestudien** (TUC: Ermittlung der Zusammensetzung der Komponenten durch Demontagestudien und Entwicklung kompletter Demontageverfahren)

**AP 2.2: Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Komponenten** (TUC (gemeinsam mit ECG): umfassende Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung ausgewählter, wertstofflich interessanter Komponenten; TUC: chemische Analytik der Bestandteile)

**AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts** (TUC: Unterstützung durch Erfahrung zur Verwertung von Materialgruppen und Ableitung von Recyclingpotenzialen von Technologiemetallen und Speziallegierungen)

### **AP 3.1: Skizzierung der Verwertung der Materialgruppen und Ableitung Recyclingpotenziale**

**AP 3.2: Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen**

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung** (TUC: Koordination)

**AP 4.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung** (TUC: Ermittlung der Wirtschaftlichkeit der ermittelten Demontage-, Vorbehandlungs-, Recyclingverfahren der Komponenten, die Technologiemetalle und Speziallegierungen enthalten, unter Berücksichtigung der Erlöse der Materialfraktionen)

**AP 4.2: Ökologische Betrachtung**

**AP 4.3: Feststellung notwendiger Optimierungen hinsichtlich Freigabeprozesse**

**AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland** (TUC gemeinsam mit allen Projektpartnern: Zusammentragen der Forschungsergebnisse, Erstellung eines Leitfadens für den optimalen Rückbau von KKW mit Bezug zu Technologiemetallen und Speziallegierungen)

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Die zuvor ermittelten Gehalte der Elektro- und Leittechnik wurden zu Komponenten-Obergruppen zusammengefasst. Durch Kommunikation mit den Kraftwerksbetreibern konnte begonnen werden die mengenmäßigen Anteile dieser Obergruppen abzuschätzen. Da eine präzisere Hochrechnung nicht möglich ist, wurden die mengenmäßigen Mittelwerte der Edelmetallgehalte auf die Obergruppen kalkuliert. Nach ersten Abschätzungen beläuft sich der Gesamtgehalt an Gold auf über 1 kg. Trotz teilweise sehr hoher Palladiumgehalte in einzelnen Platinen beläuft sich die Gesamtmasse an Palladium auf einen finanziell insgesamt irrelevanten Wert. Dies kann dadurch erklärt werden, dass Palladium nur sehr vereinzelt in den Platinen vorhanden war. Aktuell steht noch die Anzahlkalkulation der verbleibenden Baugruppen aus.

Die übrigen Elektrobauteile wurden massenmäßig in zwei Kategorien unterteilt. Kleine Bauteile bis 150 g enthalten etwa 30 Massenprozent Metalle und 70 Massenprozent Kunststoffe. Dies kann dadurch erklärt werden, dass hierbei in erster Linie Schalter und Chips enthalten sind. Die Metalle unterteilen sich in erster Linie in Aluminium und Kupfer. Bei größeren Bauteilen zu welchen auch Platinen mit Abdeckungen gehören, beläuft sich der Metallanteil dagegen auf etwa 75 Massenprozent. Auch hierbei sind in erster Linie Aluminium und Kupfer vertreten, allerdings sind auch Fe-Metalle aufgefallen. Die Baugruppen wurden in einem ersten Schritt mit einer Rotorschere zerkleinert und anschließend in einer Hammermühle weiter aufgeschlossen. Die Trennung von Metallen und Kunststoffen erfolgte über einen Zick-Zack-Sichter. Auch für diese Baugruppen soll die Gesamtmasse im Kraftwerk möglichst genau abgeschätzt werden.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Im restlichen Verlauf des Projektes soll die mengenmäßige Abschätzung von Platinen und Elektrobauteilen vorgenommen werden. Hierüber soll am Ende eine Kalkulation aufgestellt werden, welche Menge an Edelmetallen für Platinen und übrigen Metallen für andere Bauteile beim Rückbau der E- und Leittechnik erwartet werden kann. In Zusammenarbeit mit dem Ökoinstitut soll auf dieser Basis eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine.

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Bisher keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> EnBW Energie Baden-Württemberg AG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen (RecTecKA) TP: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 252.582,85 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Rolf Etges	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> r.etges@kk.enbw.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotentialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerksbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen wie z.B. Kobalt, Zinn, Silber, Palladium, Gold und Rhodium. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten.

Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Dieses Ergebnis stellt einen Fortschritt des Standes der Wissenschaft dar, da solche Untersuchungen bislang nicht stattgefunden haben.

Ziel des Teilprojektes ist es, eine plan- und termingerechte Bearbeitung aller Arbeitspakete zu gewährleisten.

Der Tätigkeitsschwerpunkt der EnBW Kernkraft GmbH (EnKK) liegt in der Identifizierung von Bauteilen und Komponenten, die für eine nähere Untersuchung relevant sein könnten. Dies wird sowohl für den Reaktortyp Siedewasserreaktor (SWR, KKP 1) als auch für den Druckwasserreaktor (DWR, KKP 2) durchgeführt. Des Weiteren werden die relevanten Daten zu den Komponenten in Stück- und Werkstofflisten, Datenblättern, Anlagenbeschreibungen etc. recherchiert und zur Verfügung gestellt.

Im Anschluss werden die relevanten Bauteile und Komponenten gesichert und für eine Untersuchung bezüglich ihrer Recyclingfähigkeit und Rückgewinnungspotentials für Technologiemetalle bereitgestellt. Mit Ergebnis der Untersuchungen erfolgt eine Bewertung hinsichtlich des derzeitigen Abbau- und Freigabeprozesses sowie ggf. eine Optimierung der Prozesse.

In enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern wird für alle betrachteten Anlagenteile eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Kosten und Erlöse gegenüberstellt, durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Das Projekt unter Gesamtkoordination des Öko-Instituts soll mit den folgenden fünf Arbeitspaketen durchgeführt werden:

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential**

#### **AP 1.1: Indizien für hohe Gehalte an Speziallegierungen und Technologiemetallen in Anlagenteilen und Komponenten**

#### **AP 1.2: Einteilung der Komponenten und Materialgruppen nach ihrer Herkunft aus Strahlenschutzbereichen und konventionellen Bereichen des Kraftwerks**

Die EnKK organisiert in diesem Arbeitspaket insgesamt die Recherche und Aufnahme der Datengrundlagen des Projektes. Dies geschieht durch eine Reihe von Vor-Ort-Workshops, Begehungen und Archivrecherchen, unterstützt durch das Öko-Institut und die TU Clausthal.

Die EnKK gleicht ihrerseits die vom Öko-Institut erstellten Listen kontinuierlich mit den Daten der in den Anlagen verbauten Bauteilen und Komponenten ab und führt auch eigene Recherchen durch. Dies erfolgt in den technischen Fachbereichen der EnKK einerseits in Einzelarbeit der Fachspezialisten andererseits in Experten-Interviews, die mit Unterstützung des Öko-Instituts durchgeführt werden.

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2**

#### **AP 2.1: Demontagestudien**

#### **AP 2.2: Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von Komponenten**

Die EnKK stellt hierfür Demontagearbeiten in der Anlage vor und stellt Material- oder Komponentenproben zur Verfügung, die freigegeben wurden.

**AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts**

**AP 3.1: Skizzierung der Verwertung der Materialgruppen und Ableitung Recyclingpotenziale**

**AP 3.2: Einteilung der Komponenten mit Technologiemetallen in verwertbare Materialgruppen**

Die EnKK unterstützt die federführenden Partner für AP 3 bei den Arbeiten.

**AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung**

**AP 4.1: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

**AP 4.2: Ökologische Betrachtung**

**AP 4.3: Feststellung notwendiger Optimierungen hinsichtlich Freigabeprozesse**

Die EnKK bringt hier Ihre Sicht und Erfahrung als Anlagenbetreiber ein und berät die übrigen Forschungspartner.

**AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland**

Die Forschungspartner verbinden ihre Forschungsergebnisse unter Koordination des Öko-Instituts gemeinsam zu einer Synopse und skalieren diese anschließend auf: Hierbei werden ausgehend von den Ergebnissen aus dem Rückbau der untersuchten Anlagen KKP 1 und KKP 2 entsprechende Hochrechnungen vorgenommen. Es wird dabei bei der Hochrechnung ein konservatives und ein optimistisches Szenario berechnet.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-  
punkten)

Im 1. Halbjahr 2023 wurden die Arbeiten zu den AP 1.1, AP 1.2 weiter vorangetrieben und ergänzende Informationen und Unterlagen zur Verfügung gestellt. Es wurden spezifische Fragestellungen mit den Fachleuten aus den Fachbereichen erläutert und vorhandene Lücken geschlossen. Der Fokus lag hierbei auf den Bereichen Elektro- und Maschinentechnik. Die entwickelte Systematik zur Nutzung des Anlagenkennzeichens (AKZ) bzw. des Kraftwerkkenzeichnungssystems (KKS) für eine systematische Auswertbarkeit und spätere Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Anlagen wurde fortgeführt.

Im Mai 2023 fand eine Begehung im KKW Zwentendorf (Österreich) statt. Das KKW Zwentendorf ist eine Siedewasseranlage ähnlich der Anlage KKP 1. Jedoch wurde die Anlage nie in Betrieb genommen und bietet daher die Möglichkeit Anlagenbereiche zu begehen, die normalerweise aufgrund von radiologischen Randbedingungen nicht ohne weiteres besichtigt werden können.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Im 3. Quartal findet das nächste Projekttreffen an der TU Clausthal statt.

Darüber hinaus werden die Arbeiten der Arbeitspakete fortgesetzt. Hierbei liegt der wesentliche Fokus auf den Anforderungen aufgrund der Freigabeprozesse, was anhand von konkreten Komponenten erfolgt. Die hierzu bereits ausgewählten Komponenten weisen in unterschiedlichem Umfang interessierende Technologiemetalle auf, so dass am Ende Beispiele für die Kombinationen von Technologiemetallen und Aufwände für die mögliche Freigabe vorliegen.

Mit den vorgenannten Arbeiten liegt auch eine erweiterte Basis für den AP 2 vor, mit der die Bewertung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe oder Herausgabe derart aufbereitet werden kann, um die vorgesehenen Demontagestudien im Rahmen des AP 2.1 zielführend unterstützen zu können.

Des Weiteren werden sich die Arbeiten auf die Bearbeitung der Arbeitspakete 3 und 4, sowie die Berichtserstellung konzentrieren.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9428D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Electrocycling GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Recycling von Technologiemetallen aus dem Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Berücksichtigung strahlenschutzrechtlicher Vorgaben (RectecKA) TP: Identifikation und Bereitstellung von Komponenten zur Untersuchung sowie Integration relevanter Ergebnisse zur Berücksichtigung im Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2021 bis 30.04.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 95.331,38 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Kevin Wille	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Kevin.Wille@electrocycling.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Am Standort Philippsburg mit den beiden Kernkraftwerken Philippsburg Block 1 und 2 werden derzeit Stilllegungs- sowie Rückbautätigkeiten intensiv vorbereitet oder sind bereits im Gange. An diesem Standort wird ein angewandtes Forschungsprojekt durchgeführt, das die Erhebung von Recyclingpotentialen von Technologiemetallen und die Verbesserung der Recyclingpraxis dieser Metalle und Legierungen unter Berücksichtigung der strahlenschutzrechtlichen Freigabe zum Ziel hat. Hauptaugenmerk ist dabei zunächst die Identifikation bzw. die Vorauswahl besonders interessanter Anlagenteile und Komponenten, die im Verlauf des Forschungsvorhabens näher untersucht werden sollen.

Von Interesse sind gemäß den förderpolitischen Zielen des BMBF zum Recycling von wertvollen Metallen hierbei Anlagenteile, in denen aggressive Medien verwendet werden, hohe Drücke und Temperaturen herrschen sowie Mess- und Regelstrecken, Stromleitungen und Komponenten zur Stromumwandlung.

Zur Datenerhebung wird eine umfassende Fachliteraturrecherche im Internet durchgeführt. Außerdem werden Interviews auf der technischen Bearbeitungsebene des Kernkraftwerksbetreibers durchgeführt. Es soll im Weiteren davon ausgegangen werden, dass das zukünftige industrielle Recyclingverfahren im Anschluss an das behördliche Freigabeverfahren nach Strahlenschutzverordnung angeschlossen wird. Die Aufteilung in Bereiche im strahlenschutzrechtlichen Kontext ist aber aus diesen beiden Modellanlagen generalisierbar, was nicht zuletzt das Upscaling der Projektergebnisse ermöglicht.

Es folgen im weiteren Projektablauf die Erhebung der stofflichen Zusammensetzung und eine Erhebung des Inventars an wertvollen Technologiemetallen wie z.B. Kobalt, Zinn, Silber, Palladium, Gold und Rhodium. Es werden umfassende Demontagestudien und Untersuchungen zur mechanischen Aufbereitung von strahlenschutzrechtlich freigegebenen Komponenten durchgeführt, die eine technologische Weiterentwicklung der bestehenden Recyclingpraxis darstellt. Ein wichtiges Projektergebnis wird die Zusammenstellung der Verwertungswege der Materialgruppen sein, die relevante Speziallegierungen und Technologiemetalle enthalten. Dazu gehören die Bestimmung realistischer End-of-Life Recyclingpotenziale und eine Einteilung in verwertbare Materialgruppen. Dieses Ergebnis stellt einen Fortschritt des Standes der Wissenschaft dar, da solche Untersuchungen bislang nicht stattgefunden haben.

Die spezifische Zielsetzung des Teilprojektes der ECG im Projekt besteht größtenteils in der umfassenden Dokumentation und Analyse des vorhandenen Materialbestands, Durchführung entsprechender manueller Demontage, Zerlegungen sowie mechanischer Aufbereitungsversuche und der Erarbeitung von Daten und Informationen hinsichtlich der Charakterisierung und Vermarktung gefundener Materialien.

In enger Abstimmung mit allen beteiligten Partnern wird für alle betrachteten Anlagenteile eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die Kosten und Erlöse gegenüberstellt, durchgeführt. Die Kosten berücksichtigen explizit auch ggf. zu optimierende Freigabeprozesse. Zur Akzeptanz der Projektergebnisse werden zusätzliche radiologische Betrachtungen im Zusammenhang mit der Freigabe durchgeführt. Nicht zuletzt die vollständige Ökobilanzierung rückt das Forschungsergebnis in einen ökologischen und gesellschaftlichen Gesamtkontext. Dies ist wesentlich, da abschließend eine Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Potenzials der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland vorgesehen ist.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

### **AP 1: Identifizierung von Anlagenteilen und Komponenten mit hohem Recyclingpotential**

ECG unterstützt die Partner TUC und Öko-Institut bei der Identifizierung von Anlagenkomponenten bzw. Vorauswahl möglicher Materialquellen aus dem Rückbau. Hier unterstützt die ECG mit Ihrer Kompetenz als Recycler und Erzeuger von Metallfraktionen aus den Recycling von Elektroaltgeräten und solchen Komponenten.

### **AP 2: Inventarerhebung Technologiemetalle KKW Philippsburg 1 und 2**

ECG unterstützt in diesem Teil mit Zerlege- und Aufbereitungsversuchen und arbeitet hier eng mit der TUC. Teilziel in diesem AP ist die Erarbeitung geeigneter Demontage- und Zerkleinerungsschritte zum Materialaufschluss und Erzeugung vermarktungsfähiger Sekundärrohstofffraktionen

### **AP 3: Ermittlung des intrinsischen Materialwerts**

Federführung in diesem AP hat die ECG. Nach Ermittlung geeigneter Verfahren sind die erzeugten Produkte auf ihre Vermarktungsfähigkeit, Materialwert und den Einsatz in geeignete Folgebehandlungsprozesse zu bewerten. Die Bewertung kann sowohl auf der Komponentenebene als auch auf der Ebene erzeugter Fraktionen erfolgen.

### **AP 4: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung**

ECG unterstützt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung mit Informationen aus den einzusetzenden Aufbereitungsprozessen

### **AP 5: Abschätzung ökologisches und ökonomisches Potenzial der Verwertung von Technologiemetallen aus dem Rückbau von KKW in Deutschland**

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Das von der ENBW Kernkraft GmbH gelieferte Material wurde grob in 3 Hauptkategorien sortiert.

1. Leiterplatten
2. Baugruppen mit Leiterplatten
3. Material zur mechanischen Aufbereitung (Schalterschrott)

Hier wurde zunächst ein besonderer Fokus auf die Leiterplatten gelegt. Diese sind bereits von der TU-Clausthal analysiert und von der Electrocycling entsprechend bewertet.

**Ergebnis:** Es zeigte sich, dass einige wenige Leiterplatten überdurchschnittlich hohe Gehalte von Au (Gold) und Pd (Palladium) aufweisen, jedoch über die gesamte Masse betrachtet keinen interessanten finanziellen Wert aufweisen.

In Kooperation mit der TU-Clausthal wurden einige Demontagestudien von Schalteinheiten durchgeführt. Hierbei sollten nicht nur Technologiemetalle, sondern auch verschiedene Legierungen insbesondere Aluminiumlegierungen untersucht werden.

**Ergebnis:** Viele der in der Leittechnik verwendeten Schaltanlagen bestehen aus einem 60% Alugussgehäuse mit einem Si Inhalt von > 10% ( AlSi10 ). Hier sollte im Weiteren geprüft werden, ob bei der derzeitigen Verwertung von Aluminiumschrotten nach Guss und Blech separiert wird, um diese Materialien zielgerichteter einzusetzen.

ECG unterstütze das Öko-Institut bei der Bewertung von Stahlsorten. Die vom Öko-Institut aufgenommen Stahlsorten wurden von der ECG bewertet. Hier bediente sich die ECG der Expertise einiger Verwerter im Edelstahlbereich.

**Ergebnis:** Die Ergebnisse waren zum Teil überraschend positiv. Einige Stahlsorten weisen Preise von > 4.000,00 EUR/t auf. Auch die „niedrigsten“ Preise betragen immerhin ca. 2.000 EUR/t.

In Kooperation mit der TU-Clausthal sind ausgewählte Elektromotoren noch einmal betrachtet. Hier wurden von der TU-Clausthal einige Motorentypen ausgewählt, dokumentiert und von der ECG bewertet.

Da keine Demontagestudie der einzelnen Motore vorgenommen werden konnten, bedient sich ECG der internen Demontagestudien von verschiedenen Motoren.

**Ergebnis:** Die internen Demontagestudien fokussieren sich auf Motore < 250kg/Stück. Hier kann mit einem Materialwert von durchschnittlich 1.000,00 EUR/t gerechnet werden.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im nächsten Arbeitsprogramm sowie restlichen Verlauf des Projektes, unterstützt ECG weiterhin alle Projektpartnern mit der Bewertung von verschiedenen Materialien.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200 733, 80007 München Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Standort Dresden-Klotzsche, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle TP: Weiterentwicklung und Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Fraktionierung des Anodengases	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 957.340,29 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Chem. H.–J. Friedrich	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hans-juergen.friedrich@ikts.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Flüssige organische oder gemischt-wässrige C-14-Abfälle sind nicht endlagerfähig und können daher bislang nur verbrannt werden. Die Kapazitäten hierfür sind begrenzt. Dies ist jedoch nicht für alle solche Abfälle möglich, was zu einem Entsorgungsproblem führt. Entsorgung und Zwischenlagerung solcher Abfälle sind daher mit sehr hohen Kosten verbunden.

Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass auf der Basis der elektrochemischen Totaloxidation ein aussichtsreiches Alternativverfahren etabliert werden kann, das diese Nachteile vermeidet, da das C-14-Inventar unter Volumenreduktion in lagerfähiges C-14-CaCO<sub>3</sub> überführt wird. Das Verfahren soll hierzu weiter optimiert auf dieser Basis ein C-14-Recyclingprozess zur Verringerung des C-14-Umlaufs zu entwickeln und im Pilotmaßstab demonstriert werden. Auf diese Weise soll ein wesentlicher Beitrag zur Lösung eines schwierigen Entsorgungsproblems geleistet werden

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

- AP010 Projektkoordination und Administratives
- AP100 Vorbereitende Arbeiten
- AP200 Optimierung und Weiterentwicklung
- AP300 Entwicklung Steuerungslösung zur Trennung von Anodengasfraktionen und Erprobung neue totzeitarme Methode zur C-14 Messung in Gasen
- AP400 Scale up zur Pilotanlage und Erprobung mit realen Abfalllösungen im Dauerbetrieb und Gewinnung einer mit C-14 hoch angereicherten Gasfraktion für ein C-14-Recycling
- AP500 Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte
- AP600 Fortschreibung Verwertungskonzept

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

- AP010: Das dritte Verbundmeeting wurde einvernehmlich auf das 2. Halbjahr 2023 verschoben. Es wurde ein angepasster Zeitplan für die Bearbeitung erarbeitet und mit den Partnern abgestimmt.
- AP100: Die Beschaffungsverfahren für die zur Bearbeitung erforderlichen Ausrüstungsgegenstände wurden fortgesetzt. Ein Gerät für die chemische Analytik des Anodengases steht seit Ende des Berichtszeitraums zur Verfügung. Es wurden Arbeiten zur Anlagenplanung durchgeführt und apparative Komponenten gefertigt.
- AP200: Aufgrund fehlender apparativer Komponenten pausierten die Arbeiten.
- AP300: Mit der Bearbeitung wurde noch nicht begonnen.
- AP400: Im Berichtszeitraum erfolgten Auslegungs- und Fertigungsarbeiten für den Aufbau des Versuchsstandes.
- AP500: Es erfolgten Literaturrecherchen und methodische Arbeiten zur Verbesserung der Nachweisgrenzen.
- AP600: Im Berichtszeitraum waren hierzu keine Arbeiten vorgesehen.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP010: Die Bearbeitung wird planmäßig fortgesetzt.
- AP100: Die Arbeiten werden fortgesetzt. Der Anlagenaufbau soll im 2. Halbjahr 2023 erfolgen.
- AP200: Die Untersuchungen werden wieder aufgenommen und schrittweise auf weitere relevante chemische Verbindungen ausgedehnt.
- AP300: Mit der Bearbeitung wird im 2. Halbjahr 2023 begonnen.
- AP400: Die Bearbeitung wird fortgesetzt.
- AP500: Es sind weitere methodische Entwicklungsarbeiten vorgesehen, speziell im Hinblick auf die Absenkung der Nachweisgrenzen.
- AP6: Die Bearbeitung erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es sind z.Z. keine für die Bearbeitung relevanten anderen Vorhaben bekannt.

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Ein Vortrag mit ersten Projektergebnissen wurde für die KONTEC 2023 angenommen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 - 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle TP: Weiterentwicklung des Verfahrens zur totzeitarmen C14-Bestimmg. mittels Flüssigszintillation und Untersuchung zur Freimessung von C14-Rückständen nach elektrochem. Behandlung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 - 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 179.459,84 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Flüssige organische oder gemischt wässrige C-14-Abfälle sind nicht endlagerfähig und können daher bislang nur verbrannt werden. Dies ist jedoch nicht für alle Abfälle möglich, was zu einem Entsorgungsproblem führt. Entsorgung und Zwischenlagerung solcher Abfälle sind daher mit sehr hohen Kosten verbunden. Weiterhin sind die Kapazitäten für eine Verbrennung begrenzt.

Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass auf der Basis der elektrochemischen Totaloxidation ein aussichtsreiches Alternativverfahren etabliert werden kann, dass diese Nachteile vermeidet, da das C-14-Inventar unter Volumenreduktion in lagerfähiges C-14-CaCO<sub>3</sub> überführt wird. Das Verfahren soll hierzu weiter optimiert werden, um auf dieser Basis ein C-14-Recyclingprozess zur Verringerung des C-14-Umlaufs zu entwickeln und im Pilotmaßstab zu demonstrieren. Auf diese Weise soll ein wesentlicher Beitrag zur Lösung eines schwierigen Entsorgungsproblems geleistet werden. Durch die langjährige Erfahrung im Bereich der Strahlungsmesstechnik wird sich der VKTA hier bei der Entwicklung einer totzeitarmen C-14 Messmethode beteiligen. Weiterhin sollen die nach der elektrochemischen Totaloxidation anfallenden Reststoffe mittels der am VKTA vorhandenen Freimessanlage sowie Radioanalytik auf eine Freigabe überprüft werden. Die an den VKTA angegliederte Landessammelstelle Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen besitzt für die geplanten Untersuchungen C-14-haltige Reststoffe, welche vor der elektrochem. Totaloxidation vom VKTA hinsichtlich funktioneller Gruppen untersucht werden soll.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 100 Vorbereitende Arbeiten

AP 120 Eduktcharakterisierung (11/2021-05/2022)

AP 300 Entwicklung Steuerungslösung zur Trennung von Anodengasfraktionen und Erprobung neue totzeitarme Methode zur C-14 Messung in Gasen

AP 320 Erprobung/Weiterentwicklung totzeitarme C-14-Messung (11/2021-06/2023)

AP 400 Scale up zur Pilotanlage und Erprobung mit realen Abfalllösungen im Dauerbetrieb und Gewinnung einer mit C-14 hoch angereicherten Gasfraktion für ein C-14-Recycling

AP 410 Scale up zur Pilotanlage (07/2023-03/2024)

AP 500 Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte (laufend)

AP 600 Fortschreibung Verwertungskonzept

AP 610 Verwertungskonzept (08/2024-09/2024)

AP 620 Sicherung des Know-how, wissenschaftliche Verwertung (04-2024-07/2024)

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

AP 120 Eduktcharakterisierung

Für den Projektpartner IUT wurden Proben aus Syntheserückständen mittels GC-MS gemessen. Weiterführend muss entschieden werden, ob sich solche Rückstände für ein Recycling eignen. Dies betrifft sowohl die Mindestaktivität an C-14 als auch die organischen Rückstände.

AP 320 Erprobung/Weiterentwicklung totzeitarme C-14-Messung (11/2021-06/2023)

Die neusten Erkenntnisse zeigen, dass eine Dunkelstromkalibrierung der eingesetzten SiPM geeignet ist, die Hintergrundzählrate deutlich zu reduzieren und somit das Signal-Rausch-Verhältnis weiter zu verbessern. In der Performance der einzelnen SiPM wurden signifikante Unterschiede bis zu einem Faktor von zwei festgestellt, weshalb die Charakterisierung der Bauelemente individuell erfolgen sollte. Der Umstieg auf die neue Messplattform eines neuen Anbieters ist weiterhin im Gange.

### **4. Geplante Weiterarbeit**

Fortführung der oben genannten AP.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> IUT - Institut für Umwelttechnologien GmbH, Justus-von-Liebig-Str. 6, 12489 Berlin.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle TP: Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Isotopentrennung zur Rückgewinnung von C-14	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 148.838,38 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Frau Kirsten Guthmann-Scholz	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> k.guthmann-scholz@iut-berlin.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Flüssige organische oder gemischt-wässrige C-14-Abfälle sind nicht endlagerfähig und können daher bisher nur verbrannt werden. Die Kapazitäten dafür sind begrenzt. Dies ist jedoch nicht für alle Abfälle dieser Art möglich, so dass ein Entsorgungsproblem entsteht. Die Entsorgung und Zwischenlagerung solcher Abfälle ist daher mit sehr hohen Kosten verbunden.

Bisherige Untersuchungen lassen erwarten, dass auf der Basis der elektrochemischen Totaloxidation ein vielversprechendes Alternativverfahren etabliert werden kann, das diese Nachteile vermeidet, da das C-14-Inventar unter Volumenreduktion in lagerfähiges C-14-CaCO<sub>3</sub> überführt wird. Dazu soll das Verfahren weiter optimiert und darauf aufbauend ein C-14-Recyclingprozess zur Reduzierung des C-14-Umlaufs entwickelt und im Pilotmaßstab demonstriert werden. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Lösung eines schwierigen Entsorgungsproblems geleistet werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitspakete, die jeweils aufeinander aufbauen:

AP100: Vorbereitende Arbeiten

AP200: Optimierung und Weiterentwicklung

AP300: Entwicklung Steuerungslösung zur Trennung von Anodengasfraktionen und Erprobung neue totzeitarme Methode zur C-14 Messung in Gasen

AP400: Scale-up zur Pilotanlage und Erprobung mit realen Abfalllösungen im Dauerbetrieb und Gewinnung einer mit C-14 hoch angereicherten Gasfraktion für ein C-14-Recycling

AP500: Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte

AP600: Fortschreibung Verwertungskonzept

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

AP010: Drittes Meeting in Berlin ist geplant für den 07.11.2023 im IUT.

AP200: Planung für vorgezogene Erneuerung der Zu- und Abluftanlagen sowie Renovierungsplanung in 2.7 aktualisiert.

AP300: Die weiterführende Testung des für das Projekt angeschaffte Massenspektrometer hat ergeben, dass es für die Bestimmung der Reinheit und der quantitativen Isotopenzusammensetzung nicht optimal geeignet ist. Die Recherche nach einem geeigneten kommerziellen Massenspektrometer wurde weitergeführt. Erste Gespräche mit Anbietern wurden geführt. Nach bisherigem Stand konnte von keinem Anbieter ein für unsere Problemstellung optimal geeignetes Massenspektrometer im für uns vertretbaren Preissegment angeboten werden. Die Suche wird fortgeführt.

AP400: Eine erste Abstimmung mit IKTS über Größe und Ausstattungsmerkmale der vom IUT bereitzustellenden Handschuhbox steht aus. Eine endgültige Spezifikation der erforderlichen Abmaße und Ausstattung verzögert sich auf Grund von Beschaffungsproblemen und Personalproblemen beim IKTS weiter. Von einem Zeitverzug in der Größenordnung von ca. 1 Jahr ist nach vorliegenden Informationen vom IKTS auszugehen.

Die Erneuerung der Ab- und Zuluftanlage für die Labore im Gebäudeteil 2.7 ist beauftragt und befindet sich in Bearbeitung.

AP500: Es waren keine Arbeiten geplant.

AP600: Eine Patentrecherche ist in Arbeit. Die Kommunikation mit potentiellen Kunden wird fortgeführt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP010: Das nächste Verbundmeeting ist für den 07.11.2023 beim IUT in Berlin geplant.

AP200: Start der Renovierungsarbeiten im Gebäude 2.7 nach Endabstimmung über den Gesamtaufbau und Vorliegen der Anforderungen für Medien und Maße der Handschuhbox seitens IKTS.

AP300: Abschluss der Recherche nach einem geeigneten Massenspektrometer und Beschaffung des erforderlichen Spektrometers.

AP400: Beauftragung und Bau der erforderlichen Handschuhbox für die Elektrolyseeinheit sowie Installation der erforderlichen Medienanschlüsse. Voraussetzung ist der Funktionsnachweis der Gasfraktionierung durch VKTA.

AP500: keine Arbeit geplant.

AP600: Know-how-Absicherung. Wissenschaftliche Verwertung.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Es sind keine für die Bearbeitung relevanten anderen Vorhaben bekannt.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

-keine-

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9441
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Konditionierung von mittelaktiven (ILW) Ionentauscherabfällen aus der Chemischen System Dekontamination...	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2023 bis 31.12.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 100162,92 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Thomas Fishedick	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.Fishedick@framatome.com

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ionentauscherabfälle aus der Chemischen System Dekontamination (CSD, FSD) weisen einerseits eine signifikante höhere radioaktive Beladung auf als gewöhnliche Betriebsionentauscherabfälle und beinhalten bzw. waren zudem mit oxidativen Reagenzien und Komplexbildner aus der CSD in Kontakt. Die Folge ist ein instabiler Zustand (Zersetzung der Ionentauschermatrix, Gasbildung) dieser höher radioaktiven Ionentauscherabfälle, so dass mit Einschränkungen in der Handhabbarkeit bzw. mit Problemen bei der Konditionierung stabiler Behälterinventare zu rechnen ist. Die Zielsetzung des Vorhabens ist es eine neue Konditionierungsmethode inklusive Sicherheitskonzept für mittelaktive Ionentauscherabfälle (ILW) im Industriemaßstab mit Hilfe einer industriellen Kleinanlage zu entwickeln, zu erproben und zu optimieren.

### 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP1: Anlagensicherheit

AP2: Methodenentwicklung und – optimierung

AP3: Immobilisierung der verflüssigten Ionentauscherabfälle in verschiedenen Matrizen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

#### AP1: Anlagensicherheit

Zunächst wurde CSD-Simulationsharz durch inaktive Beladung mit Eisen und Mangan sowie EDTA, Zitronensäure, Oxalsäure und Nicotinsäure hergestellt. In den ersten beiden Versuchen wurden das CSD-Simulationsharz dann in der firmeneigenen Kleinstindustrieanlage (Abbildung 9) mittels Dosierrampe, bzw. konstante Dosierung von Oxidationsmittel zerstört und verflüssigt. Es konnte eine ausreichende Kühlleistung (siehe Abbildung 7: Benötigte Kühlrate (schwarz) versus maximal mögliche Kühlrate (rot) bei einer Dosierrampe) sowohl für die Dosierrampe als für die konstante Dosierung nachgewiesen werden. In Abbildung 6 ist der Verlauf der Kühlleistung (orange), das Dosierprofil von H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sowie die daraus resultierende abgeführte Energie dargestellt.

In einem weiteren Versuch wurde erprobt, ob durch eine prozesstechnische sinnvolle Konzentrationsbeschränkung des Oxidationsmittels, die maximal freiwerdende Energie zuverlässig aufgenommen werden kann, um bei Störfällen (z.B. Ausfall der Kühlung) jeglicher Art ein stabiles inhärent sicheres System nachweisen zu können. Die automatische Kühlung des Systems wurde dazu deaktiviert. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass es beim gesetzten  $H_2O_2$ -Grenzwert zu einem Temperaturanstieg um 14,8 %-Punkte auf 75,6 % der maximal zugelassenen Temperatur im System kam. Ein 2,5fach höherer Grenzwert führte zu einem Temperaturanstieg um 27,8 %-Punkte auf ca. 90 % der maximal zugelassenen Temperatur bevor durch Kühlmaßnahmen diese Grenzwerttestung aufgrund von Sicherheitsaspekten abgebrochen wurde. Somit konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist durch Begrenzung der  $H_2O_2$ -Konzentration sicherzustellen, dass das System auch bei einem Ausfall der Kühlung nicht überhitzt.

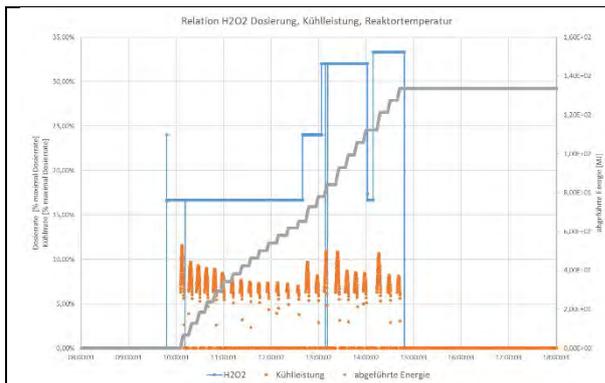


Abbildung 6 Übersicht Kühlleistung während  $H_2O_2$  – Dosierung (Dosierrampe)

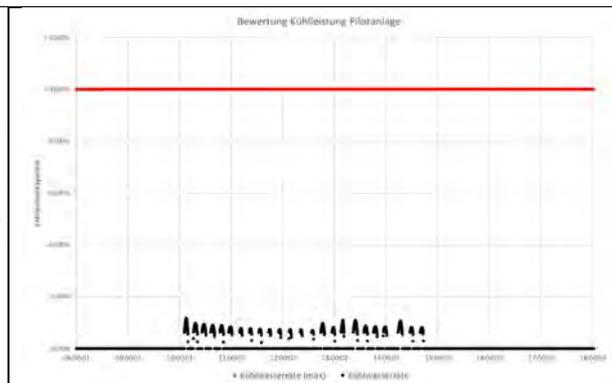


Abbildung 7: Vergleich benötigte Kühlleistung vs. Maximale Kühlleistung (Dosierrampe)

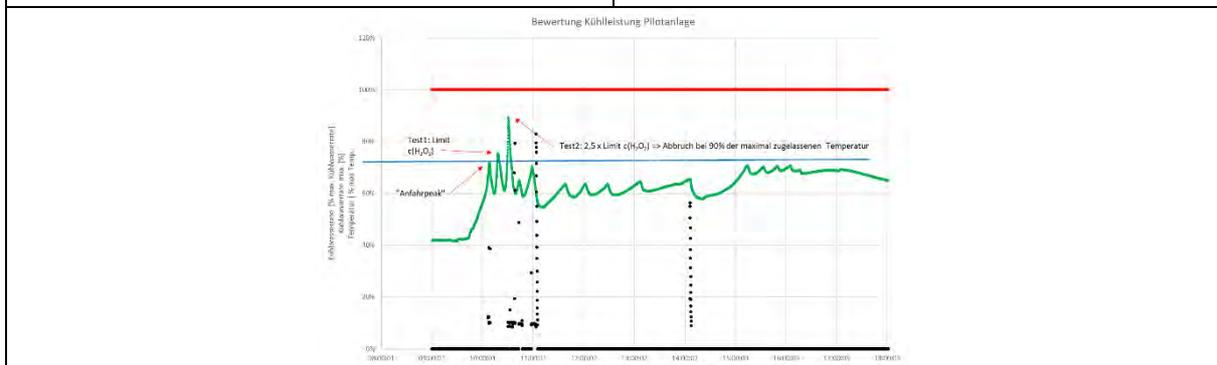


Abbildung 8: Testung Sicherheitskriterium  $H_2O_2$ -Konzentration



Abbildung 9 Kleine Industrieanlage

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP2: Methodenentwicklung und- optimierung

AP3: Immobilisierung der verflüssigten Ionentauscherabfälle in verschiedenen Matrizen

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023		<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9442
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hochschule Mannheim		
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Charakterisierung und Dekontamination von i-Grafiten (i-GraDe)		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2023 bis 31.10.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.600.524,03 €	
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Lotte Lens	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> l.lens@hs-mannheim.de	

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Auf Grundlage von Vorarbeiten, sollen vielversprechende Verfahren der thermochemischen Behandlung von i-Grafiten fertig gestellt werden. Darüber hinaus wird als innovativer Ansatz die Extraktion von Radionukliden mit superkritischen Lösungsmitteln untersucht werden. Voraussetzung für diese Untersuchungen ist allerdings die ausreichend gute Charakterisierung vorhandener bestrahlter Grafite bzgl. ihrer Radionuklidinventare und Homogenität. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Anteil leicht flüchtigen Radiokohlenstoffs ( $^{14}\text{C}$ ). Damit kann eine Vorauswahl von Materialien getroffen werden, die möglicherweise direkt freigebbar oder ohne weitere Behandlung einlagerbar sind. Bei einem sehr geringen Anteil an flüchtigem  $^{14}\text{C}$  in der Grafitmatrix könnte das Abfallvolumen an Grafit im Endlager Konrad signifikant optimiert werden. Alle anderen Anteile müssen nach einer Klassifizierung auf ihre Dekontaminierbarkeit untersucht werden.

