

## Fortschrittsbericht

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

Berichtszeitraum

01. Juli - 31. Dezember 2020

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung





Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH

## Fortschrittsbericht

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

Berichtszeitraum  
1. Juli - 31. Dezember 2020

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. Die Anordnung der einzelnen Berichte 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>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
<b>01.</b>	<b>Zerlegeverfahren</b>	
15S9402A	Verbundprojekt: Hybride Schneidverfahren zum thermischen Trennen dickwandiger Reaktorbauteile unter Wasser - Teilprojekt: Grundlagenprozesse und Prozessentwicklung	6
15S9402B	Verbundprojekt: Hybride Schneidverfahren zum thermischen Trennen dickwandiger Reaktorbauteile unter Wasser - Teilprojekt: Entwicklung einer Prozesssteuerung für Hybrid-Trennverfahren unter Wasser	10
15S9408	Automatisierte Zerlegung von Reaktordruckbehältereinbauten mit Hilfe von Unterwasser-Lasertechnik	13
15S9415A	Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen Teilprojekt: Entwicklung eines innovativen Schneidwerkzeug-Demonstrators und eines Prüfverfahrens inkl. Prüfstand zur experimentellen Untersuchung.	16
15S9415B	Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen Teilprojekt: Konzeptionierung, Herstellung und Erprobung eines neuartigen Befestigungs- und Trägersystems, der Zustelleinheit sowie des Antriebs des Rohrintrenners.	19
15S9424	Produktives Seilschleifen von Stahl durch modellbasierte Prozessauslegung	
<b>02.</b>	<b>Dekontaminationsverfahren und Gebäudefreigabe</b>	
15S9409A	Verbundprojekt: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenfluenzverteilungen - Teilprojekt: Berechnung der Neutronenfluenzverteilung in reaktornahen Bauteilen und deren Validierung an Experimenten als Basis der Aktivitätsrechnungen	24
15S9409B	Verbundprojekt: Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts- und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenfluenzverteilungen - Teilprojekt: Entwicklung und Anwendung einer Rechenmethode zur genauen Bestimmung der Aktivitäts- und Dosisleistungsverteilung von KKW für optimalen Rückbau	27
15S9412	Wege zum effizienten Rückbau von Reaktorkomponenten und Betonabschirmung: Berechnung des Aktivitätsinventars und deren Validierung an Bohrkernen sowie Mobilitätsuntersuchungen von Radionukliden	31
15S9413A	Verbundvorhaben: "Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen"; Teilprojekt: „Verfahrensentwicklung zur Dekontamination und Konditionierung der Prozessmedien einschließlich Gewinnung/Herstellung und Charakterisierung von Betonproben	34
15S9413B	Verbundvorhaben: Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen - Teilprojekt: Verfahrensentwicklung zur Abtrennung von radioaktiv kontaminierten Zementstein mittels elektrohydraulischer Fragmentierung	37
15S9416A	Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Durchführung experimentelle Versuche und Auswertung an Versuchsmuster	42
15S9416B	Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	45
15S9416C	Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Detaillierung und Ausgestaltung der Versuchsmuster samt Einhausung mit Absaugung	48
15S9416D	Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) - Teilprojekt: Praxisversuche und Verifizierung	50

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
15S9418A	Verbund: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau (LaDeco) – Teilprojekt: Ermittlung von Sekundäremissionen bei der laserbasierten Dekontamination und Praxiserprobung	53
15S9418B	Verbund: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau (LaDeco) - Teilprojekt: Untersuchungen zur thermischen Zersetzung, zum Partikeltransport und zur Lackdetektion auf Betonoberflächen	56
15S9421A	Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kernkraftwerken - Teilprojekt: Verfahrenstechnik und Engineering	59
15S9421B	Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kraftwerken; Teilprojekt: Autonome Digitalisierung und Entschichtung von Baugruppen	63
15S9425A	Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilvorhaben: Parametervalidierung zum Tiefenschnitt von hochbewehrtem Stahlbeton und Erprobung eines neuartigen Anbaugeräts zur Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen	66
15S9425B	Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilvorhaben: „Konzeptionierung eines hochflexiblen Anbaugerätes als Prüfstand zur experimentellen Untersuchung für die Rissüberfräsung kontaminierter Wandstrukturen sowie Neukonzeptionierung eines Absaugsystems für den Materialabtransport	69
15S9425C	Verbundvorhaben: Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung Teilvorhaben: 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	72
<b>03.</b>	<b>Abfallbehandlung, Abfalldeklaration, Zwischenlagerung</b>	
15S9406A	Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Entwicklung und Bau der Messanlage	75
15S9406B	Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Methoden- und Softwareentwicklung	78
15S9406C	Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Online-Messungen des Neutronenflusses	81
15S9407A	Verbundprojekt: Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit - Teilprojekt: Entwicklung, Erprobung und Bewertung neuer Konditionierungsverfahren mit Nuklidseparation zur Volumenreduktion	84
15S9407B	Verbundprojekt: Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit - Teilprojekt: Entwicklung und Erprobung von Verfahrensansätzen zur Vergasung von Reaktorgraphit für die optimale Abtrennung radioaktiver Kontaminationen	87
15S9410A	VP: Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie - Teilprojekt: Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen	90
15S9410B	VP: Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie - Teilprojekt: Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie	94
15S9411	Verbesserung der quantitativen Datenauswertung für die zerstörungsfreie Charakterisierung radioaktiver Behälter und Objekte	97
15S9420	Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebände (EMOS)	100
15S9422A	Verbundprojekt: Virtual Remote Robotics for Radiometric Sorting, Teilprojekt: Intuitive VR/AV Multi-Robotersteuerung für ein anwendungsnahes Rückbauszenario	103
15S9422B	Verbundprojekt: Virtual Remote Robotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: Ortsaufgelöste radiologische Charakterisierung zur Sortierung	106

<b>Förderkenn- zeichen</b>	<b>Themenbereich</b>	<b>Seite</b>
15S9422C	Verbundprojekt: Virtual REMote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	109
<b>04.</b>	<b>Umwelt- und Strahlenschutz</b>	
15S9417	Umsetzung von Schwermetall-Landfarming zur nachhaltigen Landschaftsgestaltung und Gewinnung erneuerbarer Energien auf radionuklidbelasteten Flächen: Optimierungsstrategien (USER-II)	112
<b>05.</b>	<b>Mensch und Organisation</b>	
15S9401A	Verbundvorhaben: Sicherer und kosteneffektiver Rückbau (SIKOR) - Teilprojekt: Planung und Durchführung zuverlässiger Personalhandlungen	115
15S9401B	Verbundvorhaben: Sicherer und kosteneffektiver Rückbau (SIKOR) - Teilprojekt: Technische Risikoaspekte	119
15S9414A	Verbund: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter der Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) - Teilprojekt: Methodische Konzeptionierung	121
15S9414B	Verbund: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter der Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) Teilprojekt: Benutzeroberfläche und Schnittstellen	125
15S9419	Transformationskonzept für Personal von Kernkraftwerken im Rückbau (KernTrafo)	128
15S9426A	Verbundprojekt: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Kurztitel „Rückbaukompetenzen“)	132
15S9426B	Verbundprojekt: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Kurztitel „Rückbaukompetenzen“)	135

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9402A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Werkstoffkunde	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Hybride Schneidverfahren zum thermischen Trennen dickwandiger Reaktorbauteile unter Wasser (HugeCut)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2017 bis 31.10.2020	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 822.136,80 €
<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

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen stellt vor allem das automatisierte Trennen dickwandiger Bauteile unter Wasser eine technische Herausforderung dar. Nur wenige Verfahren sind in der Lage solche Bauteile robust und sicher zu zerlegen. Mechanische Schneidverfahren sind nur in Form von Sondermaschinen erhältlich und weisen große Nachteile bei den auftretenden Rückstellkräften auf. Da die Bauteile häufig in Einbaulage zerlegt werden müssen, können nur selten ausreichend steife und tragfähige Manipulatoren eingesetzt werden, wie sie beim Einsatz mechanischer Verfahren notwendig sind. Thermische Schneidverfahren bieten diesbezüglich verfahrenstechnische Vorteile. Von den thermischen Verfahren eignen sich vor allem das Plasmaschneiden sowie das autogene Brennschneiden für das Trennen dickwandiger Komponenten. Auf Grund der hohen radiologischen Belastung insbesondere von Bauteilen im Umfeld des Reaktordruckbehälters müssen diese Komponenten zur Erzielung einer ausreichenden Abschirmung unter einer Wasserabdeckung von mehreren Metern Höhe zerlegt werden. Im Rahmen des Projektes wird hierfür ein hybrides Schneidverfahren entwickelt, welches die prozessichere Zerlegung dieser Komponenten unter den gegebenen Randbedingungen ermöglichen soll.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Aufbauend auf der Literaturrecherche zu den bisherigen Anwendungen der Anwendung von thermischen Schneidverfahren im Rückbau sowie weiterführender Literaturrecherche und theoretischer Betrachtungen erfolgt die Auswahl potentiell geeigneter Vorwärmverfahren für den hybriden Brennschneidprozess. Im Rahmen praktischer Untersuchungen sowie unter der Zuhilfenahme von Simulation und Modellbildung erfolgt im Anschluss die Validierung der Wärmequellenauswahl. Aufbauend auf diesen grundlegenden Untersuchungen wird parallel zur Ausarbeitung des Lastenheftes für die fernhantierte thermische Zerlegung die Entwicklung der Prüfstände für die praktischen Untersuchungen vorangetrieben. Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen erfolgt die Verfahrensauswahl der für den Versuchsbrenner geeigneten Vorwärmverfahren.