Das Projekt setzt während des gesamten Verlaufs auf die enge Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern sowie Partnern des aufzubauenden innerdeutschen Netzwerks. Wir beabsichtigen die Teilnahme an neu entstehenden Projekten im Bereich bestrahlter Reaktorgrafite sowohl auf nationaler wie auch auf internationaler Ebene.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Ausgehend von einer Bestandsaufnahme und Probenahmestrategie werden Proben unbestrahlter wie bestrahlter Reaktorgrafite ausführlich radiologisch charakterisiert, eine mögliche Klassifizierung dieser vorgenommen und auf ihre Dekontaminierbarkeit mittels thermischer Verfahren und superkritische Extraktion hin untersucht. Die Methoden werden bezüglich ihrer Dekontaminations-Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit verglichen und bewertet. Die meist versprechende Methode, wird auf ihre Skalierbarkeit geprüft. Das gesamte Projekt ist aufgeteilt in die folgenden acht Arbeitspakete: 1) Informationsbeschaffung, 2) Beschaffung, 3) Charakterisierung bestrahlter und unbestrahlter Grafitproben, 4) Inbetriebnahmen, 5) Erprobung der Verfahren, 6) Betrachtung der Zulassungsfähigkeit, 7) Abfallprodukte, 8) Bewertung und Skalierbarkeit.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Der Projektbeginn war am ersten Juni.

Die Einstellung der Projektleitung, sowie eines Doktoranden wurden vorgenommen. Wie im Arbeitspaket 1 beschrieben, hat die Einarbeitung in die Thematik mit Literaturrecherche begonnen. In der Zwischenzeit hat die Leitung des TRIGA Forschungsreaktors an der Universität Mainz großes Interesse an einer Kooperation geäußert. Ein erstes Treffen wird noch in diesem Monat stattfinden.

Die zweite Doktoranden-Stelle wurde ebenfalls bereits vergeben. Die Doktorandin wird nach Ihrem Masterabschluss im September, ab Oktober in das Projekt einsteigen. Zur Unterstützung bei der Literaturrecherche und Inbetriebnahme von Geräten (Arbeitspaket 4), wurde eine studentische Hilfskraft eingestellt. Erste Vorarbeiten für die Inbetriebnahme des bereits an der Hochschule Mannheim vorhandenen Hochtemperaturofens wurden durchgeführt.

Die im Arbeitspaket 2 aufgeführten Investitionen: Oxidizer, SCFE Anlage, Humidity Gas Generator sowie ein Autoradiographiegerät wurden bestellt. Wir erwarten die ersten Lieferungen im September.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

In diesem Sommer sollen erste Treffen mit dem Forschungszentrum Jülich stattfinden, um Informationen zu erhalten bezüglich der Grafitbestände, sodass Probenahmestrategien entwickelt werden können. Des Weiteren soll ein Netzwerktreffen mit anderen geförderten bei der KONTEC Konferenz in Dresden organisiert werden. Diese Arbeitspunkte sind Bestandteile von Arbeitspaket 1.

Sobald die Großgeräte geliefert werden, fangen wir mit der Inbetriebnahme an. Hierbei sollen zunächst erste Tests mit unbestrahlten Grafiten durchgeführt werden (Arbeitspaket 2 & 4). Zur Charakterisierung von Grafitproben müssen wir noch die Verbrauchsmaterialien besorgen. Diese werden in den nächsten Monaten angeschafft, um zügig dieses Arbeitspaket beginnen zu können.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Hierüber können wir erst nach dem ersten Netzwerktreffen mit anderen Interessierten geförderten Personen und Einrichtungen eine nähere Aussage treffen

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Zu diesem Zeitpunkt gibt es noch keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH (Framatome)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Virtual REmote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) TP: Intuitive VR/AV Multi-Robotersteuerung für ein anwendungsnahes Rückbauszenario	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 462.296,53 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Sebastian Kohn	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> virero@framatome.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) haben sich zum Ziel gesetzt, eine ortsflexible modulare robotergestützte Sortieranlage für die teleoperierte Konditionierung radioaktiver Abfälle zum Zweck der volumenoptimierten Verpackung und Beprobung zu entwickeln.

Innerhalb des Projektes werden Robotersysteme und radiologische Messverfahren entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklid-spezifisch zu charakterisieren und zu sortieren. Die Zielstellung der Technologieentwicklung reicht von der Zerlegung und Sortierung von Betriebsabfällen mit hoher Dosisleistung, wie Filterkerzen und Beutelfiltern, über die Nachkonditionierung verpackter radioaktiver Abfälle, bis zu einer radiologischen Sortierung für ein optimiertes Freigabeverfahren. Konventionelle Systeme weisen eine geringe Flexibilität bezüglich einer Adaption an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Aktivitätsklassen auf. Das Aufbrechen und Zerteilen verpackter Abfälle sowie der hochindividuelle Teilecharakter stellen diese Systeme vor Herausforderungen. Die Verwendung von Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation birgt Potenzial die beschriebenen Herausforderungen zu lösen.

Projektziel ist die Erschließung einer adaptiven, aufgabengerechten Teleoperation für das kerntechnische Umfeld. Erforderlich hierfür sind die Entwicklung und Fusionierung einer radiologischen und räumlichen Charakterisierung der Reststoffe. Autonome, mitlernende Systemfähigkeiten dienen dazu, sukzessiv die von Operatoren durchgeführten Aufgaben zu reduzieren. Der Arbeitsschutz wird verbessert, da während der Handhabung und Sortierung das Personal keine Strahlenexposition erfährt.

Der Tätigkeitsschwerpunkt seitens Framatome liegt in der Befähigung von Robotertechnologien zur effizienten Nachkonditionierung. Hierfür stehen neben einem adaptiven System, eine exakte Umgebungserfassung und -repräsentation sowie eine intuitive Bedienbarkeit im Fokus.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabenbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in 5 Arbeitspakete (AP): AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“.

In AP1a) ist Framatome gemeinsam mit dem FAPS verantwortlich für Planung und Aufbau der Versuchsanlage zur räumlichen Charakterisierung. Außerdem ist Framatome in AP1b) zuständig für die gemeinsame Funktionsintegration der Teilergebnisse in die Versuchsanlage. In AP1c) wird federführend durch Framatome gemeinsam mit den Partnern eine abschließende Bewertung des Gesamtvorhabens durchgeführt. Framatome ist hauptverantwortlich für AP2, indem die Verfügbarkeit von Basisfähigkeiten und deren Erweiterung im Fokus stehen. Dies beinhaltet in AP2a) die Steigerung der Genauigkeit der Punktwolken und die vollständige Umgebungspräsentation in der VR. In AP2b) entwickelt Framatome mit dem FAPS eine interoperable Bewegungssteuerung und implementiert eine Echtzeit-Kollisionsvermeidung der beteiligten Roboter. Eine benutzerfreundliche VR-Schnittstelle zur Steuerung autonomer Roboterfunktionen wird in AP2c) erarbeitet und die Entwicklung einer Simultanteleoperation mehrerer Roboter wird in AP2d) adressiert. In AP4 ist Framatome gemeinsam mit dem AiNT und dem FAPS verantwortlich für die räumliche Teile-Charakterisierung und deren finale Fusion zum digitalen Teilezwilling.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Die in AP2b) entwickelte interoperable Bewegungssteuerung und Echtzeit-Kollisionsvermeidung der beteiligten Roboter wurden finalisiert. Bei der Echtzeit-Kollisionskontrolle wurde basierend auf einem Optimierungsalgorithmus eine eigene Lösung seitens Framatome entwickelt, die es ermöglicht die durch den Operator bzw. die Operatorin fernhantiert induzierten Bewegung der teleoperierten Roboter vorrausschauend vor deren tatsächlicher Bewegung zu erfassen und damit sicherstellen, dass diese Bewegung kollisionsfrei möglich ist. Darüber hinaus ermöglicht die Kopplung mit der interoperablen Bewegungssteuerung noch eine robustere Bedienung als ohne deren Kopplung, womit auch Singularitäten und damit Stillstände vermieden werden, welche seitens Framatome getestet und validiert wurde.

Ergänzend zu AP2, als gesamtes Arbeitspaket, ist die finale Integration und Testung der linearen Achse (mit beweglicher Kamera) am FAPS Versuchsstand zugunsten der alternativen Nutzung des Stäubli-Roboters vernachlässigt worden. Letztere Lösung hat sich nach ausgiebigen Tests als zielorientierter zur Optimierung der Blickrichtung einer Operatorin bzw. eines Operators innerhalb der VR-Umgebung dargestellt. Nichtsdestotrotz kann die Lineare Achse für weitere Studien verwendet werden.

Der für die Zusammenführung beider Versuchsstände gemäß AP1c) alternativ angedachte „Mock-Up“ wurde als Lösung ausgewählt. Im Ergebnis verbleibt also der von AiNT entwickelte Messtisch zur radiologischen Charakterisierung im Rahmen des VIRERO Projekts in Stolberg. Der „Mock-Up“ des radiologischen Messtisches wurde seitens FAPS an der Sortier-Versuchsanlage weitestgehend abgeschlossen, so dass dem primären Ziel am Ende der Projektlaufzeit einen funktionstüchtigen Prototyp demonstrieren zu können keine größeren Hürden im Weg stehen.

Im April fand ein Projekttreffen aller Projektpartner erstmals wieder in Präsenz statt. Aktuelle Ergebnisse konnten ausgetauscht werden und da das Treffen erstmals in Stolberg beim Projektpartner AiNT stattfand, konnte auch die radiologische Charakterisierungsanlage besichtigt

werden. Ziel des Treffens war eine finale Abstimmung zur Erreichung der Meilensteine, insbesondere von AP4, die finale Fusion des digitalen Teilezwillings. Unter Beteiligung aller Projektpartner wird dieses Ziel bis zum Ende der Projektlaufzeit anvisiert.

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Um die in AP1c) federführend durch Framatome gemeinsam mit den Partnern abschließende Bewertung des Gesamtvorhabens durchzuführen, werden radiologische Tests einzelner Komponenten durchgeführt, wie im vorherigen Halbjahresbericht ausführlicher beschrieben. Diese radiologischen Tests, Gamma-Strahlung, dienen als Ergänzung für den Abschluss von AP1c) und sind für die kommenden Wochen geplant. Insbesondere für Bewertung hinsichtlich der Robustheit der Technologie sind diese Tests von besonderer Bedeutung.

Die in AP2b) entwickelte interoperable Bewegungssteuerung wird noch zusammen mit der Echtzeit-Kollisionsvermeidung der beteiligten Roboter an der Sortier-Versuchsanlage des FAPS ausführlich getestet, da eine Übertragung auf die Versuchsanlage am FAPS ist noch nicht ganz abgeschlossen ist und dementsprechend die finalen Tests und deren Validierung an der Sortier-Versuchsanlage noch ausstehen.

Die in AP4 räumliche Teile-Charakterisierung und deren finale Fusion zum digitalen Teilezwilling wird für den finalen Projektverlauf finalisiert. Dementsprechend ist eine Validierung und Bewertung des Teilezwillings in der letzten Phase des Projektes geplant.

Außerdem ist nach Abschluss aller Meilensteine hinsichtlich eines funktionsfähigen VIRERO Prototyps ein abschließendes Projekttreffen geplant, um die erreichten Ergebnisse zu bewerten und das weitere Vorgehen mit allen Projektpartnern hoffentlich wieder in Präsenz genauer abzustimmen – v.a. hinsichtlich der weiteren Verwertung der Ergebnisse.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Ein Bezug zu ROBDEKON (BMBF 13N14675) ist vorhanden. Seit Projektstart haben sich aber keine Änderungen gegenüber der Antragstellung ergeben. Die Verbundpartner werden an öffentlichen Veranstaltungen zu ROBDEKON, soweit sie stattfinden, teilnehmen und die Publikationen seitens ROBDEKON beachten.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

KONTEC 23 Paper – Zur Veröffentlichung angenommen:

B. Fu, B. Haake, **C. Helmes**, J. Lin, K. Wlasak, S. Kohn, O. Sommer, A. Weber, M. Eder, F. Querfurth, A. N. Muhamad, J. Franke, **S. Reitelshöfer**; Robotergestützte Sortierung radioaktiver Abfälle zwecks volumenoptimierter Konditionierung – VIRERO

Link zum Abstrakt: [https://eventclass.org/contxt\\_kontec2023/scientific/online-program/session?s=PL-03a#e42](https://eventclass.org/contxt_kontec2023/scientific/online-program/session?s=PL-03a#e42)

Webinar LinkedIn; A. Weber; VIRERO; Link:

[https://www.linkedin.com/posts/framatome\\_nuclear-digital-solutions-activity-7039170838935261184-3jck?utm\\_source=share&utm\\_medium=member\\_desktop](https://www.linkedin.com/posts/framatome_nuclear-digital-solutions-activity-7039170838935261184-3jck?utm_source=share&utm_medium=member_desktop)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Virtual REmote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) TP: Ortsaufgelöste radiologische Charakterisierung zur Sortierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 301.960,83 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Christopher Helmes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> helmes@nuclear-training.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) haben sich zum Ziel gesetzt, eine ortsflexible modulare robotergestützte Sortieranlage für die teleoperierte Konditionierung radioaktiver Abfälle zum Zweck der volumenoptimierten Verpackung und Beprobung zu entwickeln.

Innerhalb des Projektes werden Robotersysteme und radiologische Messverfahren entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklid-spezifisch zu charakterisieren und zu sortieren. Die Zielstellung der Technologieentwicklung reicht von der Zerlegung und Sortierung von Betriebsabfällen mit hoher Dosisleistung, wie Filterkerzen und Beutelfiltern, über die Nachkonditionierung verpackter radioaktiver Abfälle, bis zu einer radiologischen Sortierung für ein optimiertes Freigabeverfahren. Konventionelle Systeme weisen eine geringe Flexibilität bezüglich einer Adaption an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Aktivitätsklassen auf. Das Aufbrechen und Zerteilen verpackter Abfälle sowie der hochindividuelle Teilecharakter stellen diese Systeme vor Herausforderungen. Die Verwendung von Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation birgt das Potenzial die beschriebenen Herausforderungen zu lösen.

Projektziel ist die Erschließung einer adaptiven, aufgabengerechten Teleoperation für das kerntechnische Umfeld. Erforderlich hierfür sind die Entwicklung und Fusionierung einer radiologischen und räumlichen Charakterisierung der Reststoffe. Autonome, mitlernende Systemfähigkeiten dienen dazu, sukzessiv die von Operatoren durchgeführten Aufgaben zu reduzieren. Der Arbeitsschutz wird verbessert, da während der Handhabung und Sortierung das Personal keine Strahlenexposition erfährt.

Der Entwicklungsschwerpunkt der AiNT ist die Entwicklung und Erforschung von automatisierten Verfahren der Aktivitätsbestimmung basierend auf der Fusion der räumlichen und radiologischen Charakterisierung der zu sortierenden Reststoffe oder Abfälle. Hierbei ermöglicht der Einsatz von ODL-Messsonden, Szintillationsdetektoren und Halbleiterdetektoren eine Charakterisierung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Reststoffen bis hin zu Hochdosisleistungsabfällen. Die entwickelten Messverfahren sind insbesondere dafür geeignet Hot-Spots in radioaktiven Abfällen ortsaufgelöst zu detektieren, radionuklid-spezifisch zu charakterisieren und robotergestützt zu separieren.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabensbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in 5 Arbeitspakete: AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“.

In Q3/2022 wurde ein Aufstockungsantrag zu VIRERO, „VIRERO-Kompakt“, bewilligt. Hierdurch wurde das Arbeitsprogramm um das AP6 „Aus- und Fortbildungsprogramm KOMPAKT“ erweitert.

Im Rahmen des Projekts ist AiNT für AP3 der Vorhabensbeschreibung „Radiologische Charakterisierung“ allein verantwortlich. In Unterarbeitspaket 3a) werden die Messanlage geplant und errichtet sowie die Detektoren für die Aktivitätsrekonstruktion modelliert. Unterarbeitspaket 3b) beinhaltet, die Messanlage für die radiologische Charakterisierung in Betrieb zu setzen, zu kalibrieren und den Testbetrieb. Unterarbeitspaket 3c) umfasst die Softwareentwicklung für die automatisierte Steuerung der Messanlage, wozu auch die Entwicklung der orts aufgelöste Aktivitätsrekonstruktion gehört.

Zusätzlich ist die AiNT in Arbeitspaket AP4b) „Datenfusion und Zwilling“ gemeinsam mit dem FAPS eingebunden. In AP6 ist AiNT verantwortlich für die Koordinierung des Partnerverbunds für das Aus- und Fortbildungsprogramm, die Durchführung von Fortbildungen, die Vermittlung von Trainees an Verbundpartner in Praktika und die Evaluation der Aus- und Fortbildungsmaßnahmen.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

### AP3b) Kalibrierung & Testbetrieb

In dem Arbeitspaket AP3b) wurde die prototypische Aktivitätsrekonstruktion, welche in AP3c) entwickelt wurde weiter getestet. Hierzu wurden zunächst automatisiert weitere Messungen mit dem HPGe-Detektor durchgeführt. Als Messgut kamen jeweils eine und zwei Punktquellen, sowie zwei unterschiedliche Volumenquellen zum Einsatz. In einer weiteren Konfiguration wurde eine durch Metallrohre verdeckte Punktquelle gemessen. Die Messkonfigurationen für die Volumenquellen und die verdeckte Punktquelle wurden außerdem mit dem 3D-Laserscanner geometrisch charakterisiert. Für die Messungen wurden Messzeit, Kollimatordurchmesser und, für die Messungen mit zwei Punktquellen, der Abstand zwischen den Punktquellen variiert. Die Ergebnisse der Aktivitätsrekonstruktion zeigen zum Teil noch Unterschätzungen der tatsächlich vorhandenen Aktivität. Allerdings wurde auch noch keine Unsicherheitsquantifizierung der rekonstruierten Aktivitäten vorgenommen.

### AP3c) Softwareentwicklung

Der für die 3D-Punktwolken benötigte Speicher in der Datenbank stellte sich als zu groß heraus. Aus diesem Grund wurde die Software für die Aufnahme und Konsolidation der 3D-Punktwolken überarbeitet. Hierbei konnte der benötigte Speicherplatz um mehrere Größenordnungen reduziert und die Dauer für das Postprocessing der Punktwolke erheblich reduziert werden.

Die Entwicklung Aktivitätsrekonstruktion wurde fortgesetzt. Unter, bisher, noch manueller Eingabe der Volumeninformation für die Reststoffe auf dem Messtisch, kann die Aktivitätsrekonstruktion mittels des NNLS-Verfahrens durchgeführt werden. Die Implementierung der automatischen Generierung der benötigten Volumeninformationen aus den 3D-Punktwolken für die Aktivitätsrekonstruktion wurde ebenfalls aufgenommen.

#### **AP4b) Datenfusion & Zwilling**

Nach Rücksprache mit dem Projektpartner FAPS zu einer rein digitalen Fusion der beiden Versuchsstände wurden zwei identische Sätze à 3 typischen metallischen Reststoffteilen angefertigt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit**

##### **AP3b) Kalibrierung & Testbetrieb**

Mit dem Geiger-Müller-Zählrohr werden analog zu den anderen Detektoren Versuchsreihen durchgeführt.

##### **AP3c) Softwareentwicklung**

Die geplante Erweiterung der Software für die Bestimmung der Photopeakeffizienzen um Szintillationsdetektoren wird zunächst zurückgestellt. Die Visualisierung der rekonstruierten Radioaktivität wird implementiert. Die überarbeitete Software zum 3D-Laserscanning wird in die bestehende Steuerungssoftware der Anlage eingebunden.

Die Implementierung der automatischen Generierung der Volumenquellen wird fortgeführt. Nach erfolgreichen Tests wird diese an die Software zur Aktivitätsrekonstruktion angebunden. Zusätzlich erfolgt die Anbindung der Aktivitätsrekonstruktion an die Datenbank.

##### **AP4b) Datenfusion & Zwilling**

Die Übergabe eines Satzes der metallischen Reststoffteile an das FAPS wird durchgeführt.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Im Rahmen weiterer F&E-Projekte, wie beispielsweise dem FORKA-Projekt QUANTOM® (Förderkennzeichen: 15S9406B) hat AiNT bereits Expertise bzgl. nuklearphysikalischer Simulationen und der Aktivitätsrekonstruktion erworben. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung von VIRERO ein.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

„Documentation of the measurement campaigns in the R&D project VIRERO and validation of the measurement procedure for spatially resolved activity reconstruction“, Master thesis, J. Lin, FH Aachen

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Vlrtual REmote RObotics for Radiometrie Sorting (VIRERO), TP: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 654.221,30 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> joerg.franke@faps.fau.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) haben sich zum Ziel gesetzt, eine ortsflexible modulare robotergestützte Sortieranlage für die teleoperierte Konditionierung radioaktiver Abfälle zum Zweck der volumenoptimierten Verpackung und Beprobung zu entwickeln.

Innerhalb des Projektes werden Robotersysteme und radiologische Messverfahren entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklid-spezifisch zu charakterisieren und zu sortieren. Die Zielstellung der Technologieentwicklung reicht von der Zerlegung und Sortierung von Betriebsabfällen mit hoher Dosisleistung, wie Filterkerzen und Beutelfiltern, über die Nachkonditionierung verpackter radioaktiver Abfälle, bis zu einer radiologischen Sortierung für ein optimiertes Freigabeverfahren. Konventionelle Systeme weisen eine geringe Flexibilität bezüglich einer Adaption an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Aktivitätsklassen auf. Das Aufbrechen und Zerteilen verpackter Abfälle sowie der hochindividuelle Teilecharakter stellen diese Systeme vor Herausforderungen. Die Verwendung von Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation birgt das Potenzial die beschriebenen Herausforderungen zu lösen.

Projektziel ist die Erschließung einer adaptiven, aufgabengerechten Teleoperation für das kerntechnische Umfeld. Erforderlich hierfür sind die Entwicklung und Fusionierung einer radiologischen und räumlichen Charakterisierung der Reststoffe. Autonome, mitlernende Systemfähigkeiten dienen dazu, sukzessiv die von Operatoren durchgeführten Aufgaben zu reduzieren. Der Arbeitsschutz wird verbessert, da während der Handhabung und Sortierung das Personal keine Strahlenexposition erfährt.

Die Entwicklung der robotergestützten Sortieranlage, des immersiven und lernfähigen Teleoperationssystems, die räumliche Charakterisierung hochindividueller Handhabungsobjekte sowie autonome Roboterfähigkeiten zur Handhabung und Sortierung der Abfallteile liegen im Forschungsfokus des Lehrstuhls FAPS.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabenbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in fünf Arbeitspakete (AP): AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“. Der Lehrstuhl FAPS ist dabei wie folgt in die F&E-Arbeiten des Gesamtvorhabens involviert:

AP1 (a) bis (c): Planung, Aufbau und Optimierung der Versuchsanlage

AP2 (b): Interoperable Fernsteuerung und Kollisionsvermeidung der Roboter

AP4 (a) und (b): Räumliche Charakterisierung und Fusion zum digitalen Teilezwilling

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Bei Arbeiten zum AP1 (b) wurde weiter an einem Datenhandschuh zur kontinuierlichen Steuerung der verbauten Greifer durch Gesten und Fingerbewegungen gearbeitet. Das System wurde dahin gehend erweitert, dass nun dynamisch Gesten angelernt und eingespeichert werden können. Somit können Nutzende individuelle Gesten ohne zusätzlichen Änderungsaufwand an den zugrundeliegenden Programmen erstellen, testen und wiederverwenden. Weiterhin wurden mit dem Handschuhsystem Versuche zur Erweiterung mit einem akustischen, optischen und vibrotaktilen Feedback durchgeführt. Dazu wurde zunächst ein Empfängersystem mit einer Ultraschall- und einer Infrarotsensorik am Flansch des in der Zelle integrierten Yaskawa SIA20F Roboters angebracht. Anschließend wurden Versuche zur Abstandsmessung an unterschiedlichen Beispielteilen auf dem Sortiertisch mit beiden Sensorsystemen durchgeführt. Ziel war es zunächst zu ermitteln, wie sich beide Sensoren bei der Abstandsmessung unterschiedlicher, für den Anwendungsfall relevanter Objekte verhalten und ergänzen können. Dabei hat sich gezeigt, dass bei mehreren Objekten die Infrarotsensoren deutlich schlechtere und stärker streuende Abstandsinformationen liefern. Die Messwerte der Ultraschallsensorik lassen sich hingegen für ein größeres Bauteilspektrum reproduzierbar auf Abstandsstufen abbilden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die geöffneten Greiferbacken eines Robotiq 140-2F Greifers keinen Einfluss auf das Messsignal haben. Anschließend wurden Versuche mit der Ultraschallsensorik zu den verschiedenen Rückkanälen gemacht, wobei Nutzenden die durch eine Kombination von optischen, akustischen und vibrotaktilen Signalen angezeigten Abstände einschätzen sollten.

Weiterhin wurde mit dem mechanischen Aufbau des MockUps für die radiologische Charakterisierungsstation begonnen. Dazu wurde die Schutzeinhausung mit einem Durchgang versehen und ein Kubus zur Aufnahme der radiologischen Charakterisierungsstation an den Versuchsstand angebaut. Weiterhin wurde die notwendigen Angebote für eine Realisierung der Kinematik zum Verfahren des Sortiertisches eingeholt, um den zeitnahen Einbau des verfahrenbaren Tisches zu ermöglichen.

In AP5 (a, b und c) wurden umfangreiche Arbeiten durchgeführt, um die entwickelten Elemente des autonomen Greifens auf die neue Steuerungsarchitektur ROS Noetic und das verwendete Python-Framework 3 anzupassen. Dabei wurden auch Elemente der Greifposenbestimmung neu implementiert, um beispielsweise ermittelte Greifposen auf der Basis des ROS Paketes TF einheitlich für andere Softwaremodule zur Verfügung zu stellen. Dabei wurde ebenfalls die aktuelle Version des von Unity bereitgestellten Robotics Repository zur Anbindung von Unity an ROS für unterschiedliche Datenformate mit dem bislang im Projekt verwendeten Framework ROS# verglichen. Besonders bei Nachrichtentypen mit großen Datenmengen, wie beispielsweise Punktwolken können mit dem bislang verwendeten Framework ROS# höhere Datenrate, geringere Latenzen und insgesamt eine deutlich bessere Perfor-

mance im speziellen vorliegenden Anwendungsfall erreicht werden. Trotz der einfacheren Einbindbarkeit von neuen Nachrichtenkanälen mittels der im von Unity im Robotics Repository bereitgestellten Module wird im Projekt zunächst weiterhin ROS# zur Datenübertragung zwischen ROS Komponenten und der Visualisierung und Ansteuerung in Unity genutzt.

In AP5 c) und d) wurden weiterhin Arbeiten zu drei Ansätzen zur Umsetzung autonomer Handhabungsfunktionalitäten durchgeführt. Ein Ansatz sieht dabei vor, ein auf dem Sortiertisch ausgebreitetes Haufwerk an Schrottteilen mittels der Auswertung von Höheninformationen aus aufgenommenen Punktwolken und einfachen beziehungsweise zufälligen Bewegungsmustern schrittweise zu vereinzeln, um einen nachgelagerten manuellen oder autonom durchgeführten Greifvorgang zu unterstützen und vorzubereiten. In dem im Projekt entwickelten Ansatz soll zunächst der Voxel mit dem größten Z-Wert aus den Aufnahmen eines Haufwerks unterhalb des in der Anlage verbauten SIA10F Roboters ermittelt werden. Danach soll der Roboter mit seinem Endeffektor in der XY-Ebene mit dem zuvor ermittelten Z-Wert Bewegungen beispielsweise mit einem kreuzförmigen Muster oder mit Lissajous Bahnen durchführen, um übereinander liegende Objekte im Haufwerk auseinander zu schieben und gegebenenfalls zu vereinzeln. Nach der Durchführung einer festgelegten Abfolge von Bewegungsmustern wird erneut der höchste Z-Wert des Haufwerkes bestimmt und der Prozess von neuem begonnen. Dieser iterative Prozess wird bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums wie beispielsweise dem Erreichen einer minimalen Z-Höhe, einer bestimmten Anzahl an Durchläufen oder einem separat zu ermittelndem Vereinzlungsgrad autonom durchgeführt. Da es bei diesem Ansatz gezielt zu Berührungen zwischen dem robotischen Greifsystem und Schrottteilen kommt, wurde ein weiches Greifsystem als Endeffektor an den Roboter angebracht. Hierzu wurde das Soft Robotics Toolkit der Firma SoftGripping beschafft und eine Zweifingerkonfiguration aufgebaut, an gesteuerte Pneumatikventile angeschlossen und am Roboter in Betrieb genommen. Neben den Sortiersuchen können mit dem SoftGripper System nun weiterhin auch Greifversuche durchgeführt werden. Um beispielsweise für den gerade beschriebenen Ansatz einen Vereinzlungsgrad bei Haufwerken unbekannter Teile ermitteln zu können wurde weiterhin begonnen das offene Framework Segment Anything der Firma Meta zu evaluieren. Hierzu können jetzt Farbbilder aus den verbauten Stereolabs Kameras als Eingangsdaten genutzt werden. In laufenden Versuchen werden aktuell Strategien untersucht, um dem Framework Ausgangspunkte für die Segmentierung zu liefern, indem beispielsweise wieder der höchste Z-Wert als Punkt auf einem obenliegenden Objekt genutzt wird. Anschließend wird das so segmentierte Objekt rein virtuell in den Bilddaten entfernt und der Prozess erneut begonnen, bis die Tischebene erreicht ist. Im dritten Ansatz wurde ein komplexes System zur Greiftrajektorienplanung auf der Basis von Reinforcement Learning umgesetzt. Als Trainings- und Simulationsumgebung wurde dazu Unity und ML Agents genutzt. In der simulierten Umgebung wurde die Versuchsanlage nachgebaut und mit generischen Greifobjekten wie etwa einfarbigen Quadern oder Rohren angereichert. Danach wurden Agenten trainiert, wobei die modellierten Reward Funktionen unter anderem belohnen, wenn ein Objekt zwischen die simulierten Greifbacken gebracht wird. Kollisionen werden mit negativen Rewards bestraft. Durch verschiedene Randomisierungsansätze zum Beispiel der Texturen der Objekte konnten Agenten derart trainiert werden, dass sie nach einem rein virtuellen Training mit hoher Erfolgsrate echte Schrottteile in der realen Versuchsanlage greifen können.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die verbleibende Projektlaufzeit wird genutzt, um alle entwickelten Teilkomponenten zu einer Gesamtdemo zu integrieren, um damit Kooperationspartner der beteiligten Industriepartner weiter ansprechen zu können.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Seit Projektstart haben sich keine Änderungen gegenüber der Antragstellung ergeben.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

KONTEC 23 Paper – Zur Veröffentlichung angenommen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9436A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> AFRY Deutschland GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen TP A: Koordination und Erstellung der BIM Modelle	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 75936,73 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Andreas Bauer	<b>E-Mail-Adresse des/ Projektleiters/-in:</b> andreas.bauer@afry.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Durch die zu entwickelnde optimierte Schnitt- und Verpackungsplanung kann die Anzahl der Abfallbehälter (Konradcontainer) optimiert und damit die Planung des Rückbaus verbessert werden. Ziel ist hier die Kostenreduktion durch Containerreduktion und damit die Schonung des Endlagervolumens. Des Weiteren bietet DABKO eine modellbasierte Rückbauplanung und Visualisierung bzw. Simulation. Diese tragen zu einer verbesserten Koordination und Kommunikation aller Prozessbeteiligten bei.

DABKO schafft durch die enge Zusammenarbeit der TU Darmstadt, der TÜV SÜD ET und AFRY die Möglichkeit für Studierende des Bauingenieurwesens und der Physik, sich mit dem Rückbau im Rahmen von interessanten und innovativen Arbeiten zu befassen. DABKO trägt so zum Kompetenzerhalt und der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bei.

Die Zusammenarbeit von TÜV SÜD ET, AFRY und der TU Darmstadt hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens

Mehrere Treffen zur Koordination, der Abgrenzung der Arbeitsfelder und gegenseitige Schulungen zum gemeinsamen Verständnis der Problematik haben stattgefunden.

### Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells

Es liegen für die Arbeiten die Modelle aktivierter Betonstrukturen aus drei Kernkraftwerken in verschiedenen Formaten vor. Die Daten wurden digitalisiert und den Projektteilnehmern zur Verfügung gestellt.

Es wurden verschiedene Rückbauprojekte von aktivierten Betonstrukturen evaluiert. Dazu wurde mit den beteiligten Betreibern der kerntechnischen Anlagen, den Rückbaufirmen und

den Sachverständigen die praktische Zerlegung und Verpackung diskutiert. Anhand der Diskussion wurde der Rückbau modellhaft beschrieben und graphisch umgesetzt. Anhand der Abbaureihenfolge und der zu setzenden Schnitte für die Zerlegung der Betonstrukturen ergeben sich die zu optimierenden Einheiten, die anhand der Abmessung der verschiedenen Typen Konrad Container (KC) weiter zerlegt und verpackt werden müssen.

Momentan findet die Verifizierung dahingehend statt, ob die Daten der Aktivierungsrechnungen korrekt in das BIM Modell übernommen wurden. Die Eingabe gemessener Werte in das BIM Model wird gerade diskutiert.

#### **Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmungsberechnung**

Die Daten der Konrad-Container und anderer Behälter wurden in die FLUKA Software (<https://fluka.cern/>) eingepflegt und erste Rechnungen wurden durchgeführt. Ein erster Vergleich zwischen gemessener und gerechneter Dosisleistung hat erfolgreich stattgefunden.

#### **Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Bisher sind keine Arbeiten erfolgt.

#### **Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens**

Bisher sind keine Arbeiten erfolgt.

#### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Erste Abstimmungen der Projektteilnehmer über die technische Realisierung und die Abstimmung zu einem gemeinsamem Format der Daten haben stattgefunden. Unsere Vorgehensweise wurde der BGE (Bundesgesellschaft für Endlagerung) vorgestellt. Weitere Abstimmungen mit der BGE werden folgen.

#### **Arbeitspaket 7: Dokumentation**

Begleitend zu den jeweiligen Arbeitspaketen findet eine Dokumentation der Ergebnisse statt.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)**

#### **Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens**

Regelmäßiger virtueller und persönlicher Austausch zwischen den Projektbeteiligten. Alle Projektbeteiligten sind über die Aktivitäten der anderen Projektbeteiligten informiert.

#### **Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells**

Es wurden mehrfach Gespräche mit den am Rückbau beteiligten Firmen und Sachverständigen geführt, um unserer geplanten Schnittplanung Plausibilität zu geben. Zusammen mit den Betreibern der kerntechnischen Anlagen, den Rückbaufirmen und den Sachverständigen wurde der „kostengünstigste“ Idealfall ermittelt und in ein BIM Modell umgesetzt.

#### **Arbeitspaket 3.2: Verifikation der Abschirmungsberechnungen**

Modellierung verschiedener Behälter-Geometrien in FLUKA und Durchführung erster Testrechnungen.

#### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Die Parameter für die Schaffung der Datenbank wurden mit den Projektteilnehmern definiert.

#### **Arbeitspaket 7: Dokumentation**

Keine.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Weitere Abarbeitung des Arbeitsprogramms entsprechend des Zeitplans des Projektantrags. In Abstimmung mit der BGE und einem interessierten EVU ist ein früherer Beginn des AP 6.1 (Konzeptionierung der Datenbank) sinnvoll.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9436B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Darmstadt – Fachbereich Bau- & Umweltingenieurwissenschaften – Institut für Numerische Methoden im Bauwesen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen TP B: BIM, Game Engine, optimierte Verpackungsplanung und FLUKA Simulation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 624.368,66 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> rueppel@iib.tu-darmstadt.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Durch die zu entwickelnde Schnitt- und Verpackungsplanung können Abfallcontainer optimiert ausgenutzt und die Planung des Rückbaus verbessert werden. Ziel ist hier die Kosteneinsparung durch Containerreduktion. Des Weiteren wird im Rahmen von DABKO eine modellbasierte Rückbauplanung und Visualisierung bzw. Simulation durchgeführt. Diese tragen zu einer verbesserten Koordination und Kommunikation aller Prozessbeteiligten bei. Zur Validierung des Ansatzes wird ein Demonstrator entwickelt.

DABKO schafft durch die enge Zusammenarbeit der TU Darmstadt, der TÜV SÜD ET und AFRY die Möglichkeit für Studierende des Bau- und Umweltingenieurwesens sowie der Physik, sich mit dem Rückbau im Rahmen von interessanten und innovativen Themen zu befassen. DABKO trägt so zum Kompetenzerhalt und der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bei.

Die Zusammenarbeit von TÜV SÜD ET, AFRY und der TU Darmstadt hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens

Die Projektbeteiligten der Technischen Universität Darmstadt stehen im regelmäßigen Austausch mit den andern Projektbeteiligten. Maßnahmen zur Datenbeschaffung oder das Setzen von Zwischenzielen werden in Absprache mit den betroffenen Projektbeteiligten durchgeführt.

### Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells

Es werden verschiedene Modelle von Biologischen Schilden verschiedener Kernkraftwerke sowie Modelle von verschiedenen Containertypen akquiriert.

### Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmungsberechnung

Wann immer der Optimierer für die Verpackungsplanung eine neue Anordnung der Segmente im Container errechnet, erfolgt die Aktualisierung der Dosisleistungsverteilung durch FLUKA.

Die Einbettung von FLUKA in den globalen Optimierer erfordert die Schaffung einer Schnittstelle, z.B. in Form eines Shell-Skripts. Wichtige Arbeitsschritte sind die Schaffung dieser Schnittstelle, die automatisiert die voxelisierten Geometrien des Containers und der Schildsegmente an FLUKA übergibt, die Interpolation von Aktivitätskonzentrationen für die erzeugten Voxel innerhalb der Beton-Struktur auf Basis der Betreiberdaten und die Validierung der Physik in den Simulationen anhand von Testquellen und die Untersuchungen zur Laufzeitoptimierung der Simulationsrechnungen.

#### **Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Es wurde erkannt, dass die Optimierung der Schnittplanung besser mit Python-Skripten als in der Game Engine Unity angegangen werden kann. Die Visualisierung und Ansteuerung der Skripte finden nach wie vor in Unity statt. Bei der Schnittplanung wird auf Grundlage der Erkenntnisse aus der Praxis zukünftig davon ausgegangen, dass ein Biologischer Schild nicht stückweise von oben nach unten abgetragen, sondern zunächst „Lamellen“ über die komplette Höhe herausgelöst werden. Diese Lamellen werden anschließend auf einem Zerlegetisch weiter zerteilt. Die Optimierung der Schnitt- und Verpackungsplanung („Bin Packing“) beeinflussen sich gegenseitig. Für die Optimierung wurde die Methode des Reinforcement Learnings gewählt. Die Praxiserkenntnisse zu den Zerlegeverfahren bilden in einer digitalen Umgebung (Environment) die Umgebungsvariablen und Heuristiken.