Unter Berücksichtigung der bereits ermittelten Ergebnisse erfolgt die Erstellung des Pflichtenheftes für das Trennverfahren. Es schließt sich die Durchführung und Auswertung weiterer Versuche mit den ausgewählten Wärmequellen unter Berücksichtigung der Aspekte des Verfahrens-Pflichtenheftes an. Auf der Grundlage der in diesen Versuchen ermittelten Parameter der Wärmequellen erfolgt in enger Abstimmung mit dem Projektpartner NUKEM die Erstellung des Lasten- und Pflichtenheftes für den Demonstrator und hieran anschließend die Entwicklung

und der Bau des Demonstrators. Zum Abschluss des Projektes erfolgt die Qualifizierung des Demonstrators sowie eine Quantifizierung der erzielbaren Schneidleistungen.

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

Im AP11 wurden mit dem entwickelten Demonstrator, bestehend aus einem Autogenbrenner in Kombination mit einem Plasmabrenner, weitere Versuche zur Ermittlung der optimalen Betriebsparameter durchgeführt. Die durchgeführten Versuche zeigten deutlich, dass bis zu einer Materialstärke von 100 mm ein Trennen mit einer gemeinsamen Wirkzone der beiden Brenner möglich ist. Bei dieser Verfahrensvariante sind der Autogen- und der Plasmabrenner so ausgerichtet, dass sich die Flamme des Autogenbrenners und der Lichtbogen des Plasmabrenners schneiden. Dieser Schnittpunkt kann sich an der Werkstückoberfläche oder aber auch darunter befinden. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass ein aufeinander treffen der Flamme und des Lichtbogens, sowie diese umgebenden Gase, auf den Prozessbeginn einen starken Einfluss haben. Durch das gegenseitige Ablenken und Verwirbeln der Gase entsteht eine große und unsaubere Schnittfuge.

Die deutlich besseren Schnittverläufe konnten mit nacheinander geführten Brennern erreicht werden. Bei diesen Versuchen konnte durch kurzzeitigen Einsatz des Plasmalichtbogens das Material temporär aufgeschmolzen und somit ein hoher Wärmeeintrag in das Werkstück erzielt werden. Sobald das Werkstück auf Zündtemperatur gebracht wurde, kann der autogene Brennschneidprozess, ohne weitere Unterstützung durch eine zusätzliche Wärmequelle, durchgeführt werden. Ein derartig erzeugter Schnitt ist in Abbildung 1 dargestellt. Im rechten Bereich ist der Anschnitt, welcher mit Unterstützung des Plasmalichtbogens durchgeführt wurde zu erkennen.

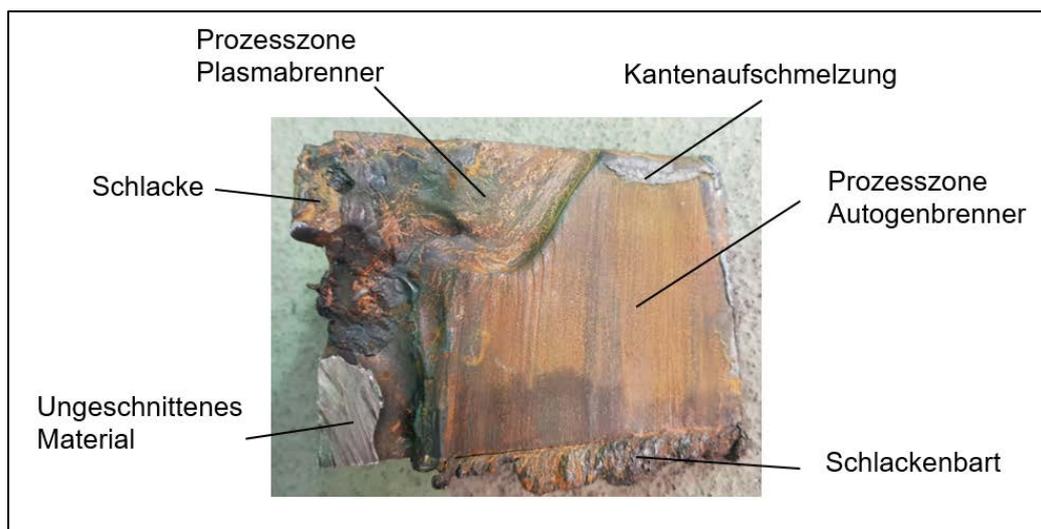


Abbildung 1: Seitliche Schnittfuge beim UW-Schneiden von 100 mm Stahl mittels hybridem Schneidverfahren

In diesem Bereich treten deutliche Auswaschungen auf, da das bereits vom Plasmalichtbogen aufgeschmolzene Material durch den Sauerstoffstrahl des Autogenbrenners teils unverbrannt aus der Schnittfuge getrieben wird. Durch den Versatz der beiden Brenner ist es möglich nach dem Ausschalten des Plasmalichtbogens die so eingebrachte Energie für den autogenen Brennschneidprozess zu nutzen und somit einen gleichmäßigen Schnitt mit leichtem Rillennachlauf zu erzeugen. Mit diesen Einstellungen ist es möglich Werkstücke mit einer Dicke

von bis zu 140 mm zu trennen. Mit zunehmend tieferem Eingriff in das Material ließ sich sowohl eine Stabilisierung des Prozesses sowie eine höhere Schnittqualität feststellen. Diese beiden Faktoren zeigen deutlich, dass die Wärmeverluste im Randbereich eines Werkstückes unter Wasserüberdeckung deutlich höher sind als im Vollmaterial. Dennoch ist es mit diesem Verfahren bisher nicht immer möglich reproduzierbare Schnitte herzustellen. Mehrere Faktoren deuten auf die Prozessgase hin, die sich mit dem bisher verwendeten Aufbau nur ungenau einstellen lassen. Um diese Unsicherheit im Prozess auszuschließen wird die Gasregelung noch einmal näher betrachtet.

Für eine stabile Autogene-Heizflamme unter Wasser haben sich insbesondere bei der Nutzung von Propan als Brenngas Besonderheiten bei der Gasmengeneinstellung ergeben. Der an Luftatmosphäre sehr robuste Prozess ist unter Wasser nur in einem engen Parameterfenster stabil. Unter Wasser steht nur der direkt über Medienleitungen zugeführte Sauerstoff zur Verbrennung zur Verfügung. Die an Luftatmosphäre auftretenden Ausgleichsprozesse mit dem Umgebungssauerstoff sind unter Wasser nicht möglich.

Die notwendige Länge der Medienleitungen für die Gase stellt eine weitere Störgröße bei der Flammeneinstellung dar. Die benötigten flexiblen Schläuche stellen bei den benötigten Mediendrücken einen Druck- und Volumenpuffer dar und verursachen eine verzögerte Systemantwort auf geänderte Einstellgrößen. Mit bereits vorhandener Messtechnik war eine teilweise Erfassung der Gasvolumenströme des Autogenprozesses möglich. Da diese allerdings auf Prozesse mit geringerem Leistungsprofil ausgelegt sind und nur Messungen aber keine Regelung möglich sind, konnten die Effekte der Systemträgheit und der problematischen Wiederholbarkeit von Einstellparametern beschrieben aber nicht kompensiert werden. In Kooperation mit der NUKEM wurde ein Konzept zur Volumenstromregelung erarbeitet. Zur Anwendung kommen hierbei thermische Massendurchflussregler, die eine funktionale Erweiterung der am UWTH bereits genutzten Massendurchflussmesser darstellen. Die Regler stellen über ein Magnetventil den internen Strömungsquerschnitt auf Grundlage des ermittelten Momentandurchflusses ein, sodass ausgangsseitig ein stabiler Volumenstrom dargestellt werden kann.