#### **Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens**

Reinforcement Learning erlaubt zwar, für die Schnitt- und Verpackungsplanung eine immer bessere, aber nicht „die“ optimale Lösung zu finden. Daher werden Schwellenwerte zur Validierung der Optimierung entwickelt. Hierzu zählen u.a. die Anzahl und der Befüllungsgrad von Containern, wie sie bei einer herkömmlichen Schnittplanung vorgesehen werden.

#### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

#### **Arbeitspaket 7: Dokumentation**

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-** **punkten)**

#### **Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens**

#### **Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells**

Es wurden die deutschen Container KC3 und KC4 sowie die Schweizer Container LC84 und LC86 umfassend geometrisch modelliert. Zudem wurden von einem weiteren Kraftwerk Aktivitätsdaten akquiriert, die noch mit dem 3D-Modell zu überlagern sind. In der Zwischenzeit wurde eine Python-Anwendung entwickelt, mit der aus beliebigen Aktivitätsdaten die Geometrie eines Biologischen Schilds näherungsweise abgeleitet werden kann. Für den Zweck der simulierten Rückbauplanung sind diese Modelle ausreichend.

#### **Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmberechnung**

Verschiedene Container-Geometrien wurden in FLUKA implementiert. Eine Übersetzung der durch Voxel dargestellten Geometrie in ein für FLUKA verständliches Format wurde automatisiert und getestet. Das Problem der Interpolation von 3-dimensionalen Daten (Skalarfeld) konnte gelöst werden. Die Interpolation ist erforderlich, um die Verteilung der Aktivitätskon-

zentrationen, wie sie von der Betreiberseite zur Verfügung gestellt werden, für die Voxelgeometrie in FLUKA nutzbar zu machen. In mehreren Abstimmungsgesprächen wurde das Schnittstellenformat zwischen dem BIM und FLUKA festgelegt.

Erste Vergleiche zwischen Simulation und Messung wurden für einfache Geometrien (Punktstrahler und Volumenstrahler in kleinen LSC-Violen) durchgeführt, um sicherzustellen, dass die physikalischen Parameter der Simulationen richtig eingestellt sind. Am 10.02.23 fand eine Abstimmung mit der KTE zu möglichen Referenzbehältern zur Validierung der Simulationsrechnung statt. Über diesen Kontakt wurden Messdaten von konditionierten Abfallgebinden zur Verfügung gestellt, die aktuell für den Vergleich zwischen Simulation und Messung für komplexe Geometrien genutzt werden.

#### **Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Das gewählte Verfahren zur Optimierung – das Reinforcement Learning – stellt eine Form des maschinellen Lernens dar. Eine sog. „Environment“ spiegelt die Praxisverhältnisse wieder, sodass der Optimierer bzw. „Agent“ eine adäquate Darstellung der Wirklichkeit vorfindet. Die Entscheidungsfindung („Heuristiken“) des Optimierers berücksichtigt insbesondere die Ausrichtung der Bohrlöcher zur Vorbereitung der Lamellen sowie die entweder horizontal oder vertikale verlaufenden Schnitte. Je mehr Freiheitsgrade eingeschränkt werden, desto valider wird die spätere Optimierung. Mithilfe einer Kostenfunktion, die z.B. die Kosten eines Containers oder den Zeitaufwand für einen Schnitt beinhaltet, soll schließlich eine Aussage über die Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit eines gefundenen Verfahrens getroffen werden. Zur Übergabe der Daten nach FLUKA wird derzeit ein Transformation-Algorithmus entwickelt, der die Geometriedaten in ein Voxelformat überführt.

#### **Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens**

#### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Weitere Bearbeitung des Arbeitsplans entsprechend Zeitplan des Projektantrags. Derzeit sucht die BGE interessierte Entsorgungsunternehmen, um alle beteiligten Akteure frühzeitig im Prozess einzubinden.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9436C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen TP C: Datenbank	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 18.622,45 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Regina Sachse	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> regina.sachse@tuvsud.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Zielsetzung von FORKA ist die Entwicklung, Optimierung und Erprobung anwendungsorientierter Technologien und Verfahren beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. Auch der Kompetenzerhalt beim Rückbau spielt bei FORKA eine wichtige Rolle.

Durch die zu entwickelnde optimierte Schnitt- und Verpackungsplanung können Abfallcontainer optimiert und die Planung des Rückbaus verbessert werden. Ziel ist hier die Kostenreduktion durch Containerreduktion. Des Weiteren bietet DABKO eine modellbasierte Rückbauplanung und Visualisierung. Das trägt zu einer verbesserten Koordination und Kommunikation aller Prozessbeteiligten bei.

DABKO schafft durch die enge Zusammenarbeit der TU Darmstadt, der TÜV SÜD ET und AFRY die Möglichkeit für Studierende des Bauingenieurwesens und der Physik, sich mit dem Rückbau im Rahmen von interessanten und innovativen Arbeiten zu befassen. DABKO trägt so zum Kompetenzerhalt und der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bei.

Die Zusammenarbeit von TÜV SÜD ET, AFRY und der TU Darmstadt hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen. Es wird ein Demonstrator hergestellt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens

Während der Projektlaufzeit findet ein regelmäßiger Austausch der Projektbeteiligten statt. Im Rahmen regelmäßiger Treffen werden Meilensteine geprüft, diskutiert und die Ergebnisse kritisch durch alle Projektbeteiligten hinterfragt.

### Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells

Die für das Endlager vorgesehene, rückzubauende Struktur wird in 3D-Modellen erfasst (AP 2.1), die Aktivierungsdaten und die Bauteildichte werden in das Modell integriert (AP 2.2). Die dabei verwendeten Attribute werden in Abstimmung zwischen allen Projektpartnern festgelegt (AP 2.3).

**Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmungsberechnung**

Keine Beteiligung der TÜV SÜD ET an AP3.1 und 3.3.

AP 3.2: Experimentelle quantitative Verifikation an einem Referenzcontainer sowie Parallelisierung und Beschleunigung der FLUKA-Berechnungen.

**Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Keine Beteiligung der TÜV SÜD ET an AP4.1 bis 4.5.

**Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens**

Keine Beteiligung der TÜV SÜD ET an AP5.1 und 5.2.

**Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Die endlagerrelevanten Daten der beladenen KC werden aus dem BIM-Modell in eine speziell zu entwickelnde Datenbank exportiert. Basierend auf den Interessen der BGE soll die Datenbank alle gesetzlich erforderlichen Informationen enthalten. Dazu gehören der Inhalt der KC (Dosisleistung, Wassergehalt, etc.) und zusätzlich der Stand von Prüf- sowie Freigabeschritten zur Zwischen- und Endlagerung. Zusätzlich sollen ergänzende Informationen wie z.B. Bilddokumentationen erfasst werden können und eine eindeutige Zuordnung jedes physischen Containers zur Datenbank z.B. mittels QR-Codes oder NFC-Chips ermöglicht werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht ermittelte Werte, z.B. stoffliche Randbedingungen nach Wasserhaushaltsgesetz, werden in der Datenbank mit sinnvollen Werten belegt.

Ein externer Zugriff (ggf. durch App) auf die Datenbank zur Abfrage bestimmter Daten sowie die Änderung und Ergänzung bestimmter Daten soll ermöglicht werden. Die Entwicklung einer Schnittstelle zur digitalen Übergabe von Daten an die BGE ist vorgesehen.

In Abstimmung mit der BGE wird untersucht, inwieweit mit dem digitalen Tool DABKO der zeitliche Ablauf des Rückbaus inkl. Angabe der stofflichen und radiologischen Inhalte der KCs prognostiziert werden kann.

**Arbeitspaket 7: Dokumentation**

Begleitend zu den jeweiligen Arbeitspaketen findet eine Dokumentation der Ergebnisse statt.

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-**  
**punkten)**

**Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens**

Regelmäßiger virtueller und persönlicher Austausch zwischen den Projektbeteiligten. Alle Projektbeteiligten sind über die Aktivitäten der anderen Projektbeteiligten informiert.

**Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells**

Beratung der Projektbeteiligten durch TÜV SÜD ET bzgl. Bewehrung.

**Arbeitspaket 3.2: Verifikation der Abschirmungsberechnungen**

Am 10.02.23 Abstimmung mit KTE zu möglichen Referenzbehältern zur Validierung der Simulationsrechnung.

**Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Sammlung von Hintergrundinformationen zum Ablauf der Produktkontrolle durch Gespräche mit BGE, innerhalb der TÜV SÜD AG, Betreibern kerntechnischer Anlagen und dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz als genehmigender Behörde.

**Arbeitspaket 7: Dokumentation**

Keine.

**4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Weitere Abarbeitung des Arbeitsprogramm entsprechend Zeitplan des Projektantrags.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9432
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Darmstadt	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Forschungsarbeiten zur Entwicklung eines bildgebenden, zerstörungsfreien Analyse- und Deklarationsverfahrens, für radioaktive Abfallgebinde, basierend auf lasergetriebenen Neutronenquellen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2024	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 447.242,89 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Markus Roth	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> markus.roth@physik.tu-darmstadt.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in Endlagerstätten ist es notwendig, dass deren Inhalt sowohl radiologisch, stofflich als auch strukturell charakterisiert wird. Während radiologische Komponenten durch deren charakteristische Emission von Gamma-Strahlung bestimmt werden können, existiert bisher kein zerstörungsfreies Verfahren, um die Zusammensetzung und die interne räumliche Struktur von Abfallgebinden zu bestimmen.

Zielsetzung dieses Vorhabens ist es daher, ein bildgebendes Analyse- und Deklarationsverfahren für Abfallgebinde auf der Basis von schneller Neutronen-Radiographie zu entwickeln. Während die grundlegende Funktionalität dieser Methode bereits im Rahmen des Forschungsverbundprojekts NISRA mithilfe eines Neutronengenerators bestätigt wurde, konzentriert sich dieses Vorhaben auf die Verwendung lasergetriebener Neutronenquellen. Diese ebenfalls kompakten Quellen besitzen das Potential, drei bis vier Größenordnungen höhere mittlere Neutronenflüsse zu erzeugen. Zusammen mit der geringeren Quellgröße und den höheren Neutronenenergien ist außerdem eine Charakterisierung mit einer verbesserten räumlichen Auflösung und stark verkürzten Messzeiten zu erwarten. Mit dieser Methode wird eine Charakterisierung der Abfallgebinde am Ort der Endlagerstätte möglich.

Effiziente lasergetriebene Neutronenquellen basieren auf einem Zweistufenprozess. Im ersten Schritt werden Protonen oder auch schwere Wasserstoff Ionen (Deuteronen) durch die Wechselwirkung eines Femtosekunden-Laserpulses mit einem Target beschleunigt. Das Target Material ist typischerweise eine etwa ein Mikrometer dünne Folie für Experimente bei geringer Wiederholfrequenz; oder ein sogenanntes *Liquid Leaf* Target, welches als dünnes flüssiges Blatt die Eigenschaft hat sich am Ort der Wechselwirkung schnell zu regenerieren und daher auch für sehr hohe Frequenzen, d.h. quasi CW-Betrieb geeignet scheint. Die beschleunigten Deuteronen treffen im zweiten Schritt auf einen Konverter, zum Beispiel ein Zentimeter dicker Block aus Beryllium oder Lithiumfluorid, um dort durch Kernreaktionen einen gerichteten Neutronenstrahl zu erzeugen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Bez.	<b>Entwicklung eines hochrepetitiven Targets</b>
T-1	Einarbeitung in Themengebiet und Literaturrecherche
T-2	Anpassung des Jet-Design auf Laserenergien im J-Bereich
T-3	Bestellen und Aufbau der Komponenten
T-4	Überprüfung der Stabilität und Jet-Dicke an Luft
T-5	Aufbau und Betrieb innerhalb einer Vakuum-Kammer
T-6	Parameterstudien zur Stabilität und Vakuumlast
T-7	Implementierung eines Düsen-Schutzkonzeptes
T-8	Planung zur Anwendung innerhalb eines Experimentes
T-9	Beschleunigung von Ionen an einem hochrepetitiven Laser
T-10	Auswertung der Ergebnisse und Abschlussbericht
	<b>Erzeugung schneller Neutronenpulse</b>
N-1	Optimierung des Konverter- und Kollimator-Designs
N-2	Monte-Carlo Simulationen zur Experimentoptimierung
N-3	Experimentplanung
N-4	Vermessung des Einflusses der Laserparameter
N-5	Auswertung und Vergleich zu Simulationen
N-6	Erzeugung von Neutronen an Lasersystemen $\gg 10\text{Hz}$
	<b>Detektorentwicklung zur Neutronenradiographie</b>
D-1	Einarbeitung in Themengebiet und Literaturrecherche
D-2	Design, Auswahl und Beschaffung der Komponenten
D-3	Aufbau eines faserbasierten N- und X-Ray Detektors
D-4	Parasitäres Testen an Laserquellen auf EMP Verträglichkeit
D-5	Aufnahmen von Radiographien im Hz-Bereich
D-6	Automatisierung der Datenaufnahme und Auswertung
D-7	Kalibrierung an konventioneller Neutronenquelle
D-8	Experimentplanung an hochrepetitiver Laser-Quelle
D-9	Auswertung der Daten und Abschlussbericht
	<b>Design kompakter Laser-Neutronen-Radiographie Anlage</b>
R-1	Marktrecherche zu geeigneten Laser-Systemen
R-2	Rechnungen zu benötigter Strahlenabschirmung
R-3	Aufnahme eines 200l Gebinde Testobjektes
R-4	Berechnung der benötigten Neutronenflüsse
R-5	Erstellen eines Gesamtkonzeptes

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Obige Tabelle zeigt den Arbeitsplan aufgegliedert nach Teilprojekten. Obschon thematisch verbunden, können die Teilbereiche größtenteils unabhängig voneinander abgearbeitet werden. Personell konnten wir das Team durch einen neuen Mitarbeiter zum 01.November 2022 verstärken. Er hat sich während der ersten Monate seiner Tätigkeit in die Themengebiete dieses Forschungsvorhabens eingearbeitet (T1 / D-1), insbesondere mit Blick auf den Bereich der Weiterentwicklung des hoch-repetitiven Targets. Im ersten Halbjahr 2023 dann den bestehenden Aufbau des Liquid-Leaf Targets kennengelernt und Teilkomponenten identifiziert, welche

nach gegenwärtigem experimentellen Kenntnisstand konzeptionell verändert, beziehungsweise weiterentwickelt werden sollten, um das Jet-Design bei hoher Laserwiederholfrequenz und signifikanter Energie pro Puls (T2) dauerhaft nutzbar zu machen.

Das erstellte Konzept eines auf vielen, einzeln auslesbaren Photomultipliern beruhenden Detektors wurde umgesetzt und der Aufbau sowohl im Labor als auch experimentell an verschiedenen Neutronenquellen getestet. Die Daten wurde ausgewertet, wobei sich wiederholt gezeigt hat, dass sich mit den aktuell verfügbaren mittleren Neutronenflüssen, limitiert v.a. durch die noch begrenzte Repetitionsrate von Laser-Neutronen-Quellen, nur ein schlechtes Signal- zu Rauschverhältnis erzielen lässt. Ebenfalls hatten unter anderem diese Messungen Verbesserungspotential bei der elektronischen Erfassung und Verarbeitung der Rohdaten aufgezeigt. Die Beschaffung geeigneter Ausleseelektronik wurde beantragt, von Seiten des Projektträgers genehmigt, bestellt, geliefert und im zweiten Quartal 2023 abschließend implementiert.

Im Teilprojekt 1 konzentrierten sich die Arbeiten in der ersten Hälfte des Jahres 2023 darauf die Zuverlässigkeit des sog. „Liquid Leaf“ weiter zu verbessern. Im Targetlabor des Instituts für Kernphysik wird der Prozess zur reproduzierbaren Herstellung und hinreichend genauen Vermessung von Glas-Kapillaren nun routiniert angewandt. Es können zueinander passende Düsen mit gewünschten Durchmessern bis hinab zu wenigen Mikrometern selbst hergestellt werden.

Am PHELIX Laser System der GSI wurde im März 2023 die gleichzeitige Durchführung einer Neutronen und einer Röntgenradiographie mit einer identischen Probe durchgeführt. Ziel war es, durch die Unterschiede in der Abschwächung von Neutronen und Röntgenstrahlen, auf die Materialzusammensetzung zu schließen. Hierbei wurden bereits etablierte Detektortypen im Zusammenspiel mit lasererzeugten Röntgen- und Neutronenquellen verwendet, die Detektoren auf EMP-Verträglichkeit getestet (D-4) und mit diesen sowohl Neutronen- als auch Röntgenradiographien angefertigt.

Mit der Röntgenradiographie wurden die Erwartungen übertroffen und es konnte eine räumliche Auflösung im Bereich von 100  $\mu\text{m}$  erreicht werden, obwohl diese durch 3 cm dicke Aluminiumplatten aufgenommen wurden. Die räumliche und zeitliche Auflösung in der Geometrie, wie sie mit dem etablierten Neutronendetektor an PHELIX aufgenommen wurde, hat leider nicht ausgereicht, um die Materialien eindeutig zu identifizieren. Allerdings konnte die räumliche Struktur der Probe reproduziert werden.

Um das Design des Liquid Leaf zu verallgemeinern und die Machbarkeit für unterschiedliche Flüssigkeiten zu testen wurden numerische Simulationen mit dem Software-Framework „Openfoam“ ([www.openfoam.com](http://www.openfoam.com)) implementiert. Der funktionsfähige experimentelle Aufbau des Liquid Leaf ist auf Wasser ausgelegt. Die numerische Simulation auch mit anderen Betriebsflüssigkeiten und Parameter soll dabei unterstützen, eine effiziente, kostengünstige und langzeitstabile Konfiguration für die avisierte kommerzielle Nutzung zu finden (T7/T8/T9). Im Hinblick auf den praktischen Einsatz des Liquid Leafs wird der OTCOPUS Teilchen-Detektor weiterentwickelt, um eine hoch repetitive Strahl-Charakterisierung mit deren Hilfe dann während des Experiments die Parameter in Echtzeit optimiert werden können. Das Design des Detektors wurde im Laufe des ersten Halbjahres 2023 fertig gestellt, die Produktion der Einzelkomponenten sowie Schaffung von Fertigungsfertigkeiten für die semi-automatische Integration v.a. der vielen Einzelfasern hat begonnen.

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Weiterhin ist aktuell während des Aufenthalts von Tim Jäger am Los Alamos National Laboratory (LANL) in den USA ein Experiment mit der LANSCE Neutronenquelle geplant, bei der zerstörungsfrei ein Dummy-Abfallbehälter und „Miniatur-Brennelemente“ untersucht werden sollen.

Mit Blick auf einen Test des Liquid-Leaf Targets an einem hinreichend starken Laser der bei höherer Repetitionsrate - z.B. bei 1Hz - arbeitet, sind wir mit dem Helmholtz-Institut Jena im Gespräch und arbeiten an der Planung einer Experiment-Kampagne. Diese ist für Ende 2023, ggf. auch Anfang 2024 geplant.

Mit dem gegenwärtigen experimentellen Aufbau des Liquid Leaf soll eine Parameterstudie durchgeführt werden, auf Basis der Response Surface Method, um über einen Parameterraum Stabilitätsmaxima bestimmen zu können. Es soll ein Stabilitätsparameter definiert werden, um mit diesem dann einfacher numerisch und experimentell auch andere, stabile Konfigurationen eines Liquid Leaf Aufbaus zu finden. Der Detektor muss im nächsten Schritt gebaut und getestet werden und mit einer geeigneten Quelle kalibriert werden.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des LOEWE Schwerpunktes *Nuclear Photonics* am Institut für Kernphysik wird die Entwicklung des hochrepetitiven *Liquid Leaf* Targets unterstützt. Die Zusammenarbeit wird weitergeführt. Dieses LOEWE Programm wird jedoch Ende September 2023 auslaufen.