Für UWTH und NUKEM liegen unterschiedliche Anforderungen an die Ansteuerung der Volumenstromregelung vor. Das UWTH benötigt im Versuchsbetrieb manuelle Einstell- und Eingriffsmöglichkeiten, um einzelne Parameter während der Versuche flexibel verändern zu können. Die NUKEM benötigt die Option zur Integration der Volumenstromregelung in die übergeordnete Prozesssteuerung. Es wurden mehrere Schnittstellenoptionen geprüft und die RS485 Schnittstelle als gemeinsame Arbeitsgrundlage gewählt. Die RS485 Spezifikation ist in der Industrie weit verbreitet und gut beherrscht. Die Gasmassenstromregler sind mit dieser Schnittstellenoption ab Werk ausgerüstet und können über diese sowohl ihre Sollwertvorgabe erhalten als auch Messwerte zurückliefern. Am UWTH wurde parallel zur Beschaffung bereits mit dem Bau und der Programmierung einer mikrocontrollerbasierten Steuerung für Massendurchflussregler begonnen.

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

- In AP11 soll die Durchführung der geplanten Versuchsreihe mit den beiden Hybridprozessen beendet werden. Die Parameterfenster für einen stabil ablaufenden, hybriden thermischen Trennprozess sollen zunächst unter einer Wasserüberdeckung von ca. 0,5 m ermittelt werden.
- Die bereits gelieferten Hydrophone sollen in AP11 genutzt werden, um Schalldaten im hörbaren Frequenzbereich untersuchen zu können.
- Nach der Ermittlung der optimalen Prozessparameter werden in AP 11 Partikel- und Aerosol-Messungen durchgeführt. Dafür muss die vorgesehene Messtechnik aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Zudem soll mit der Massenspektrometereinheit der Bruker G4 Phoenix DH der diffusibel gebundene Wasserstoff im Werkstück gemessen werden.
- Kontinuierliches Erfassen der durchgeführten Arbeiten sowie Aufbereitung der Mess- und Analyseergebnisse zur Erstellung der in AP12 vorgesehenen Dokumentation.

#### **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> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9402B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> NUKEM Technologies Engineering Services GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Hybride Schneidverfahren zum thermischen Trennen dickwandiger Reaktorbauteile unter Wasser  Teilprojekt: Entwicklung einer Prozesssteuerung für Hybrid-Trennverfahren unter Wasser	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2017 bis 30.04.2021	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 98.856,11 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Klaus Büttner	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Klaus.buettner@nukemtechnologies.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

In einer Kooperation des Instituts für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover (IW) und der NUKEM Technologies Engineering Services GmbH werden im Rahmen des Verbundprojektes "Hybride Schneidverfahren zum thermischen Trennen dickwandiger Reaktorbauteile unter Wasser" (HugeCut) Hybridverfahren zum thermischen Trennen unter Wasser qualifiziert.

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen stellt vor allem das automatisierte Trennen dickwandiger Bauteile unter Wasser eine technische Herausforderung dar. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von leistungsfähigen Trennverfahren zum Schneiden von dickwandigen metallischen Komponenten unter Wasser. Von den thermischen Verfahren eignen sich vor allem das Plasmaschneiden sowie das autogene Brennschneiden für das Trennen dickwandiger Komponenten. Der Einsatz des autogenen Brennschneidens unter Wasser stellt durch die höheren Wärmeverluste und die damit verbundene Prozessinstabilität eine deutlich größere Herausforderung dar. Die Prozesssicherheit des autogenen Brennschneidens beim Trennen dickwandiger Bauteile unter Wasser kann durch die Steigerung der Leistung der für die Vorwärmung eingesetzten Wärmequelle oder den Einsatz einer zusätzlichen Wärmequelle optimiert werden.

Anhand von theoretischen Betrachtungen und praktischen Untersuchungen werden quantifizierbare Aussagen über die Prozessstabilität und den Einfluss der Prozessparameter ermittelt. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen werden Schneidprozesse ausgewählt, welche die hohe Schneidtiefe des autogenen Brennschneidens mit der für die Fernhandlung des Verfahrens erforderlichen hohen Prozesssicherheit verbinden. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in der Entwicklung eines Prototypen umgesetzt und eine Prozessüberwachung mit zugehöriger Prozessregelung entwickelt. Ziel ist die Umsetzung in einer Demonstratoranlage, die reproduzierbare Trennschnitte an Bauteilen mit Materialstärken zwischen 130mm und 500mm ermöglicht.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP1: Literaturrecherche zur bisherigen Anwendung von thermischen Schneidverfahren im Rückbau
- AP2: Ableiten der realen Zerlegebedingungen / Zerlegeumfeld
- AP3: Betrachtung und Auswahl geeigneter Wärmequellen zur Vorwärmung anhand von Literaturrecherche und theoretischen Betrachtungen
- AP4: Praktische Untersuchungen und Simulation / Modellbildung zur Validierung der Wärmequellenauswahl
- AP5: Lastenheft fernhantierte thermische Zerlegung
- AP6: Prüfstandentwicklung für die praktischen Versuche
- AP7: Pflichtenheft für das zu entwickelnde Verfahren
- AP8: Durchführung und Auswertung der Versuche mit den ausgewählten Wärmequellen
- AP9: Prototypentwicklung und -bau
- AP10: Qualifizierung des Prototyps
- AP11: Dokumentation

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

Bedingt durch die Corona Situation konnte eine direkte Teilnahme an den Schneidversuchen (AP10: Qualifizierung des Prototyps) mit dem gemeinsam mit UWTH entwickelten Prototyp nicht realisiert werden. Stattdessen wurde an verschiedenen Schneidversuchen mit unterschiedlichen Konstellationen des Vorwärm- bzw. Schneidbrenners virtuell teilgenommen.

Die im Zuge dieser Versuche erzielten Schnittverläufe wurden anschließend diskutiert, Möglichkeiten zur Verbesserung der Schnitte vereinbart und in weiteren Versuchsreihen ausprobiert. Ein deutlich besserer Schnittverlauf konnte dabei mittels nacheinander geführter Brenner erreicht werden. Allerdings waren bisher die erzielten Ergebnisse nicht immer reproduzierbar.

Zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit wurden Veränderungen an der Regelung der verschiedenen am Schneidprozess beteiligten Gase vereinbart. Dabei wurden maßgeblich folgende Einflussmöglichkeiten betrachtet:

- Menge an Sauerstoff, der für eine stabile Autogen-Heizflamme unter Wasser notwendig ist. Insbesondere da der Ausgleichsprozess, der an Luft stattfindet, unter Wasser nicht vorhanden ist.
- Minimierung der Länge der Medienleitungen zwischen letztem Regeleingriff und Brenner, um Verzögerungen bei der Systemantwort zu begrenzen.
- Bessere Erfassung / Regelung der einzelnen Gasvolumenströme beim Autogenprozess.

In Zusammenarbeit mit der UWTH wurden die vorhandenen Massendurchflussmesser mit Massendurchflussreglern ergänzt. Diese können über ein Magnetventil auf Grundlage des gemessenen Massendurchflusses den ausgangsseitigen Volumenstrom genauer definieren und regeln. Durch die genauere Einstellbarkeit des Sollwertes soll die Reproduzierbarkeit der jeweiligen Einstellungen der verschiedenen Parameter für den Schneidprozess verbessert werden und somit die Reproduzierbarkeit des gesamten Schneidprozesses.

Außerdem wurde mit der UWTH die Anforderung an die Steuerung des Schneidvorgangs zur Einbindung in eine übergeordnete Steuerung diskutiert. Als Ergebnis wurde eine RS485 Schnittstelle gewählt, die weit verbreitet ist und dadurch für eine industrielle Anwendung gut geeignet erscheint.

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

- Unterstützung bei der weiteren Durchführung (AP 10) der geplanten Versuchsreihen mit den beiden Hybridprozessen, die in der nächsten Berichtsphase beendet werden sollen.
- Interpretation der mit den von Nukem bereits gelieferten Hydrophonen von UWTH ermittelten Schalldaten im hörbaren Frequenzbereich.
- Auswertung der nach der Ermittlung der optimalen Prozessparameter in AP 10 von UWTH durchgeführten Partikel- und Aerosol-Messungen.
- Erstellung der in AP11 vorgesehenen Dokumentation.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine Veröffentlichungen im Berichtszeitraum

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9408
<b>Zuwendungsempfänger / Auftragnehmer:</b> Laser Zentrum Hannover e.V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Automatisierte Zerlegung von Reaktordruckbehältereinbauten mit Hilfe von Unterwasser-Lasertechnik (AZULa)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2020 (Verlängert bis zum 31.01.2021)	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 384.537,62 €
<b>Projektleiter:</b> Dr.-Ing. SFI Jörg Hermsdorf	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> j.hermsdorf@lzh.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgt eine Machbarkeitsstudie, ob sich das Laserstrahlschneiden unter Wasser für den effizienten Reaktorrückbau einsetzen lässt. Die Ziele der Machbarkeitsstudie liegen in der Entwicklung eines Laserstrahlschneidprozesses sowie der konstruktiven Auslegung bzw. dem Bau eines kompakten Schneidkopfes für den Einsatz in einer radiologisch aktivierten und kontaminierten Umgebung unter Wasser für den direkten Rückbau von kerntechnischen Anlagen. Das Laserstrahlschneiden ermöglicht Prozessverbesserungen gegenüber herkömmlich eingesetzten Schneidverfahren, wie beispielsweise Wasser-Abrasiv-Suspensions-Schneidverfahren (WASS) oder Sägetechniken. Vorteile liegen in der verschleiß- und kraftfreien Bearbeitung sowie der teilweisen Bindung des Schnittfugenmaterials an der Austrittsseite. Der Aufwand für die abschließende Beckenboden-Reinigung ist damit geringer. Die Entstehung von Sekundär oder Technologieabfällen, die zusätzlich entsorgt werden müssen, wie zum Beispiel beim WASS oder bei Sägetechniken kann deutlich vermindert werden. Ein Verklemmen des Werkzeugs, wie es beispielsweise bei Sägetechniken auftreten kann, ist beim Laserstrahlschneiden nicht existent, wodurch die Prozesszeiten verkürzt werden.

## 2. Durchführungskonzept / Arbeitsprogramm

Zeitgleich mit der Definition durchzuführender Maßnahmen zur Lasersicherheit (AP5) und der Spezifikationen der möglichen Schneidaufgaben und der Randbedingungen für den Einsatz des Laserprozesses (AP1) wird am Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH) damit begonnen einen Versuchsstand für das Unterwasserschneiden im Labormaßstab aufzubauen (AP2). Mit Abschluss von AP1 wird mit dem Design und Bau der Schneidoptik begonnen (AP4). Zeitgleich werden mithilfe einer bereits erprobten Schneidoptik auf die Schneidaufgabe (Edelstahl in 3, 6 und 15 mm Stärke und Zircaloy in 3 mm Stärke) abgestimmte Vorversuche durchgeführt (AP3). Sobald die neue Schneidoptik zur Verfügung steht, werden die Ergebnisse aus AP3 in die Prozessentwicklung mit der neu entwickelten Schneidoptik übertragen (AP6). Begleitend zu AP3 und AP6 wird mit der Emissionsanalyse (AP7) sowie der Auslegung eines Sensorsystems zur Schneidüberwachung (AP8) begonnen. Nach Abschluss der vorangegangenen APs wird das Gesamtsystem in einem großen Tauchbecken in 4-6 m Wassertiefe validiert (AP9).

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP8 (Sensorsystem): Um ein Photodiodensignal für die Durchtrennungskontrolle einsetzen zu können, mussten zunächst Einflüsse auf das Signal durch die Prozessparameter selbst erkannt werden. Die aufgezeichneten Photodiodensignale korrelieren insbesondere mit der Laserleistung, eine gewisse Beeinflussung ergibt sich jedoch bei nahezu jeder Parametervariation. Für eine verlässliche Detektion können dementsprechend nur Signale beim Schneiden mit derselben Parameterkonfiguration verglichen werden.

Neben der kontinuierlichen Erfassung der Emissionssignale während der Schneidversuche wurden mit ausgewählten Parametersätzen Proben mit Stufenprofil geschnitten. In Abbildung 1 ist eine entsprechende Probe exemplarisch dargestellt. Die Stärke des Rohmaterials beträgt 15 mm, die Tiefe der Stufen jeweils 3 mm. Visuell ist die mangelnde Durchtrennung an den Materialauswürfen an der Probenoberseite erkennbar. Anhand des Photodiodensignals ist die fehlende Durchtrennung ab der zweiten Stufe (9 mm Materialstärke) anhand des Erreichens deutlich höherer Pegelspitzen sowie einer starken Erhöhung der Standardabweichung des Signals zu detektieren.

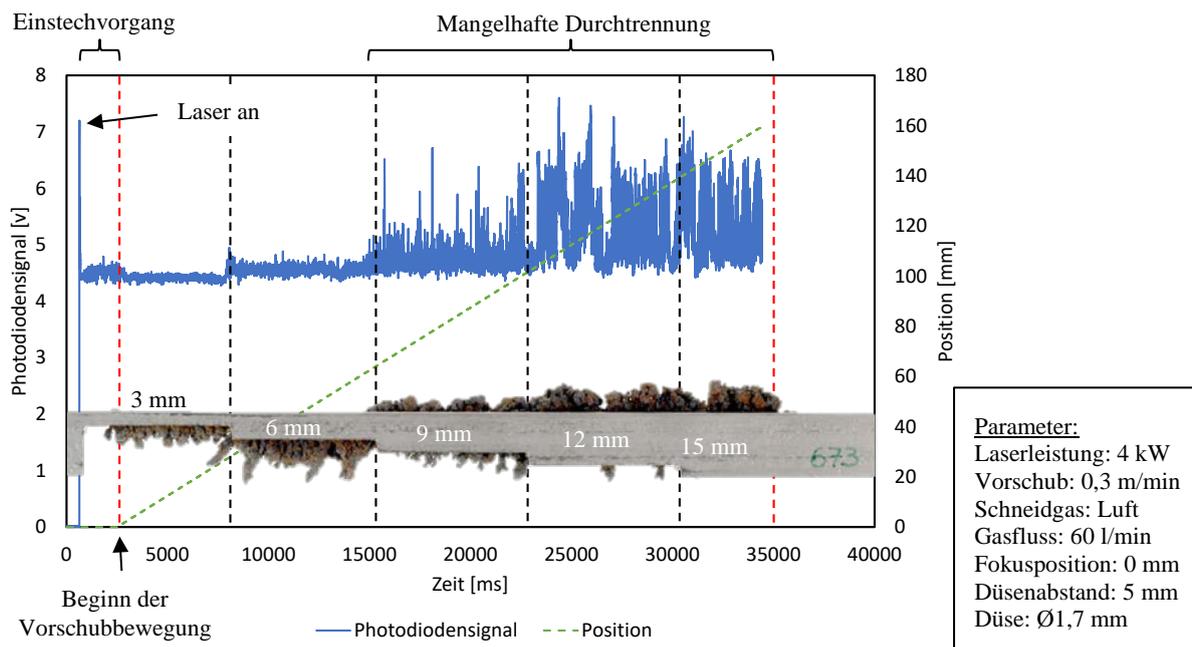


Abbildung 1: Seitliche Aufnahme einer 15 mm starken 1.4301 Probe die in 3 mm Stufen ausgefräst wurde, mit Photodioden- und Positionssignal beim Schneiden mit den angegebenen Parametern (exemplarisch).

AP9 (Validierung): Im Rahmen der Validierungsversuche konnte die neue Schneidoptik in 4 m Wassertiefe in einem Tauchbecken im Unterwassertechnikum Hannover getestet werden. Die Schneidoptik wurde hierfür liegend auf einem unterwassertauglichen Achssystem montiert und an einen mobilen Scheibenlaser gekoppelt (Abbildung 2). Betrachtet wurde mit diesem Versuchsaufbau das Trennen von 1.4301 in den Materialstärken 3 und 15 mm. Beide Materialstärken konnten während der Versuche erfolgreich getrennt werden. Im Rahmen der Versuche mit dem 15 mm starken Material konnten unterschiedliche Parametervariationen getestet und somit eine maximale Schneidgeschwindigkeit von 3 m/min bei einer Laserleistung von 4,5 kW und 5 bar Schneidgasdruck (Luft) umgesetzt werden.