Ebenso steht dieses Vorhaben in Bezug zu dem vom BMBF geförderten Projekt 05P19RDF A1 mit der Bezeichnung „Verbundforschungsantrag von Gruppen der Technischen Universität Darmstadt zum Aufbau und Forschung an FAIR // HED@FAIR.DA“. Unter anderem wurde dort ein neuartiger Detektor entwickelt und zum Patent angemeldet, welcher mit hoher Repetitionsrate die räumliche Verteilung von Protonen energieselektiv messen kann. Für die Optimierung des Konverter- und Kollimator-Designs (N-1) mit Blick auf die Konversionseffizienz von Protonen in Neutronen, ist die Charakterisierung des aus dem *Liquid Leaf* heraus mit intensiven Laserpulsen beschleunigten Protonenstrahls eine wesentliche Voraussetzung. Das Liquid-Leaf soll zusammen mit diesem Detektor bei einer Repetitionsrate von 1Hz am Polaris Laser in Jena gegen Ende 2023 / Anfang 2024 zum Einsatz kommen.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Zimmer, M., *et al.* “Analysis of laser-proton acceleration experiments for development of empirical scaling laws.” *Physical Review E* 104.4 (2021): 045210.
- Hesse, M. *et al.* Spatially resolved online particle detector using scintillators for laser-driven particle sources. *Rev. Sci. Instruments* 9 (2021).
- Zimmer, M., *et al.* “Demonstration of non-destructive and isotope-sensitive material analysis using a short-pulsed laser-driven epi-thermal neutron source.” *Nature Comm.* (2022)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.06.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9443
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Aus- und Weiterbildung sowie Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen und Abfallprodukten aus Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2023 bis 31.05.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 911.614,21 €
<b>Projektleiter:</b> Dr. Thomas Bücherl	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Thomas.buecherl@tum.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben hat die Ausbildung, Fortbildung und Weiterbildung, den Kompetenzerhalt sowie die Vermittlung von allgemeinen Informationen aus den Bereichen Produktkontrolle und Charakterisierung radioaktiver Abfälle zum Ziel. Eine auf einem Content Management System (CMS) basierende Webplattform zur Vermittlung der Lerninhalte und Informationen aus den Bereichen Produktkontrolle und Charakterisierung radioaktiver Abfälle wird realisiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Vorhaben ist unterteilt in die vier Arbeitspakete

- AP 1: „Technische Realisation“,
- AP 2: „Vermittlung der Lerninhalte“,
- AP 3: „Kommunikation“ und
- AP 4: „Summer School“

In AP 1 wird die erforderliche Infrastruktur für die Realisierung des Vorhabens bereitgestellt die mit den Lerninhalten aus AP 2 gefüllt wird. Mit AP 3 wird der Verbreitung der Vorhabenergebnisse Rechnung getragen. Im Rahmen einer „Summer School“ (AP 4) werden die im Vorhaben erarbeiteten Themengebiete in direktem Kontakt einem kleinen Personenkreis vermittelt. Die Bearbeitung der Arbeitspakete und ihrer Unterpunkte kann zum Teil unabhängig und parallel realisiert werden.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Der erste Monat der Vorhabenlaufzeit war im Wesentlichen von administrativen und vorbereitenden Arbeiten bestimmt. Zu diesen gehörten beispielsweise die Vorbereitung der Unterlagen für die Ausschreibung des Unterauftrags, Festlegung von Arbeitspaketen für Werkstudenten etc.

Für die Interaktion der Nutzer wurde die Webadresse [www.eductum.de](http://www.eductum.de) registriert und eine testweise Installation des Content Management System Joomla! durchgeführt (Anmerkung: die Webseite ist noch nicht freigeschaltet, d. h. allgemein zugänglich).

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Im Rahmen des AP 1 („Technische Realisation“) wird das Content Management System mit den benötigten Erweiterungen aufgesetzt und das generelle Erscheinungsbild der Webseite festgelegt. Zukünftige Änderungen sind hierbei aufgrund der Trennung zwischen Inhalten und Layout aber auch jederzeit nachträglich möglich und können ggf. Rückmeldungen von Nutzern berücksichtigen. Ein geeigneter Server für die dedizierte Nutzung bei der RCM wird nach Festlegung der erforderlichen Eigenschaften beschafft und mit dem Aufspielen der erforderlichen Software sowie dem Aufsetzen und Test der containerzentrierten Managementumgebung begonnen. Parallel hierzu erfolgt die Entwicklung der ersten containerbasierten Module. Im Vorhaben nutzbare Verknüpfungen zwischen dem Server und dem CMS werden voraussichtlich erst im 1. Halbjahr 2024 realisierbar sein.

Die Arbeiten für das AP 2 („Vermittlung der Lerninhalte“) berücksichtigen zunächst die Erarbeitung des vorgesehenen strukturellen (statischen) Inhalts der im Vorhaben zu berücksichtigenden Themengebiete. Aus diesen wird ein Themenbereich ausgewählt (voraussichtlich das Thema segmentiertes Gamma-Scanning) und für die nach einem Jahr Vorhabenlaufzeit vorgesehene Evaluierung bevorzugt umgesetzt. Die Umsetzung soll trotz des relativ engen Zeitplans die wesentlichen Aspekte (Inhalt, Funktionalität, Didaktik) des Vorhabens demonstrieren.

Dem AP 3 („Kommunikation“) wird mit einem entsprechenden Beitrag auf der KONTEC 2023 Rechnung getragen.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse TP A: Einfluss von natürlichen nanopartikulären Phasen auf die Radionuklidverteilung im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 31.10.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 498.769,96 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Thorsten Schäfer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> thorsten.schaefer@uni-jena.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem End-lager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und stellen einen integralen Bestandteil der Radioökologie dar. Untersuchungen zu RN-transport, -speziation und -partitionierung im Boden sowie der RN-aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelabscheidungen u.a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen im wurzelnahen Boden (Rhizosphäre). Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

TP-A: Remobilisierung und Einfluss natürlicher nanopartikulärer Phasen auf die Verteilung von Radionukliden während des Transportes im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze

AP-1: Variation des Wasserstandes in Laborlysimetern

AP-2: Implementierung der Wasserspiegelschwankung in Hydrus 2D/3D und ECOLEGO

AP-3: Bepflanzung der Lysimeter mit anschließender Untersuchung von Porenwässern

AP-4: Durchführung konsekutiver Umlaufsäulenexperimente

AP-5: Sensitivitätsanalyse des bestehenden Modellierungsansatzes der Laborlysimeter mit neu generierten Daten zu Unterbodensystemen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Während des Berichtszeitraums konnte die Doktorandenstelle nach dem Auswahlverfahren nicht besetzt werden. Vom 22.-23.02.23 wurde das Kick-off Meeting unter Teilnahme aller Partner durch den Koordinator FSU Jena am Standort des Institutes für Geowissenschaften durchgeführt. Gemeinsame Einigungen betrafen u.a. die Wahl des Referenzbodensubstrates Refesol 01A für z.B. Säulenexperimente (AP4) und Pflanzenexperimente (AP3). Weiterhin wurde das experimentelle Vorgehen und die modelltechnische Umsetzung bzgl. diverser Arbeitspakete diskutiert und Festlegungen getroffen. Mit den Partnern LUH-IRS, ÖI und UB wurde das Vorgehen in AP1 gesondert diskutiert und festgelegt. Die Laborlysimeter wurden planmäßig weiter mit Grimsel (GTS) – Grundwasser betrieben und physikochemische und hydraulische Parameter im Monitoring überwacht. Die technischen Schwierigkeiten, welche im vorangegangenen Berichtszeitraum benannt worden sind, setzten sich fort und eine forcierte Änderung des Standortes der Lysimeter führte zu einer Verlagerung der geplanten Wasserspiegelschwankungen (AP1) in den nächsten Berichtszeitraum. Die experimentellen Randbedingungen mit einhergehenden Schwankungen des Wasserstands wurden jedoch hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die physikochemischen Parameter untersucht. Kurzfristige und geringe Schwankungen des Wasserstandes sowie Anstiege der Temperatur in unterschiedlicher Amplitude spiegelten sich in kurzen und reversiblen Veränderungen der physikochemischen Parameter wider. Eine langanhaltende Absenkung des Wasserstandes führte jedoch zu einem starken Anstieg des Redoxpotenzials mit stark verzögerter Abnahme in den Systemen. Somit wurden erste Erkenntnisse für die bevorstehenden Arbeiten und experimentellen Bedingungen gewonnen. Bezüglich AP 3 wurden in Absprache mit den Partnern LUH-IRS und HZDR eine Vorauswahl an möglichen Pflanzen anhand einer Literaturrecherche mit Fokus auf Wurzel-exsudate für entsprechende Vorversuche diskutiert. Die Auswahl der Modellpflanze betrifft hier die Buschbohne (*Phaseolus vulgaris var. saxa*). Eine erste studentische Projektmodulararbeit war zum Ende des Berichtszeitraumes in der Phase der Finalisierung. Diese wird in Vorbereitung auf eine Masterarbeit erstellt, die im nächsten Berichtszeitraum beginnen wird. Ziel der Arbeiten ist die Untersuchung von Selenat als Stellvertreter des langzeitsicherheitsrelevanten RN 79Se in Interaktion mit Illit und extrahierter organischer Substanz aus den Refesol Böden, welche Bestandteile der Komponenten-additiven Modellierung sind. Erste Ergebnisse zeigen keine oder eine stark gehemmte Sorption v.a. in Anwesenheit gelöster organischer Substanz.

### 4. Geplante Weiterarbeit

Die eingeplante Doktorandenstelle soll besetzt werden. Der Umzug der Lysimeter soll geplant und zu Beginn des kommenden Berichtszeitraumes durchgeführt werden. Die geplanten Experimente werden entsprechend nach Neuinstallation, Wartung der Gerätetechnik und Normalisierung der physikochemischen und hydraulischen Bedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse von AP1 werden fortlaufend mit den Partnern LUH-IRS, ÖI und UB hinsichtlich der modelltechnischen Implementierung diskutiert.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

BMBF Verbundprojekt TransLARA (02NUK051C; abgeschlossen). Untersuchung des Transportverhaltens von RN in der Pedosphäre mit besonderem Fokus auf deren kolloidalen Transport.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine im Berichtszeitraum.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover / Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS) und Institut für Zellbiologie und Biophysik (IfB)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse TP B: Remobilisierung von Radionukliden [...], Charakterisierung mikrobieller Diversität im Bo- den und die Beeinflussung durch Radionuklide und Wurzelexsudate	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 31.10.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 998.850,94 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Beate Riebe	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> riebe@irs.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil der radioökologischen Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen. Pflanzen modifizieren über Wurzelabscheidungen u.a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen im wurzelnahen Boden (Rhizosphäre). Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**TP-2a:** Remobilisierung von RN bei schwankenden Wasserständen und Charakterisierung der mikrobiellen Diversität im Boden und ihre Beeinflussung durch RN und Wurzelexsudate von Pflanzen (LUH-IRS)

AP-1a: Remobilisierung von RN in Lysimetern bei schwankenden Wasserständen (Lysimeter)

AP-2a: Veränderung von Mikroorganismengesellschaften (Rhizosphäre / bulk soil) durch RN

AP-3a: Einfluss von Wurzelexsudaten auf RN-Aufnahme in Pflanzen (Rhizoboxen/Modellböden)

AP-4a: Einfluss von Pflanzenwurzeln auf RN-Migration (Lysimeter)

**TP-2b:** Bedeutung pflanzlicher Transporter für die Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden in Pflanzen (LUH-IfB)

AP-1b: Klonierung von CRISPR/Cas9 Vektor für die jeweiligen Transporter

AP-2b: Generierung von Knock-out Zellen /Aufnahme von RN in Knock-out Zellen

AP-3b: Generierung/Kultivierung von Knock-out Pflanzen / Aufnahme von RN in Knock-out Pflanzen

AP-4b: Analyse der Produktion von Exsudaten in Knock-out Pflanzen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-punkten)

AP-1a: In getracerten Laborlysimetern aus einem Vorgängerprojekt (Trans-LARA; 02NUK051A) wurden die Wasserstände über einen Zeitraum von mehreren Wochen schrittweise angehoben, um die potentielle Remobilisierung der Radionuklide  $^{125}\text{I}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{238}\text{Pu}$  und  $^{99}\text{Tc}$  zu untersuchen. Dafür wurden regelmäßig Porenwasserproben entnommen.

AP-1b: Es wurde eine intensive Literaturrecherche zu möglichen Pflanzensystemen und dafür benötigter Expressions- und Vektorsysteme, sowie zur allgemeinen Pflanzenzellkultur durchgeführt. Entsprechend wurde die Beschaffung geeigneter Zelllinien und Pflanzen auf den Weg gebracht.

AP-2a: Zwölf Rhizoboxen wurden konstruiert und mit dem Referenzboden RefeSol-01A gefüllt. Ein Aufbau für die Zuführung von Tracerlösungen wurde entwickelt, mit dem in vier der Rhizoboxen zunächst eine Lösung des Farbstoffs Brilliantblau FCF eingeleitet wurde, um den Fluss der Tracerlösung im Boden zu visualisieren.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-punkten)

AP-1a: Die Porenwasserproben aus den Lysimetern sollen jeweils, gegebenenfalls nach einer chemischen Probenaufarbeitung, mittels geeigneter analytischer Verfahren (ICP-Massenspektrometrie sowie Alpha- bzw. Gamma-Spektrometrie) untersucht werden.

Nach einer fünfstufigen Erhöhung von insgesamt 15 cm soll der Wasserstand in den Lysimetern wieder auf das ursprüngliche Niveau abgesenkt werden. Dabei wird weiterhin eine regelmäßige Beprobung des Porenwassers erfolgen. Nach Möglichkeit soll anschließend ein Bohrkern aus den Lysimetern entnommen werden, um ein Tiefenprofil der Radionuklidverteilung zu erhalten.

Neben der weiteren Bearbeitung der Lysimeter sind auch Batch- und Säulenversuche mit  $^{75}\text{Se}$  als Homolog des endlagerrelevanten  $^{79}\text{Se}$  geplant, um weitere Informationen über Einflussfaktoren auf die Mobilität von Radionukliden in Böden zu erhalten.

AP-1b: Design der CRISPR/Cas9-Vektoren mit entsprechenden guideRNAs zu den verschiedenen Transportern für das jeweilige Pflanzensystem. Anschließende Klonierungsarbeiten.

AP-2a: Die Rhizoboxen sollen mit Buschbohnen bepflanzt werden. Bei entsprechender Entwicklung der Pflanzen sollen Tracerversuche mit den Radionukliden  $^{125}\text{I}$  und  $^{99}\text{Tc}$  durchgeführt werden. Darüber hinaus sollen erste Versuche einer Charakterisierung der Mikroorganismengesellschaften im Boden mit und ohne Einfluss von Radionukliden erfolgen.

AP-2b: Etablierung der Pflanzenzellkultur im Labor und Nachweis der Expression der Transporter im Wildtyp.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

02NUK051A - Transport- und Transferverhalten langlebiger Radionuklide entlang der kausalen Kette Grundwasser-Boden-Oberfläche-Pflanze unter Berücksichtigung langfristiger klimatischer Veränderungen (Trans-LARA). Neben Säulenversuchen, sowie Lysimeterversuchen mit in-situ-Messung von pH und Redoxpotential wurde die Aufnahme der Radionuklide  $^{125}\text{I}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ , Americium und Plutonium in die Pflanze in Abhängigkeit von deren Speziation und den Bodeneigenschaften bestimmt. Transferfaktoren für die Aufnahme der Nuklide über den Wurzelpfad wurden für vier Nutzpflanzenarten in vier unterschiedlichen Referenzböden aus Deutschland experimentell ermittelt. Für das bessere Verständnis des Transferverhaltens von Iod und Technetium innerhalb der Pflanze wurden Erbsen und Karotten mit orts aufgelösten massenspektrometrischen Methoden (SIMS und rL-SNMS) untersucht und die Radionuklide auf zellulärer Ebene detektiert. Zusätzlich wurde gezeigt, dass pflanzliche Metabolitransporter in der Lage sind, Radionuklide zu transportieren. Als Modellorganismus für die Expression einzelner Ionenporter dienten die Oozyten des Frosches *Xenopus laevis*.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Institut für Ressourcenökologie	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse TP C: Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den Radionuklid-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für Radionuklide in Pflanzen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 31.10.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 493.314,35 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Susanne Sachs	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> s.sachs@hzdr.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil radioökologischer Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen zu RN-Transport, -Speziation und -Partitionierung im Boden sowie der RN-Aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u.a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**TP-C:** Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den RN-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen

**AP-1:** Bestimmung der mikrobiellen Diversität in einem Referenzboden sowie der Beeinflussung dieser durch RN und Wurzelexsudate

**AP-2:** Untersuchung des Abbaus ausgewählter Pflanzenexsudate durch bodenrelevante Mikroorganismen und Charakterisierung der Abbauprodukte

**AP-3:** Untersuchung der RN-Speziation in Gegenwart von Pflanzenexsudaten und deren Abbauprodukten sowie Bestimmung fehlender thermodynamischer Daten

**AP-4:** Untersuchung des Einflusses von Wurzelexsudaten und deren Abbauprodukten auf den RN-Transport in „künstlichen“ Bodensystemen

**AP-5:** Untersuchung der RN-Aufnahme in genetisch modifizierte Pflanzenzellen und Vergleich mit dem Wildtyp

**AP-6:** Identifizierung von Pflanzenexsudaten RN-exponierter Pflanzen in Hydrokultur/„künstlichem“ Boden und Bestimmung der RN-Speziation in der Hydrokulturlösung/im Porenwasser

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

Der Doktorand, der die Boden- und RN-abhängige Modulation mikrobiologischer Gemeinschaften und den Einfluss dieser auf Wurzelexsudate untersuchen wird, hat seine Arbeit im Projekt zum 1. Januar 2023 aufgenommen.

#### **AP-1/2:**

- In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde Refesol 01-A als Referenzboden ausgewählt und eine gemeinsame Charge beim Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie bestellt. Damit ist die Grundlage für die Vergleichbarkeit der von den Projektpartnern (FSU, IRS, HZDR) mit dem Boden erzielten Ergebnisse gewährleistet.
- Es erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche zur Bestimmung der mikrobiellen Diversität in Böden, zur Beeinflussung dieser durch RN und Pflanzenexsudate sowie zur Wechselwirkung von Mikroorganismen und organischen Verbindungen mit Schwermetallen und RN.
- Die Etablierung einer Methode zur Bestimmung der mikrobiellen Diversität im Referenzboden wurde begonnen. Aliquote des Referenzbodens wurden in Kunststoffbehältern mit synthetischem Grundwasser angefeuchtet und mit luftdurchlässigen Membranen, die das Eindringen von Mikroorganismen von außen verhindern sollen, verschlossen. Der Boden wurde unter definierten Bedingungen in einer Pflanzenwachstumschamber inkubiert und innerhalb eines Monats alle 7 Tage beprobt. Im Folgenden erfolgte die Extraktion der Boden-DNA (DNeasy PowerSoil Pro Kit). Neben Kontrollproben (Refesol 01A + synthetisches Grundwasser) wurden mit Uran exponierte Proben untersucht. Derzeit erfolgt die Analyse der gewonnenen DNA mittels RISA-Analyse (ribosomal RNA intergenic spacer analysis) als Grundlage für die weitere Identifizierung der im Boden vorkommenden mikrobiellen Diversität. Basierend auf diesem Versuch wird das weitere experimentelle Vorgehen festgelegt.