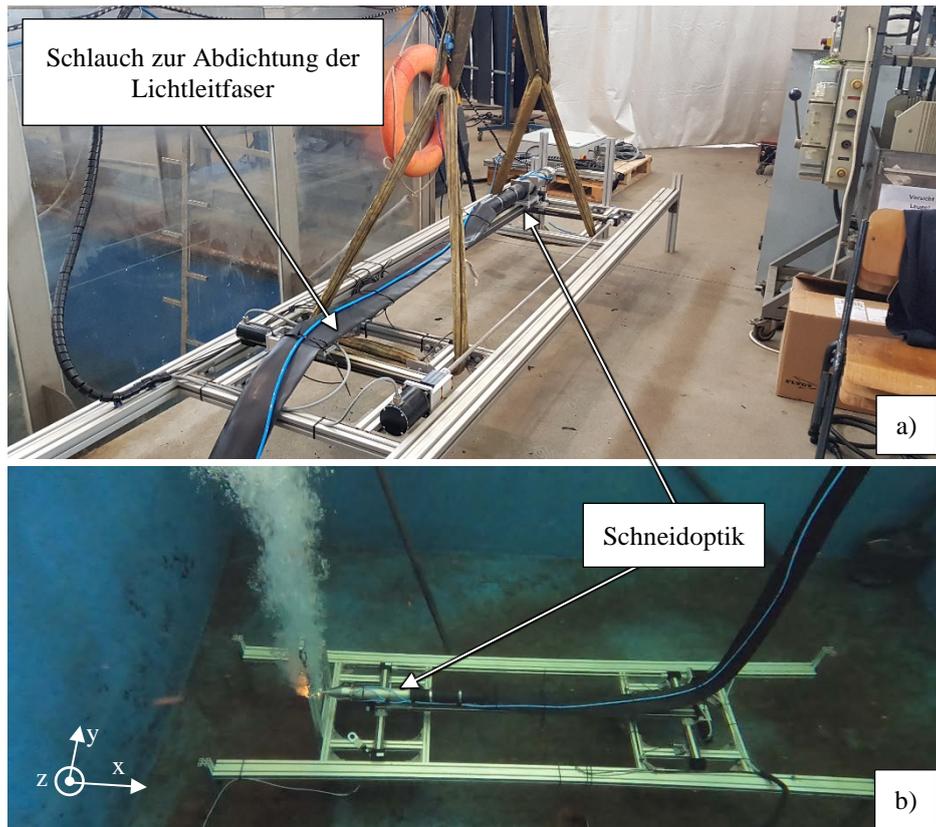


Abbildung 2: Auf dem Achssystem montierter Schneidkopf, a) während der Montage außerhalb des Beckens, b) während des Schneidprozesses im Wasserbecken. Schneidrichtung entlang der y-Achse.

#### 4. Geplante Weiterarbeit

Auswertung/Abschluss der letzten ausstehenden Versuche.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es liegt bislang kein Bezug zu anderen Vorhaben vor.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Über das Projekt AZULa wird auf der Webseite des Laser Zentrum Hannover e.V. berichtet (<https://www.lzh.de/de/publikationen/pressemitteilungen/2019/effizienter-reaktorrueckbau-durch-laserstahlschneiden>).

Zudem wurden Projektergebnisse bei der Konferenz LANE 2020 vorgestellt und in diesem Rahmen in einem CIRP Paper veröffentlicht (<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.170>). Weitere Veröffentlichungen/Vorträge sind beim Schneidkongress 2021 (20.-22. April 2021) und bei der KONTEC 2021 (25.-27. August 2021) angemeldet.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9415A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen Teilvorhaben: Entwicklung eines innovativen Schneidwerkzeug-Demonstrators und eines Prüfverfahren inkl. Prüfstand zur experimentellen Untersuchung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 886.209,60 € (inkl. Projektpauschale)
<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

Das Gesamtziel im Verbundvorhaben „Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen“ in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH ist die Entwicklung einer innovativen und wettbewerbsfähigeren Rohrintrennvorrichtung mit großem Anwendungsspektrum im Hinblick auf Rohrdurchmesser, Wandstärke und Material. Zusätzlich zum reinen Trennen und Abtransportieren der Leitungen ist ebenfalls vorgesehen eine Möglichkeit für einen vorlaufenden Reinigungsvorgang zu entwickeln. Anfallende Späne oder andere Reststoffe sollen dabei kontinuierlich abgesaugt werden.

Neben der Demontage schwer zugänglicher Rohrleitungen (beispielsweise einbetonierte, nicht auf voller Länge überbohrbare Leitungen) soll die Demontage sowohl an Luft als auch unter Wasser möglich sein. Zum flexiblen Einsatz soll die Bedienung manuell oder fernhantiert möglich sein. Auch das Einbringen in das zu trennende Rohr soll manuell oder fernhantiert erfolgen. Das System ist dabei so konzipiert, dass es nach einer Anwendung dekontaminiert werden kann, um es universell einsetzen zu können. Durch die hohe Flexibilität und die universelle Einsetzbarkeit können viele Arbeitsstunden für die Entwicklung und Konstruktion spezieller Einzellösungen eingespart werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP0: Lastenheft und Prozessanalyse – Projektbegleitende Beratung
- AP1: Lastenheft und Prozessanalyse
- AP2: Aufbau eines Versuchstandes nach Bauplan
- AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebsystems
- AP4: Experimentelle Versuche (1. Versuchsreihe)
- AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines neuartigen Trägersystems
- AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe)
- AP7: Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP8: Entwicklung und Konstruktion eines Werkzeug-Demonstrators
- AP9: Zusammenführung der Teilentwicklungen

AP10: Analyse der Messungen, Bewertung und Optimierung/Verifikation und Zertifizierung mittels Praxisversuchen (3. Testreihe)

AP11: Dokumentation

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

Aktuell läuft am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) die experimentelle Versuchsreihe (AP4).

#### AP4: Experimentelle Versuchsreihe

Am TMB wurde die experimentelle Versuchsreihe (1. Testreihe) mit handelsüblichen Trennwerkzeugen begonnen. Der hierfür verwendete Versuchsplan wurde mit Hilfe der Datenanalysesoftware „JMP“ erstellt. Bei der Testreihe kamen ein Scheibenfräser der Marke „Garant“, Kreissägeblätter der Marke „Re-Bo“ und Trennscheiben der Marke „Garant“ bzw. Tyrolit“ zum Einsatz. Variiert wurden die Vorschubgeschwindigkeit und die Drehzahl.

Nach Beginn der Testreihe hat sich jedoch herausgestellt, dass die Schwingungen des Versuchstandes während der Versuchsdurchführung zu groß sind und dieser durch weitere Streben verstärkt werden muss. Folglich musste die 1. Testreihe unterbrochen werden, da die Ergebnisse durch die Schwingungen verfälscht waren. Zudem hat sich gezeigt, dass die Anbringung eines weiteren Kraftsensors unter dem Motorblock, welcher die Trennwerkzeuge antreibt, erforderlich ist um die Daten präziser messen zu können.

Die notwendigen Änderungen zur Aussteifung des Versuchstandes wurden von den technischen Mitarbeitern umgesetzt und die zusätzliche Sensorik zur Kraftmessung ausgesucht und bestellt. Die hierfür erforderlichen Aufnahmen wurden von den Werkstattmitarbeitern gefertigt.

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

#### AP4: Experimentelle Versuche (1. Testreihe)

Ab Ende Januar 2021 wird die experimentelle Versuchsreihe (1. Testreihe) fortgesetzt und die Ergebnisse ausgewertet. Ziel ist es, die wesentlichen Einflussparameter für den Werkzeugdemonstrator zu bestimmen. Es muss u.a. untersucht werden, welches Trennverfahren sich am besten zur Rohrintrennung eignet und wie sich die Variation der Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeit etc. auf den Trennprozess, das Verschleißverhalten und die Kraftübertragung auswirkt. Zudem gilt es zu analysieren, ob Unterschiede zwischen nahtlosen und geschweißten Rohren bzw. zwischen den verschiedenen Werkstoffen bestehen. Die Schnitte mit den einzelnen Trennwerkzeugen werden hierzu im Anschluss an den Trennprozess mit einem Laserscanner aufgenommen und die einzelnen Profile in 2D und 3D analysiert.

AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe) unterschiedlicher Betriebsparameter

Im Anschluss an die 1. Testreihe soll die 2. Versuchsreihe mit dem entwickelten Werkzeugdemonstrator von NIS erfolgen.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Für das Jahr 2021 ist bei der Kontec (25.08-27.08/ Dresden) ein Kurzvortrag und bei der DEM (13.09-15.09/ Avignon) eine Posterpräsentation vorgesehen. Der eingereichte Abstract bei der Kontec wurde bereits angenommen, die Rückmeldung für den geplanten Beitrag bei der DEM steht noch aus.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9415B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen. Teilvorhaben: Konzeptionierung, Herstellung und Erprobung eines neuartigen Befestigungs- und Trägersystems, der Zustelleinheit sowie des Antriebs des Rohrintrenners.	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 176.270,80 € (Anteilfinanzierung)
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Carmen Isabella Krau	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:carmen.krau@siempelkamp-nis.com">carmen.krau@siempelkamp-nis.com</a>

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel im Verbundvorhaben „Entwicklung eines neuartigen, universellen Rohrintrenners für die Demontage von (kontaminierten) Rohrleitungen“ in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH ist die Entwicklung einer innovativen und wettbewerbsfähigeren Rohrintrennvorrichtung mit großem Anwendungsspektrum im Hinblick auf Rohrdurchmesser, Wandstärke und Material. Zusätzlich zum reinen Trennen und Abtransportieren der Leitungen ist ebenfalls vorgesehen eine Möglichkeit für einen vorlaufenden Reinigungsvorgang zu entwickeln. Anfallende Späne oder andere Reststoffe sollen dabei kontinuierlich abgesaugt werden.

Neben der Demontage schwer zugänglicher Rohrleitungen (beispielsweise einbetonierte, nicht auf voller Länge überbohrbare Leitungen) soll die Demontage sowohl an Luft als auch unter Wasser möglich sein. Zum flexiblen Einsatz soll die Bedienung manuell oder fernhantiert möglich sein. Auch das Einbringen in das zu trennende Rohr soll manuell oder fernhantiert erfolgen. Das System ist dabei so konzipiert, dass es nach einer Anwendung dekontaminiert werden kann, um es universell einsetzen zu können. Durch die hohe Flexibilität und die universelle Einsetzbarkeit können viele Arbeitsstunden für die Entwicklung und Konstruktion spezieller Einzellösungen eingespart werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP0: Lastenheft und Prozessanalyse – Projektbegleitende Beratung
- AP1: Lastenheft und Prozessanalyse
- AP2: Aufbau eines Versuchstandes nach Bauplan
- AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebsystems
- AP4: Experimentelle Versuche (1. Versuchsreihe)
- AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines neuartigen Trägersystems
- AP6: Praktische Testreihe (2. Versuchsreihe)
- AP7: Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP8: Entwicklung und Konstruktion eines Werkzeug-Demonstrators
- AP9: Zusammenführung der Teilentwicklungen

AP10: Analyse der Messungen, Bewertung und Optimierung/Verifikation und Zertifizierung mittels Praxisversuchen (3. Testreihe)

AP11: Dokumentation

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

Zurzeit wird bei Siempelkamp NIS Ingenieurgesellschaft mbH das AP3 abgeschlossen.

#### AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebsystems

Auf Grundlage des ersten Entwurfs wurde die Konstruktion des Demonstrators den festgelegten Geometriedaten (auf DN 200 bis DN 300) angepasst. Unter der Annahme von Erfahrungswerten der NIS wurden vorläufige Betriebsparameter als Grundlage für die weitere konstruktive Entwicklung festgelegt. Es wurde festgestellt, dass entgegen der ursprünglichen Planung, zum Großteil keine Standardkomponenten verwendet werden können. Deshalb musste eine umfangreiche Neukonstruktion durchgeführt werden.

Bedingt durch die zuvor genannten Punkte, wurde die konstruktive Entwicklung der Funktionen zum Spülen/ Abscheren und des Transportmittels für den Abtransport der Leitung zurückgestellt (siehe 4.).

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

#### AP3: Vorplanung sowie Teilentwicklung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebsystems

Es werden die noch ausstehenden Funktionen zum Spülen und Scheren und dem Transportmittel für den Abtransport der Leitung konstruiert. Ziel ist die Optimierung und Validierung des entwickelten Teilsystems.

#### AP4: Experimentelle Versuche (1. Versuchsreihe) zur Wahl des Schneidwerkzeugs

In AP4 wird ein Versuchsplan aufgestellt. Dieser beinhaltet Versuche, die der Optimierung bzw. Validierung der in AP3 entwickelten Systeme zum Antrieb, zur Zustellung und der Aufbringung der Schnittkräfte dienen. In Zusammenarbeit mit dem TMB erfolgt dann die Wahl des Schneidwerkzeugs. Je nach Wahl des Spanverfahrens werden die Geometrieparameter analysiert. Des Weiteren wird das Verschleiß- und Reaktionsverhalten verschiedener Bauteile (z. B. Verbindungsglieder) ermittelt.

#### AP5: Entwicklung, Konstruktion und Herstellung eines Trägersystems mit Zustelleinheit sowie des Antriebssystems und Transportmittel der Leitungen

Nach erfolgreichem Abschluss der ersten Versuchsreihe werden die Ergebnisse analysiert und auf die konstruktive Anpassung des neuen Systems angewendet. Zu analysierende Gesichtspunkte sind mögliche technische Mängel sowie die Identifikation defizitärer Anforderungen an das System. Daraus werden Anforderungen an das neue System abgeleitet und weiter spezifiziert.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Für das Jahr 2021 ist bei der Kontec (25.08-27.08/ Dresden) ein Kurzvortrag vorgesehen. Der eingereichte Abstract bei der Kontec wurde bereits angenommen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9424
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover - Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)	
<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 von Metallen 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 (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)**

AP 1.1: Ziel des ersten Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit eines geeigneten Versuchsstands zur Durchführung der Laboruntersuchungen. Dafür wird neben der Erweiterung der am IFW vorhanden, stationären Seilschleifmaschine auch ein Analogieprüfstand erweitert. Dieser wird auf einer konventionellen Flachsleifmaschine der Firma Geibel & Hotz montiert. Das Antriebsrad ist dabei auf der Spindelachse montiert. Durch zwei Umlenkrollen ist so über die Verfahrbewegungen der Schleifmaschine ein weggebundener Seilschleifprozess realisiert. Die Seilvorspannung wird durch einen Pneumatikzylinder aufgebracht. Die Vorspannung hat dabei einen signifikanten Einfluss auf die Werkzeugtemperatur im Leerlauf. Hier entsteht die Wärme durch innere Reibung aufgrund der Biegewechselbelastung des Seils und durch Reibung zwischen den Umlenkrollen und dem Seil. Diese wird durch die Vorspannung beeinflusst. Es wurde zunächst geprüft, ob durch den Pneumatikzylinder übliche Seilvorspannkraften erreicht werden können. Dafür wurde der Pneumatikdruck zwischen 1 und 10 bar variiert und die Seilkraft mit einer Waage gemessen, die zwischen die Seilenden gespannt wurde. Es zeigt sich dabei ein linearer Zusammenhang zwischen eingestelltem Druck und Seilvorspannkraft. Dieser Zusammenhang lässt sich mit der Formel  $F_v = 98,25 \cdot p_v$  beschreiben. Somit lassen sich Vorspannkraften bis  $F_v = 980 \text{ N}$  realisieren.

Weiterhin wurde eine Kühleinheit konstruiert, die für den Betrieb von zwei Vortex-Düsen an dem Analogieprüfstand ausgelegt ist. Damit ist eine einstellbare Kühlleistung gegeben, die erforderlich ist, um vergleichbare Ergebnisse zwischen dem Analogieprüfstand und dem stationären Seilschleifprüfstand zu erzielen. Diese Konstruktion befindet sich aktuell in der Fertigung. Nach der Umsetzung der geplanten Arbeiten wird das Arbeitspaket 1 dem Zeitplan entsprechend fertiggestellt.

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

AP 1.1: Im weiteren Vorgehen des Arbeitspakets wird die Kühlung am Analogieprüfstand fertiggestellt und in Betrieb genommen. Weiterhin wird die Vortex-Kühlung des stationären Prüfstandes um eine Druckregelung erweitert, um auch hier die Kühlleistung gezielt variieren zu können.

AP 1.2: Nach Fertigstellung des ersten Arbeitspakets wird mit der Analyse der Wärmeströme entsprechend des Arbeitsplans des AP 1.2 begonnen.

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

Keine.

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

Keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<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 30.11.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 754.606,65 €
<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 Gammaskopimetrie oder anderer Methoden werden die entstandenen Aktivitäten gemessen und zur Validierung der Rechnungen genutzt.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 1: Für die Berechnung der Monitore, die im Dampferzeugerraum bestrahlt werden bzw. wurden, wurde und wird das Modell um diesen Bereich zurzeit erweitert. Die Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen. Die Modellentwicklung wird auch in den bereits vorhandenen Bereichen weitergeführt, so dass hier neue Erkenntnisse/Informationen integriert werden.