#### **AP-3:**

- Wie im Projekt TRANS-LARA gezeigt, kann Malat (Anion der Äpfelsäure), als typischer primärer Pflanzenmetabolit, die Mobilität von Uran(VI) (U(VI)) beeinflussen. Es wurden pH- und konzentrationsabhängige Untersuchungen zur Komplexierung von U(VI) mit Äpfelsäure mittels zeitaufgelöster laser-induzierter Fluoreszenzspektroskopie (TRLFS) begonnen. Ziel ist es, die in Lösung vorkommenden U(VI)-Spezies spektroskopisch zu identifizieren und die thermodynamische Datenbasis zu erweitern.

#### **AP-3/4/5:**

- Aus den eingegangenen Bewerbungen zur Besetzung der zweiten Doktorandenstelle wurde eine geeignete Kandidatin ausgewählt. Die Doktorandin, die ihre Arbeit am 1. September 2023 beginnt, wird die RN-Speziation und den RN-Transfer in Gegenwart von Wurzelexsudaten untersuchen und zusammen mit den Projektpartnern in Hannover an der Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen arbeiten.

**AP-6:**

- In Abstimmung mit den Projektpartnern wurde *Phaseolus vulgaris* (Buschbohne) für die Untersuchung der Wechselwirkung von RN mit Nutzpflanzen ausgewählt. Am HZDR wird die Identifizierung von Pflanzenexsudaten RN exponierter *Phaseolus vulgaris* Pflanzen in Hydrokultur/“künstlichem“ Boden und die Bestimmung der RN-Speziation erfolgen. Erste Versuche zur Anzucht von Buschbohnen in Hydrokultur (Hoagland-Lösung) wurden durchgeführt. Darüber hinaus erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche zu Wurzelexsudaten von *Phaseolus vulgaris* und der Wechselwirkung dieser Pflanze mit RN.

**4. Geplante Weiterarbeit**

**AP-1:**

- Weiterarbeit an der Etablierung einer Methode zur Bestimmung der mikrobiellen Diversität in einem Referenzboden und der Beeinflussung dieser durch RN und Wurzelexsudate mit gleichzeitiger Bestimmung relevanter geochemischer Parameter (z.B. Boden pH, Anionen-, Kationenkonzentrationen, DOC) und der Konzentration der dem Boden zugesetzten Metabolit-Modellverbindungen (HPLC).
- Erste Sequenzanalysen extrahierter Boden-DNA

**AP-2:**

- Erste Versuche zur Kultivierung ausgewählter Boden-Mikroorganismen

**AP-3:**

- Literaturrecherche zur RN-Speziation in Gegenwart von Pflanzenexsudaten und deren Abbauprodukten sowie Identifizierung thermodynamischer Datenlücken
- Spektroskopische Untersuchungen zur Bestimmung der Uran(VI)- und Europium(III)-Speziation in Gegenwart ausgewählter Pflanzenexsudate

**AP-6:**

- Etablierung einer Kultivierungsmethode für *Phaseolus vulgaris* in Hydrokultur und Tests zur Extraktion (Festphasenextraktion) und Analyse (HPLC) von Wurzelexsudaten

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Das Projekt TRAVARIS schließt sich an das vom BMBF-geförderte, abgeschlossene Verbundvorhaben TRANS-LARA an. Die Arbeiten des HZDR (Teilprojekt B, Förderkennzeichen 02NUK051B) konzentrierten sich darin auf die Wechselwirkung von Actiniden mit Pflanzenzellen/Pflanzen, um Aussagen zur Metall-Speziation in Gegenwart von Pflanzen zu treffen, sowie auf Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen auf molekularer und zellulärer Ebene.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Veröffentlichung einer Publikation mit Ergebnissen aus dem Vorgängerprojekt TRANS-LARA (02NUK051B): Jessat, J., John, W. A., Moll, H., Vogel, M., Steudtner, R., Drobot, B., Hübner, R., Stumpf, T., Sachs, S.: Localization and chemical speciation of europium(III) in *Brassica napus* plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 254 (2023) 114741.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Öko-Institut e.V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse TP A: Einfluss von natürlichen nanopartikulären Phasen auf die Radionuklid-Verteilung im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 31.10.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 324.912,58 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Veronika Ustohalova	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> v.ustohalova@oeko.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil radioökologischer Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen zu RN-transport, -speziation und -partitionierung im Boden sowie der RN-aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u.a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP-1: Abstimmung zum Ablauf der Lysimeterexperimente mit schwankenden Wasserständen und zu Umlaufsäulenexperimenten hinsichtlich der Übertragbarkeit der Prozesse und Parameterwerte in den ECOLEGO-Modellteil „Bodentransport“.

AP-2: Prüfung der Übertragbarkeit der Porenraummorphologie und der Hysterese (3D-HYDRUS) in den ECOLEGO-Modellteil „Bodentransport“.

AP-3: Abbildung der  $K_d$ -Wert-Variabilität im ECOLEGO-Modellteil „Bodentransport“ unter Einfluss von Mineralphasen, Organik und des pH-Wertes in Anlehnung an das „Smart- $K_d$ -Konzept“.

AP-4: Aufbau des Mehrschichtmodells zum Wasser- und RN-Transport unter schwankendem Wasserspiegel in Anlehnung an Lysimeterexperimente (LUH-IRS und FSU-AnGeo) und Validierung des ECOLEGO-Modellteils „Bodentransport“.

AP-5: Erweiterung des ECOLEGO-Modellteils „Pflanze“ im Hinblick auf die Ergebnisse der Experimente des HZDR-IRE und des LUH-IfB.

AP-6: Erweiterung des ECOLEGO-Modellteils „Dosisberechnung“; Berechnung der BDCF und die Dosisabschätzung über lange Zeiträume mit anschließender statistischer Analyse.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

AP-übergreifend: Kauf der aktuellen Version der Software ECOLEGO und Installation; Kick-off-Meeting mit Projektpartnern in Jena und weitere Online-Projektgespräche mit FSU-AnGeo, UB-IUP und LUH-IRS zum Projektfortschritt und Doktorandensuche sowie der Umlan-  
gung der Arbeiten.

Gemäß Zeitplan fokussierten derzeit die Arbeiten auf die Bearbeitung von AP1 und AP3:

AP1 - Projektgespräche mit FSU-AnGeo, UB-IUP und LUH-IRS zur Planung und Durchführung der Experimente in Lysimetern / Umlaufsäulen; insb. wie sind die Parameter der Modellierung sowie die Anfangs- und Randbedingungen unter Berücksichtigung des schwankenden Grundwasserspiegels in den Experimenten abbildbar. Es findet eine Revision der bislang entwickelten Modellversion zum Radionuklid-/Wassertransport durch den Bodenprofil statt und laufend Implementierung in die neue ECOLEGO-Version.

AP3 - Untersuchung der Abläufe der Sorptionskinetik unter Wasserspiegelschwankungen und des Einflusses der Variabilität der elementbezogenen  $K_d$ -Werte (zunächst basierend auf der Literatur und vorherigen Arbeiten)

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

AP-übergreifend: Planung des Follow-up-Arbeitsseminars zur neuen Version mit Fa AFRY – voraussichtlich Ende 2023 möglich.

AP1: Festlegung der zeitlichen Abläufe und der Parameter der Lysimeterexperimente mit schwankenden Wasserständen sowie der Umlaufsäulenexperimente und deren Implementierung in den ECOLEGO-Modellansatz.

AP3: Entwurf der  $K_d$ -Matrizen nach Vorbild des „Smart- $K_d$ -Konzepts in Form einer mehrdimensionalen „look-up table“ und deren Überführung in den ECOLEGO-Ansatz, zunächst Betrachtung des Einflusses von Organik auf die Sorption.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

TRANS-LARA (“Transport- und Transferverhalten langlebiger Radionuklide entlang der kausalen Kette Grundwasser-Boden-Oberfläche-Pflanze unter Berücksichtigung langfristiger klimatischer Veränderungen“), BMBF-Zuwendungsprojekt - Förderkennzeichen: 02NUK051E.

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437E
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Universität Bremen - Institut für Umweltphysik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse TP E: Geochemische Modellierung der in den Teilprojekten A und B untersuchten Systeme	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 31.10.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 307.989,64 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Matthias Günther	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> matthias.guenther@mevis.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil radioökologischer Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen zu RN-transport, -speziation und -partitionierung im Boden sowie der RN-aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelabscheidungen u.a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm Teilprojekt E

**AP-1:** Literaturstudie zum Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Bodenchemie von Pu, Am, I, Se, Tc, U, Eu und Cm.

**AP-2:** Integration der neuen RN in das UNISECS-Modell, Modellaktualisierung, Validierung.

**AP-3:** Sensitivitätsanalysen und Erstellung von  $K_d$ -Matrizen für den Unterboden, Vergleich der Ergebnisse für Eu mit denen von Am und Cm.

**AP-4:** Literaturstudie zu Pflanzenmetaboliten / Wurzelzone (soweit relevant für die geochemische Modellierung).

**AP-5:** Modellierung der Speziation und Partitionierung der RN U, Pu und Cm bzw. Eu außerhalb sowie innerhalb der Wurzelzone.

**AP-6:** Sensitivitätsanalysen und Erstellung von  $K_d$ -Matrizen für die Wurzelzone.

**AP-7:** Vergleich der Modellergebnisse mit experimentellen Daten, ggf. Modifikation der Modelle.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Nachdem keine Doktorandinnen bzw. Doktoranden gefunden werden konnten, wurde für die Durchführung des Arbeitsprogramms ein erfahrener wissenschaftlicher Mitarbeiter (Postdoc) gewonnen. Die Einstellung erfolgte am 01.05.2023.

Es wurde mit der Literaturstudie begonnen (AP 1). Das UNiSeCs-Modell wurde hinsichtlich der verwendeten Datenbasis (Thermochimie v11a) und PHREEQC-Version (3.7.3) aktualisiert und für die Elemente Am, Cs, Se, Pu und U neu validiert (AP2). Dazu wurde ein Batch-Tool zur Verarbeitung mehrerer Eingabedateien erstellt.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Weitere Überprüfung und Verfeinerung des UNiSeCs-Modells nach den Erkenntnissen aus der Literaturstudie (AP 1 und 2). Implementation der Sorptionsdaten für Eu und Cm und nach Möglichkeit Validierung anhand experimenteller Ergebnisse aus der Literatur (AP 2).

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Anschlussvorhaben zu Trans-LARA (Transport- und Transferverhalten langlebiger Radionuklide entlang der kausalen Kette Grundwasser-Boden-Oberfläche-Pflanze unter Berücksichtigung langfristiger klimatischer Veränderungen; FKZ 02NUK051D).

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

...

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9419
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fachhochschule Südwestfalen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> KernTrafo - Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2020 bis 31.08.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.809.494,90 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Ralf Lanwehr	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> lanwehr.ralf@fh-swf.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

KernTrafo konzentriert sich auf drei zentrale Herausforderungen des Rückbaus von Kernkraftwerken: Die geringe Motivation der Mitarbeiter:innen, die grundlegenden Veränderungen der Anforderungen und ein, trotz veränderter Aufgaben und Rahmenbedingungen, gleichbleibender Personalstamm.

### KernTrafo adressiert diese Themen in drei Projektkomponenten:

In PK 1, *KI-basierter Kompetenzmodellierung*, wurde Machine Learning verwendet, um Kompetenzcluster aus unstrukturierten Daten und internen Datenbanken zu identifizieren, die beschreiben, welche Kompetenzen derzeit im Demontageprozess notwendig sind. Diese werden mit den Fähigkeiten der vorhandenen Mitarbeitenden abgeglichen.

In PK 2, *Führung*, werden Führungskräfte auf die Führungsarbeit in einer komplexen Transformation vorbereitet.

Die PK 3 unterstützt Abteilungen und Teams dabei, im Veränderungsprozess ihre Zusammenarbeit zu reflektieren und diese stärkenorientiert zu optimieren.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### PK 1 besteht aus vier Hauptphasen:

1. Erzeugung einer nutzbaren Datenbasis
2. Entwicklung eines Algorithmus zur Identifikation sinnvoller und für den Rückbau relevanter Kompetenzcluster
3. Überführung des Algorithmus in einen Prototypen
4. Übergabe der Software an einen Verwertungspartner (peopleForecast GmbH) und Zusammenführen der Angebote

### PK2 besteht aus drei Hauptphasen:

1. Evaluation der aktuellen Führungskultur
2. Entwicklung und Pilotierung eines Führungskräfte-Trainingprogrammes und Schulung der Führungskräfte
3. Übergabe der Trainingskonzepte und Unterlagen an einen Verwertungspartner (AiNT GmbH)

PK3 besteht aus zwei Hauptphasen:

1. Entwicklung und Durchführung eines individualisierbaren Team Workshops für Mitarbeiter:innen
2. Übergabe der Trainingskonzepte und Unterlagen an einen Verwertungspartner (AiNT GmbH)

**3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm-  
punkten)

Meilensteinplanung: Administration

Der Aufstockungsantrag für dieses Projekt wurde genehmigt. Die Zusammenarbeit mit den Verwertungspartnern wurde aufgenommen. Die gemeinsame Vermarktung der Projektergebnisse und gemeinsame Auftritte auf den Konferenzen ICOND und Kontec werden vorbereitet.

Komponente 1: KI-basierte Kompetenzmodellierung

*Zusammenführung der Software mit Verwertungspartner*

Die Integration von Komponenten der entwickelten KernTrafo-Software in die eigene Entwicklung der peopleForecast GmbH ist in Vorbereitung. Aktuell laufen Abstimmungsgespräch, um die Integration sauber vorzubereiten.

*Publikation auf GitHub*

Das Gesamtprojekt soll als Open-Source-Projekt unter einer MIT Lizenz unter folgendem Link auf der GitHub Plattform veröffentlicht werden: <https://github.com/KernTrafo>. Die von RWE Nuclear bereitgestellten Datensätze sind aufgrund von DSGVO Richtlinien und der Vorgaben des Partners nicht Gegenstand der Veröffentlichung. Es werden aber die trainierten Modelle, die auf Basis öffentlich verfügbarer Daten entwickelt und um die von peopleForecast erweiterten Datenbasis entwickelt worden sind, ebenfalls bereitgestellt.

Die Ergebnisse der PK 1 sind bereits auf GitHub zugänglich.

*Algorithmus zur Detektion charismatischer Führungs-Taktiken*

Im Projektverlauf wurden die Führungskräfte des Kernkraftwerks Biblis in charismatischer Kommunikation trainiert. Dieses Konzept erwies sich im Kontext der Veränderungskommunikation als wertvoll. Um diese Ansätze noch ausweiten zu können, arbeiten die Teams der PK 1 und PK 2 aktuell gemeinsam daran, auf Grundlage von Banks et al. (2022) einen Algorithmus zur automatisierten Erkennung charismatischer Taktiken in Texten zu entwickeln. Vortragsprotokolle diverser Personen mit Führungsaufgaben wurden von zwei Kodierer:innen, die nicht über die Forschung des Teams informiert sind, auf charismatische Taktiken hin kodiert. Zusätzlich werden aktuell mit Hilfe von ChatGPT umfangreiche Textkorpora zu einzelnen Charisma-Taktiken (Antonakis et al., 2016) erstellt. Die daraus entstehenden annotierten Daten dienen dem Training des Algorithmus. So wird es in Zukunft beispielsweise möglich, den Grad des Charismas in der Präsentation einer Führungskraft automatisiert zu messen und direkt Feedback zu geben. Dieser Algorithmus kann nach dem Abschluss des Projekts sowohl in der Forschung als auch im Training von Führungskräften eingesetzt werden.

Komponente 2: Paradoxe Führungsstile

*Führungs-Trainings*

Das Führungskräfte-Modul "Charisma" wurde im April 2023 am Standort Biblis durchgeführt. Nach Absprache mit den Standortleitern der Kraftwerke Biblis und Gundremmingen ist die Trainingsdurchführung im Bereich Führung damit abgeschlossen.

*Durchführung der Führungskräfte Trainings innerhalb der RWE Nuclear:*

Führung Einsteiger:	1 x KKB - durchgeführt
Change-Management (Flexibilisierende Führung):	2 x KKB - durchgeführt 2 x KRB - durchgeführt
Persönlichkeit	2 x KKB - durchgeführt
Charisma & Motivation	1 x KKB - durchgeführt

Theoretische Inhalte der Module:

*Change-Management*

- Führen in verschiedenen Kulturdimensionen (Cameron, 2011)
- Umgang mit Paradoxien, z.B: Zielkonflikte. (Zhang et al., 2015)
- Change Ansätze (Romanelli and Tushman, 1994; Lewin, 1947; Kotter, 2012; Weick & Quinn, 1999)
- Theorien des Widerstands (Festinger, 1957; Schein, 1988; Oreg 2003)
- Zeitmanagement
- Fairnesswahrnehmung in der Veränderung von Organisationen (Folger et al. 1979; Skarlicki & Latham 1996)
- Motivation und Demotivation (Lencioni, 2002; Herzberg, 1998)

*Persönlichkeit*

- Grundlagen und Definitionen zum Thema Persönlichkeit (Gerrig, 2018)
- Das Big Five Persönlichkeitsmodell (Allport und Odbert, 1936)
- Verstehen der fünf Dimensionen der Persönlichkeit
- Auswirkungen von Persönlichkeit auf die Zusammenarbeit
- Verstehen der Ergebnisse des eigenen Persönlichkeitstests
- Transfer in den Arbeitsalltag
- Persönlichkeit im Team

*Charisma*

- Grundlagen und Definitionen zum Thema Charisma (Antonakis et al., 2016)
- Einführung in das Konzept des charismatischen Signalisierens
- Erkennen von charismatischen Taktiken in Texten und Videos
- Anwenden charismatischer Taktiken aus den Bereichen Frame (sprachliche Stilmittel) und Delivery (Gestik, Mimik, etc.)
- Erarbeiten einer Haltung als Führungskraft (persönliche Werte, Mission, Purpose, Ziele, etc.)
- Die Sichtweisen der Mitarbeitenden erkennen und artikulieren
- Halten mehrerer Trainings-Reden inkl. Video Aufzeichnung

Im Rahmen des Train-the-Trainer Ansatzes wurde zwei unabhängige Trainer auf die Durchführung der Führungskräfte Trainings bei der AiNT vorbereitet. Um eine gleichbleibende Qualität der Trainings sicherzustellen, wurden für jedes Training Trainerleitfäden erstellt, die zukünftigen Trainer:innen eine exakte Anleitung zur Durchführung der Trainings zur Verfügung stellen.

### *Veröffentlichung auf GitHub*

Die Inhalte des Charisma Trainings wurden bereits unter der CC BY 3.0 Lizenz in englischer Sprache auf GitHub veröffentlicht (<https://github.com/KernTrafo/Leadership>).

### Komponente 3: Team

Zehn Team-Workshops der PK 3 wurden wie geplant im Februar 2023, dem letzten ursprünglich geplanten Monat des Projekts KernTrafo, erfolgreich durchgeführt. Das Feedback der Teilnehmenden war exzellent.

Im Anschluss an die Durchführung wird das KernTrafo-Team auch hier sämtliche Unterlagen für die Publikation auf der Webseite aufbereiten, Trainerleitfäden schreiben und den Traineeinnen der AiNT ein individuelles Train-the-Trainer Konzept anbieten.

Gemeinsam mit den Inhalten der PK 2 werden auch die Inhalte der PK 3 in die Marktkommunikation aufgenommen.