AP 2: Optimierte Neutronenfluenzrechnungen wurden für beide Referenzkraftwerke durchgeführt. Auf deren Basis wurden die Aktivierungen der Monitore an ihren Orten berechnet. Außerdem wurden Sensitivitätsstudien für einige Monitorpositionen durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden mit den erhaltenen Messergebnissen verglichen. Bei den meisten Monitoren konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Beobachtet wurde, dass die berechneten Aktivitäten im oberen Bereich der Abschirmung meistens unterschätzt wurden. Ursache könnte hier die ungenaue Kenntnis der Beschaffenheit der inneren Isolierung sein. Ein anderer Grund könnte sein, dass die exakte Position der Monitore nicht bekannt ist. So ist es möglich, dass die Position der Monitore im Excore-Instrumentierungskanal um rund 10 cm zum Kern variieren kann. Für die Reaktion  $^{113}\text{In}(n,\gamma)^{114\text{m}}\text{In}$  ergeben sich damit Aktivitätsunterschiede in den Rechnungen von bis zu 20%.

Im Herbst 2020 lagen für alle Zyklen entsprechende Quellrechnungen vor. Für die noch ausstehenden Zyklen wurden Vorausrechnungen durchgeführt. Auf deren Basis wurden Quellverteilungen für die gesamte Betriebszeit der Referenzanlagen berechnet, die dann für die Bestimmung der Gesamtneutronenfluenz bzw. Gesamtaktivität genutzt werden können. Um den Vergleich mit den Monitoren zu verbessern, wurden für kurzlebige Monitore separate Quellen erzeugt, die die Veränderung der Verteilung innerhalb des Zyklus berücksichtigen.

AP 3. Im Juli 2020 wurden ca. 60 Neutronenfluenzmonitorpakete, bestehend aus je 8 verschiedenen Metallfolien, aus dem Referenzkraftwerk 2 entnommen. Die Aktivierung der einzelnen Metallfolien und der im April 2020 aus Referenzkraftwerk 1 entnommenen ca. 60 Fluenzmonitorpakete wurde mittels Gammaskopimetrie bestimmt. Die höchsten und am besten messbaren Aktivierungen wurden bei Ta, Zn, Sn und In festgestellt. Die Aktivierungen waren bei allen Metallen umso stärker, je näher sie am RDB platziert waren.

Für Referenzkraftwerk 1 wurden im Dezember 2020 ca. 40 weitere Monitorpakete präpariert und zur Positionierung im Messkammerführungsrohr innerhalb der biologischen Abschirmung dem Personal vor Ort zugesandt.

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

AP 1: Modellerweiterung für die Berechnungen der Neutronenfluenz in einem 30x30x50 cm Gitternetz. Der Ausbau des Modells auf den Dampferzeugerraum wird weitergeführt. Dieses erfolgt auf Basis von Originalzeichnungen, die ab November 2020 zur Verfügung stehen.

AP 2: Die Neutronenfluenzrechnungen werden mit einem Netz von 30x30x50 cm wiederholt, um ausreichend gute Statistik in allen Segmenten zu erhalten. Berechnung der Quellen für die ausstehenden Zyklen der Referenzanlagen, anschließend entsprechende Neutronenfluenzrechnungen und deren Validierung an den Experimenten.

AP 3: Bestimmung der Aktivierung der Monitorsätze aus beiden Referenzanlagen mittels Gammaskopimetrie und LSC.

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

WERREBA Projekt

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

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9409B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWTH Aachen, Institut für Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung einer Methode zur Pre-Aktivitäts und Dosisleistungsberechnung von reaktornahen Bauteilen auf Basis von Neutronenfluenzverteilungen“ – EMPRADO Titel des Teilprojekts: 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 30.11.2022	<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@net.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 reaktornahen Beton- bzw. Konstruktionselemente 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, Institut für Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET) 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: Neutronenfluenzmessungen 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 Ortsdosisleistungverteilung (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: Programmroutine für Aktivierungswirkungsquerschnitte

Die Arbeiten zur Erstellung einer anlagenspezifischen Aktivierungswirkungsquerschnitts-Datenbibliothek wurden bereits im ersten Halbjahr 2020 erfolgreich abgeschlossen. In der letzten Projektphase wurde auf der Basis der nuklearen Grunddatenbank ENDF/B-VII.1 eine aktuelle und erweiterte Zerfallsbibliothek erstellt. Im Anschluss erfolgte eine Datenanalyse für ausgewählte Aktivierungsprodukte. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei Aktivierungs-berechnungen als Folge der Aktualisierung der Zerfallsdatenbank der Nuklidvektor erweitert und das Aktivitätsinventar bestimmter Nuklide erhöht (wie TC-99).

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

Um eine hochaufgelöste 3D-Aktivierungsberechnung durchführen zu können, wurde der numerischen Algorithmus zur Erweiterung der auf dem 90° Modell basierten N-Fluenzverteilung (aus AP 2) auf ein 3D-Modell (360°) mit entsprechender Datenanalyse durchgeführt. Die Datenanalyse ergab, dass die Flusswerte in den äußeren Strukturen ein relativ hoher Fehler aufweisen. Anschließend wurde mit Hilfe von PTRAC-Simulationen und der Programmroutine PTRACMapper eine genaue Materialbeschreibung der einzelnen Gitterelemente und deren Zuordnung zum 3D-Anlagenmodell erreicht. Durch die Erstellung dieser Input-Dateien wurde die erste ortsabhängige 3D-Aktivierungsberechnung mit dem Aktivierungsmodul AKT-TOOL unternommen. Mit diesen Berechnungen wurde neben der Verteilung der Integralen Aktivität auch die nuklidspezifische Verteilung im gesamten Anlagenmodell bzw. in den ausgewählten Komponenten erreicht.

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

Die Arbeiten zur Erstellung einer aktuellen Photonendatenbank wurden im ersten Halbjahr 2020 weitestgehend durchgeführt. In der vorliegenden Berichtsphase erfolgte ein umfassender Vergleich der Photonendatenbanken, wobei festgestellt wurde, dass die lokalen Photonenspektren aus den bisher eingesetzten Datenbanken aufgrund des Fehlens bestimmter Radionuklide oder einzelner Emissionslinien deutliche Unterschiede aufweisen. Aus diesem Grund wurden auf der Basis der neuen Photonendatenbank die ersten Berechnungen zur Verteilung der Strahlungsquellterme im gesamten Anlagenmodell durchgeführt und ein vorläufiger 3dim.  $\gamma$ -Emissionsatlas, welcher die spektrale Intensitätsverteilung in den einzelnen Gitterelementen beinhaltet, generiert.

#### 4. Geplante Weiterarbeiten

##### **AP-4.1: Erstellung Datenbibliothek (WQ-BIB: Vor-Konvoi)**

Die Generierung der Datenbibliothek für die Aktivierungswirkungsquerschnitt (WQ-BIB) wurde bereits im ersten Halbjahr abgeschlossen.

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

Die beschriebene Berechnung der Aktivitätsverteilung basiert auf die Fluenzwerte, die in einigen Bereichen eine hohe statistische Ungenauigkeit aufweisen und damit zu ungenauen Aktivitätswerten führen. Aus diesem Grund sollen im Rahmen des AP 2.1 in Kürze ergänzende Fluenzberechnungen mit geometrisch vergrößerten Gitterelementen durchgeführt und für A-Berechnungen zur Verfügung stehen. Dementsprechend werden die Ergebnisse nach der genauen Berechnung der Fluenzverteilung mit Hilfe eines entwickelten Inter-polationsalgorithmus auf die ursprünglich feine Gitterstruktur erweitert und zur Durchführung ergänzender A-Berechnungen für das gesamte Anlagenmodell verwendet.

Im Hinblick auf die Frage der Verifizierung der 3D-Aktivitätsverteilung sind für die kommenden Berichtsperioden Aktivitätsberechnungen geplant, die mit den Programmteilen des Codesystems SCALE, nach entsprechender Modellentwicklung für ausgewählte Komponenten, durchgeführt werden. Des Weiteren ist die Berechnung der 3-dim. Verteilung der Aktivität für eine weitere Anlagenvariante (Konvoi-Anlage) geplant (wie beim letzten Projekttreffen vereinbart).

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

Für die Berechnung des Strahlungsfelds und der Ortsdosisleistungsverteilung (ODL) der Reaktoranlage werden die energieabhängigen  $\gamma$ -Emissionsspektren sowie die integrale Quellstärke des Systems benötigt, die in der Quelltermdatei zellbezogen vorhanden sind. Nach der Generierung der Quelltermdatei für das Gesamtmodell wird die Datei anhand einer Strukturanalyse und Auswertung für die Kopplung und Strahlungstransportsimulation mit dem Monte-Carl-Programm MCNP vorbereitet. Dies erfolgt parallel unter dem Einsatz eines in Entwicklung befindlichen Visualisierungsmoduls, welches außer Aktivitätsverteilung die räumliche und spektrale Intensitätsverteilung der  $\gamma$ -Strahlung für Optimierung künftiger Rückbau- und Strahlenschutzmaßnahmen liefert.