## **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

### Komponente 1:

#### Zusammenführung der Software mit Verwertungspartner

Nach Abschluss der Integrationsplanung mit der peopleForecast GmbH müssen insbesondere die Module Datenaufnahme und -bereinigung sowie die entwickelten neuartigen ML Verfahren bedarfsangepasst übernommen werden. Da entwickelte ML Modelle immer nur für eine Problemstellung funktional sind, werden mittels 'Transfer Learning' Verfahren und weiterhin mittels sogenanntem 'Nachtrainieren' (Übertragung von ML Modellen in andere Domänen) Wege entwickelt, die sicherstellen, dass die Übertragbarkeit funktional und valide ist. Weiterhin existieren für die deutsche Sprache keine nennenswerten Verfahren zur Erkennung der Voreingenommenheit (auch: Bias; s. Beschreibung PK 1), was aber eine absolute Relevanz bei der Fusion von auf ML basierenden Systemen hat. Daher besteht eine der Kernaufgaben bei der Integration der Skillsoftware darin, sicherzustellen, dass die ML Modelle weiterhin objektive Entscheidungen treffen. Neben der Datensäuberung und -kuration ist die Implementierung und Testing dieses Schritts ein weiterer arbeitsintensiver Teil.

### Projektwebseite

Das gesamte Projekt soll auf einer Projektwebsite publiziert werden. Die Inhalte und Kernergebnisse werden hier erläutert und insbesondere eine Handreichung zur weiteren Verwendung bereitgestellt. Die im Rahmen der Forschung entwickelten neuartigen Verfahren (Deep Learning Ansätze, Bias-Detection) werden dargestellt und ihr Effekt auf mögliche andere Use Cases erläutert.

### Komponente 2:

Sämtliche in der PK 2 konzipierten Trainings sind auf die interne Nutzung innerhalb einzelner Standorte der RWE Nuclear GmbH ausgelegt. Das KernTrafo-Team arbeitet aktuell alle Trainingskonzepte so um, dass sie mit gemischten Gruppen aus verschiedenen Unternehmen durchführbar sind.

Die Trainingsunterlagen (Folien, Arbeitsblätter, etc.) sind bisher im Design der WIR Akademie der RWE Nuclear mit internen Schriftarten, Icons, etc. gestaltet. So wurde eine größere Nähe zu den Teilnehmer:innen erreicht. Aktuell werden sämtliche Unterlagen in neue, durch die

Fachhochschule Südwestfalen nutzbare Designs überführt. Diese Unterlagen werden sowohl an die AiNT übergeben als auch auf der KernTrafo Projektwebseite veröffentlicht.

### Komponente 3:

Auch hier werden aktuell sämtliche Unterlagen für die Publikation auf der Webseite aufbereitet, Trainerleitfäden geschrieben und die TrainerInnen der AiNT in einem individuellen Train-the-Trainer Konzept geschult.

Gemeinsam mit den Inhalten der PK 2 werden auch die Inhalte der PK 3 in die Marktkommunikation aufgenommen.

## **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

### KI-Komponente

Ausgehend von unseren Forschungsergebnissen konnten wir unser leistungsstärkstes Modell implementieren, um einige Anwendungen zu erstellen, z.B. Anwendungen zur Jobvorhersage auf der Grundlage von Beschreibungen von Benutzerkenntnissen und -fähigkeiten und die Anwendung zum Filtern von Lebensläufen von Kandidaten, die für Stellenausschreibungen geeignet sind. Wir haben die Leistung unseres Tools basierend auf diesen Ergebnissen verbessern können

### Publikationen

*Generating Synthetic Data for better Prediction Modeling in Skill Demand Forecasting in IEEE World Conference on Applied Intelligence and Computing 2023 (eingereicht)*

*Towards a Person-Job-Fit Recruitment: Job Prediction with Deep Neural Networks based on Various Pre-trained Models - IEEE ICDSA2023 (eingereicht)*

Language Models for Charisma Detection - (Einreichung geplant 2023)

Open-Source Large Language Models for Job Prediction - A survey and analysis (Einreichung geplant 2023)

### Paradoxe Führung

*Folgende Forschungsprojekte rund um das Thema Charisma sind in Arbeit/eingereicht*

- Wilms, R., Seif el Dahan, C. (2022). ( Are we on the same page? The moderating role of value congruence in the charismatic signaling–charismatic effect relationship. *Revise and Resubmit bei The Leadership Quarterly.*
- Wilms, R., Krügl, S., Seif el Dahan, C., Hüster, H. (2023). *Unlocking the charismatic effect: Higher self-efficacy and value of the leader’s cause are the key. In Arbeit*
- Krügl, S., Hüster, H., Wilms, R. (2023). *Real Leaders Emerge from Crises: A Study on Female and Male Governors’ Charisma in Times of the COVID-19 Crises. In Arbeit*

- Wilms, R., Krügl, S. (2023).  
Is charisma a costly signal? A Study on Ethical Misconduct in Crisis. In Arbeit

*Folgende Konferenzbeiträge zum Thema charismatische Führung wurden eingereicht*

European Association of Work and Organizational Psychology (EAWOP) Congress

- Wilms, R., Krügl, S., Hüster, H. Real Leaders Emerge from Crises:  
A Study on Female and Male Governors' Charisma in Times of the COVID-19 Crises.  
(Durchgeführt)
- Wilms, R., Seif el Dahan, C.  
Are we on the same page? The moderating role of value congruence in charismatic  
signaling-charismatic effects relationship. DOI: 10.31219/osf.io/s5q6d (Durchgeführt)
- Krügl, S., Seif el Dahan, C., Hüster, H.  
Learning Charisma 2.0: A Gamified Experience (Durchgeführt)

Interdisciplinary Perspectives on Leadership Symposium

- Wilms, R., Krügl, S. (2023) .  
Is charisma a costly signal? A Study on Ethical Misconduct in Crisis.(Durchgeführt)

*Publikationen im Umfeld Change Management*

- Krügl, S. (2022), Der (Un)Sinn von Purpose: Evidenzbasierte Ansätze zur Gestaltung von  
sinnhaftem Handeln in Unternehmen, Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift  
für Angewandte Organisationspsychologie (GIO). DOI: 10.1007/s11612-022-00628-7
- Seif el Dahan, C. (2022). Rezension zu: Grant, Adam M. (2021). Think Again. The Power  
of Knowing What You Don't Know. Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für  
Angewandte Organisationspsychologie (GIO), 53(2), 265–266.  
<https://doi.org/10.1007/s11612-022-00634-9>

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9426A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Ruhr-Universität Bochum – Fakultät für Psychologie	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Rückbaukompetenzen)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 722.252,15 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Annette Kluge	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Annette.kluge@ruhr-uni-bochum.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen ist ein kontinuierlicher und den ganzen Standort umfassender Veränderungsprozess und dadurch gekennzeichnet, dass sich neben der Anlage auch die Anlagenorganisation in einem ständigen Wandel befindet. Die dadurch bedingte erforderliche Veränderung von Organisations- und Arbeitsprozessen führt aus arbeits- und organisationspsychologischer Perspektive zu veränderten und erhöhten Anforderungen an die Kompetenzen der Mitarbeiter/innen sowie der Führungskräfte. Das Projekt der Verbundpartner/innen der Ruhr-Universität Bochum (RUB), der Gesellschaft für Simulatorschulung (GfS) und PreussenElektra (PEL) hat das Ziel, diese veränderten Rollen in den Rückbauphasen durch Trainingsmaßnahmen, basierend auf einer wissenschaftlichen Vorgehensweise zur Trainingsentwicklung, zielgruppenorientiert zu entwickeln und zu unterstützen. Dieses übergeordnete Ziel lässt sich weiter in Forschungs- und umsetzungsbezogene Ziele untergliedern. Das Forschungsziel beinhaltet die Erfassung der genauen Bedarfe an Trainingszielen und -methoden für die hier vorliegende Form organisationaler Veränderung und im Hinblick auf Rollenveränderungen in Bezug auf Strahlenschutz-, Brandschutz-, Arbeitsschutz- und Rückbauzielen sowie den gleichzeitigen Aufbau der dafür benötigten Kompetenzen. Die auf dieser Grundlage entwickelten Maßnahmen sollen dann das Ziel unterstützen, den Rückbau sicherer und effizienter zu gestalten und das Betriebspersonal für die Herausforderungen des Strahlenschutzes, der Arbeitssicherheit sowie der Unfallverhütung generell zu sensibilisieren, sowie effizienz- und projektorientiertes Denken bei schnelleren und flexibleren Entscheidungswegen bei geringerer Regelungstiefe zu fördern. Die umsetzungsbezogenen Ziele umfassen die Implementierung von wissenschaftlich entwickelten und evaluierten Trainingsangeboten für das am Rückbau beteiligte Personal der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte der Unternehmen (Betreiber und Fremdfirmen). Dabei sollen im Hinblick auf die antizipierten Entwicklungen der Digitalisierung in der Trainingswissenschaft und damit der zukünftigen Veränderungen von Trainingsmethoden die seminar-basierten Trainingsangebote um übungs- und erfahrungsbasierte Trainingsmethoden mit multimodalen Mixed Reality Anwendungen ergänzt werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Um der Vielseitigkeit des Themas (Nachbetrieb & Stilllegung, Abbau, Öffentlichkeitseinbindung, etc.) und dem Zusammenspiel der am Rückbau beteiligten internen Organisationseinheiten und externen Organisationen und Subunternehmen Rechnung zu tragen, gliedert sich das Vorhaben in vier Phasen:

- 1) Soll-/ Ist-Analyse
- 2) Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung
- 3) Maßnahmendurchführung
- 4) Maßnahmenevaluation und Bewertung der Wirksamkeit

Diese vier Phasen lassen sich weiter in 11 Arbeitspakete (AP) untergliedern:

- 1) Soll-/ Ist-Analyse:
  - AP1: Interviews mit ca. 20 Führungskräften von PEL mit Rückbauerfahrung (Thema: Veränderung der Rolle von Führungskräften und allgemeine Mensch-Technik-Organisation Aspekte)
  - AP2: Interviews mit 20-30 Mitarbeiter/innen sowie der Personalvertretung von PEL, die den Transitionsprozess erlebt haben (Thema: Veränderung der Mitarbeiter/innen-Rolle und allgemeine Mensch-Technik-Organisation Aspekte)
  - AP3: Auswertung schriftlicher Dokumente (Unfallberichte, Incident Alerts) aus dem Bereich Arbeitsschutz von PEL sowie meldepflichtige Ereignisse
- 2) Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung
  - AP4: Ableitung von Trainingszielen und -szenarien in Bezug auf Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte für die unterschiedlichen Rückbauphasen
  - AP5: Operationalisierung der Trainingsziele und erste Skizzierung der technischen und nicht-technischen Anforderungen an die digitalen Lernumgebungen
  - AP6: Auswahl und Festlegung von Trainingsmethoden (Virtual Reality via Head Mounted Display, Tablet-basiert oder Monitordarstellung) und Trainingsmedien sowie Ausarbeitung der Trainingsunterlagen.
  - AP7: Entwicklung der Trainingsdrehbücher und Implementierung der Lernumgebungen in Form multimodaler Anwendungen und Microlearning-Einheiten sowie Pretest der Trainingseinheiten für die Mitarbeiter/innen und Führungskräfte
- 3) Maßnahmendurchführung
  - AP8: Pilotdurchführung der entwickelten seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Mitarbeiter/innen der PEL, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung
  - AP9: Pilotdurchführung der seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Führungskräfte der PEL, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung
- 4) Maßnahmenevaluation und Bewertung der Wirksamkeit
  - AP10: Die in AP 8 und 9 durchgeführten Trainings werden formativ und summativ zu verschiedenen Zeitpunkten während des Trainings und nach dem Training mit Bezug zu den Trainingszielen (AP 4 und 5) evaluiert
  - AP11: Verbreitung der Ergebnisse auf Konferenzen und Kongressen

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse** (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Im Berichtszeitraum wurden die Micro Learning Module (AP7) entwickelt. Das Training wurde beim Informations- und Kommunikationsausschuss der PEL virtuell vorgestellt (14.03.23). Zusätzlich wurde das Training zweimal von und mit Mitarbeiter:innen von RUB und GfS im Hause der GfS pilotiert (22.03. – 24.03.2023 & 05.04.2023) sowie einmalig mit Mitarbeitern und Führungskräften von PEL (ebenfalls im Hause der GfS, 17.04. – 19.04.2023) (AP8 und 9).

Darüber hinaus fanden im Berichtszeitraum 8 bilaterale virtuelle Meetings zwischen RUB und GfS statt, ein weiteres virtuelles Meeting zwischen RUB, GfS und PEL.

### **4. Geplante Weiterarbeit** (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Aufgrund unerwarteter technischer Probleme in der Netzwerkkommunikation zwischen den Trainingsgeräten (Virtual Reality Headsets & Tablets) (siehe *7. Aufgetretene Probleme oder Schwierigkeiten*) verzögert sich die weitere Pilotierung des Trainings. Diese Probleme werden aktuell von der RUB bearbeitet. In KW 32 wird ein weiterer, interner Pilot mit Mitarbeiter:innen von RUB und GfS stattfinden in dem es zu eruieren gilt, inwieweit die technischen Herausforderungen gelöst werden konnten. Die Pilottrainings (AP8 und AP9) werden voraussichtlich ab September 2023 durchgeführt. AP 9 und 10 können erst nach Durchführung der Pilottrainings abgeschlossen werden.

### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2023 bis 30.06.2023		<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9426B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Gesellschaft für Simulatorschulung mbH		
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 19.315,26 €	
<b>Projektleiter/-in:</b> Michael Aman	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> m.aman@ksg-gfs.de	

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen ist ein kontinuierlicher und den ganzen Standort umfassender Veränderungsprozess und dadurch gekennzeichnet, dass sich neben der Anlage auch die Anlagenorganisation in einem ständigen Wandel befindet. Die dadurch bedingte erforderliche Veränderung von Organisations- und Arbeitsprozessen führt aus arbeits- und organisationspsychologischer Perspektive zu veränderten und erhöhten Anforderungen an die Kompetenzen der Mitarbeiter/innen sowie der Führungskräfte. Das Projekt der Verbundpartner/innen der Ruhr-Universität Bochum (RUB), der Gesellschaft für Simulatorschulung (GfS) und PreussenElektra (PEL) hat das Ziel, diese veränderten Rollen in den Rückbauphasen durch Trainingsmaßnahmen, basierend auf einer wissenschaftlichen Vorgehensweise zur Trainingsentwicklung, zielgruppenorientiert zu entwickeln und zu unterstützen. Dieses übergeordnete Ziel lässt sich weiter in Forschungs- und umsetzungsbezogene Ziele untergliedern. Das Forschungsziel beinhaltet die Erfassung der genauen Bedarfe an Trainingszielen und -methoden für die hier vorliegende Form organisationaler Veränderung und im Hinblick auf Rollenveränderungen in Bezug auf Strahlenschutz-, Brandschutz-, Arbeitsschutz- und Rückbauzielen sowie den gleichzeitigen Aufbau der dafür benötigten Kompetenzen. Die auf dieser Grundlage entwickelten Maßnahmen sollen dann das Ziel unterstützen, den Rückbau sicherer und effizienter zu gestalten und das Betriebspersonal für die Herausforderungen des Strahlenschutzes, der Arbeitssicherheit sowie der Unfallverhütung generell zu sensibilisieren, sowie effizienz- und projektorientiertes Denken bei schnelleren und flexibleren Entscheidungswegen bei geringerer Regelungstiefe zu fördern. Die umsetzungsbezogenen Ziele umfassen die Implementierung von wissenschaftlich entwickelten und evaluierten Trainingsangeboten für das am Rückbau beteiligte Personal der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte der Unternehmen (Betreiber und Fremdfirmen). Dabei sollen im Hinblick auf die antizipierten Entwicklungen der Digitalisierung in der Trainingswissenschaft und damit der zukünftigen Veränderungen von Trainingsmethoden die seminar-basierten Trainingsangebote um übungs- und erfahrungsbasierte Trainingsmethoden mit multimodalen Mixed Reality Anwendungen ergänzt werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Um dem vielschichtigen Vorhaben (Nachbetrieb & Stilllegung, Abbau, Öffentlichkeitseinbindung etc.) und dem Zusammenspiel der am Rückbau beteiligten internen Organisationseinheiten und externen Organisationen/Unternehmen Rechnung zu tragen, gliedert es sich in 4 Phasen:

- 1) Soll-/Ist-Analyse: Arbeitspakete (AP) 1-3
- 2) Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung: AP 4-7
- 3) Maßnahmendurchführung: AP 8+9
- 4) Maßnahmenevaluation und Bewertung der Wirksamkeit: AP 10+11

Die 4 Phasen gliedern sich in 11 Arbeitspakete.

AP 1: Interviews mit ca. 20 Führungskräften von PreussenElektra mit Rückbauerfahrung.

AP 2: Interviews mit 20-30 Mitarbeiter/innen sowie der Personalvertretung von PreussenElektra, die diesen Transitionsprozess erlebt haben.

AP 3: Auswertung schriftlicher Dokumente wie Unfallberichte und „incident alerts“ (ca. 10-15 pro Jahr) sowie weiterer Berichte (Arbeitsschutz PreussenElektra/meldepflichtige Ereignisse).

AP 4: Ableitung von Trainingszielen und -szenarien in Bezug auf Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen der Mitarbeiter/innen und Führungskräfte für die unterschiedlichen Rückbauphasen.

AP 5: Operationalisierung der Trainingsziele, die ebenso relevant sind für die Ableitung von formativen und summativen Evaluationsinstrumenten.

AP 6: Festlegung von Trainingsmethoden/Trainingsmedien (Virtual Reality Darstellung mit Datenbrille, Tablet-basierter oder Monitordarstellung) sowie Ausarbeitung der Trainingsunterlagen (Ziele s. AP 4).

AP 7: Entwicklung d. Trainingsdrehbücher und Implementierung der Lernumgebungen in Form der multimodalen Anwendung und der Microlearning-Einheiten sowie Pretest.

AP 8: Pilotdurchführung der entwickelten seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Mitarbeiter/innen der PEL, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung.

AP 9: Pilotdurchführung der seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Führungskräfte der PEL, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung.

AP 10: Evaluation der in AP 8 und 9 durchgeführten Trainings.

AP 11: Verbreitung der Ergebnisse auf Konferenzen und Kongressen.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogramm- punkten)

Die Phase 1 wurde abgeschlossen (AP 1 bis AP 3).

AP 1 ist abgeschlossen.

AP 2 ist abgeschlossen.

AP 3 ist abgeschlossen.

Phase 2: Zielgruppen- und zukunftsorientierte Maßnahmengestaltung: AP 4-7.

AP 4 ist abgeschlossen.

AP 5 ist abgeschlossen.

AP 6 ist abgeschlossen.

AP 7 - der Trainingsablaufplan sowie die Trainingsdrehbücher sind ausgearbeitet und fertiggestellt. Die Pilotdurchführung wurde durchgeführt.

#### **4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

Die Weiterarbeit orientiert sich an oben dargelegtem Arbeitsprogramm. Im kommenden Berichtszeitraum Q4 2023 & Q1 2024, werden AP8, AP9 und AP10 durchgeführt.

#### **5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Das Projekt hat Bezug zu den bereits vorhandenen Trainings im Bereich Human Factors und des Professionellen Handelns. In diesen Bereichen verbessern wir uns stetig und beschreiten neue Wege. Zu diesen Innovationen gehört auch das FORKA-Projekt.

#### **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Seitens der GfS sind noch keine Berichte und Veröffentlichungen erstellt worden.

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum  
**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)