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

Da sich die gesamte Bandbreite bzw. das Spektrum der zellbezogenen Quellterme über mehrere Größenordnungen erstreckt, wird die spektrale Intensitätsverteilung in Bereiche für Einzelgruppensimulation aufgeteilt, um mit Parallelem Rechnen Simulationsbeschleunigung zu erreichen. Die Erzeugung der einzelnen MCNP-Dateien für die gesamte Intensitätsgruppen sowie die genaue Überprüfung des gesamten Strahlentransportmodells sind Gegenstand der geplanten Arbeiten. Im Rahmen des Arbeitspakets ist die Durchführung der ersten Strahlentransportrechnungen (Verteilung des  $\gamma$ -Flusses im Gesamtmodell) geplant.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

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

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

A. **Scaramus**, “Simulation based Characterization of the Source Term and Radiation Field of the Components of a shutdown Reactor”, Master-Thesis, RWTH-FH-Aachen, Dez. 2019

Tommy Mai, “Simulation of the activity inventory in structural components of a shutdown light-water reactor with SCALE”, Master-Thesis, RWTH-FH-Aachen, Nov. 2019.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9412
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Wege zum effizienten Rückbau von Reaktorkomponenten und Betonabschirmung: Berechnung des Aktivitätsinventars und deren Validierung an Bohrkernen sowie Mobilitätsuntersuchungen von Radionukliden (WERREBA)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.188.478,25 €
<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 Vorhabens ist es, genaue Kenntnisse über die entstandenen radioaktiven Nuklide während des Leistungsbetriebs eines Kernkraftwerkes, die zeitliche Veränderung der Aktivität und die daraus resultierende Verteilung der Aktivität in den einzelnen Phasen des Rückbaus zu erhalten. Die Aktivitätsverteilungen sollen dabei anlagenspezifisch für den Reaktordruckbehälter (RDB), dessen Einbauten, den Reaktordeckel und die erste Betonabschirmung (biologisches Schild) bestimmt werden. Dabei liegt der Schwerpunkt besonders auf der experimentellen Bestimmung der Nuklidzusammensetzung, deren Aktivität und chemischen Bindung im Material. Die Untersuchungen werden an Originalmaterial sowohl aus dem RDB als auch aus dem Beton durchgeführt und dienen der Validierung und Verifizierung der durchgeführten Rechnungen. Im Fall der stark aktivierten Reaktorkomponenten könnten den Behörden und Betreibern Informationen bereitgestellt werden, ob neben der direkten Zerlegung die Methode der Abklinglagerung als eine ökologische und wirtschaftliche Alternative in Betracht kommt. Mit einer möglichen Zwischenlagerung könnten sowohl die endzulagernde aktive Abfallmenge reduziert als auch wertvolle Metalle wieder recycelt werden. Zusätzlich wird die Strahlenbelastung für das Rückbaupersonal verringert.

Im Fall der Betonabschirmung werden Aussagen für einzelne Nuklide zu ihrer möglichen chemischen Mobilität getroffen, welche direkten Einfluss auf die Rückbaustrategie und die Endlagerung hat. Denn für beides ist nicht nur die absolute Menge, sondern auch die strukturelle Einbindung der Radionuklide im Beton wichtig. Diese ist entscheidend für die Stabilität der Bindung der Radionuklide im Beton und damit für den Umfang und die Kinetik möglicher Auflösungen mit Übergang in die wässrige Phase während des Rückbaus und im Endlager. Deshalb soll neben der radiologischen auch eine physiko-chemische Charakterisierung wichtiger Nuklide im Material erfolgen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 1: Extraktion von Proben aus dem RDB/Reaktordeckel/Betonabschirmung

AP 2: Experimentelle Bestimmung der Aktivitäten

AP 3: Strukturelle Charakterisierung des Radionuklidinventars

AP 4: Berechnung der Neutronenfluenz- und Aktivitätsverteilungen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

AP 1: Die Genehmigung zu Probenahme und -transport seitens der Behörde für EWN liegen nun vor, und die Proben aus dem Reaktordeckel sind zum Transport vorbereitet. Die exakten Positionen für die Entnahme der Betonbohrkerne wurden festgelegt, die Bohrungen wurden noch nicht vorgenommen.

Im HZDR bereits vorhandene Trepanns aus dem Reaktordruckbehälter wurden in einer heißen Zelle zerlegt und für radiochemische und Oberflächenanalysen vorbereitet.

AP 2: Die radiochemische Trennmethode für Ni-63, Co-60 und Fe-55 wurde entwickelt und anhand von Referenzmaterialien validiert.

AP 3: An einer inaktiven Referenz-Betonprobe ( $\varnothing = 5$  mm;  $d = 2$  mm;  $m = 0.17$  g) wurden zerstörungsfrei die Porengrößen mittels  $\mu$ -CT ( $> 4$   $\mu$ m) und die spezifische Oberfläche durch  $N_2$ /BET bestimmt ( $6.07$   $m^2/g$ ,  $\sigma = 0.54$ ). Die Hg-Porosimetrie an derselben Probe ergab eine spezifische Oberfläche von  $9.94$   $m^2/g$  und charakteristische Porengrößenmerkmale für Gelporen (5, 10 und 17 nm) und Kapillarporen (1  $\mu$ m).

Inaktive Referenz-Betonproben wurden mit Si-Ionen (Fluenz:  $5 \cdot 10^{14}$  Si-Ionen/ $cm^2$ , 300 keV) aktiviert, um Strahlenschäden zu simulieren. Mit vertikaler Raster-Interferometrie und konfokaler Mikroskopie wurde eine vertikale Ausdehnung von 80 nm für den Hauptsteinzuslag im Beton ( $\alpha$ -Quarz) ermittelt. Proben von Steinzuslag aus Beton zusammen mit Referenzmaterialien von Mikroclin, Albit und Quarz wurden für eine Neutronenbestrahlung am Referenzkraftwerk 1 (EMPRADO) vorbereitet und dort platziert.

Referenz-RDB-Stahlproben aus Block 8 des KKW Greifswald, die durch eine gezielt durchgeführte Neutronenbestrahlung Langzeitaktivierung simulieren, wurden mit SEM-EDX untersucht. Sie zeigten im Vergleich zu den nichtaktivierten Stahlproben Clusterbildung von MnS und Mo.

AP 4: Die Vergleichsrechnungen aus dem ersten Halbjahr wurden weitergeführt. Unter anderem wurden verschiedene Parameter variiert, um den Einfluss auf die berechneten Aktivitäten der Materialproben aus dem Reaktordruckbehälter zu untersuchen bzw. eine bessere Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment zu erreichen. Mit der Berechnung von Neutronenfluenzen für Positionen in größerer Entfernung zur aktiven Zone (Reaktordeckel, Probenahmeorte der Betonbohrkerne) wurde begonnen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten

AP 1: Der Transport der Proben aus dem Reaktordeckel ist für Februar 2021 geplant und die Probenentnahme für die Betonbohrkerne soll bis Mai 2021 abgeschlossen werden, damit der Transport noch in diesem Halbjahr erfolgen kann.

AP 2: Sobald die Reaktordeckel- und Betonproben am HZDR eingetroffen sind, wird mit den folgenden geplanten Arbeiten begonnen: Die Betonbohrkerne werden zerkleinert und für die radiochemischen Analysen vorbereitet und anschließend die enthaltenen Radionuklide qualitativ und quantitativ bestimmt. Die RDB- und Reaktordeckel-Stahlproben werden ebenfalls radiochemisch getrennt und die Aktivitäten mittels Gammaskopmetrie und LSC quantitativ bestimmt.

AP 3: Die Auflösungskinetik von strahlbeschädigtem Quarz in alkalischen Medien soll untersucht werden, vor allem im Zusammenhang mit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton. Auslaugungsexperimente an Referenz-Betonproben unter verschiedenen Bedingungen und unter Berücksichtigung von organischen Additiven werden durchgeführt.

Die ersten in einem Kernkraftwerk aktivierten Beton-Referenzproben werden mikroskopisch und spektroskopisch untersucht. An aktivierten RDB- und Reaktordeckel-Stahlproben wird Oberflächenanalytik mit AFM und SEM-EDX sowie Autoradiographie durchgeführt.

AP 4: Die Berechnung von Neutronenfluenzen für den Reaktordeckel und die Probenahmeorte der Betonbohrkerne wird fortgeführt. Ziel ist eine erste Abschätzung der zu erwartenden Aktivitäten.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

EMPRADO Projekt

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9413A
<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> Verbundprojekt „Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen“. Teilprojekt A: Verfahrensentwicklung zur Dekontamination und Konditionierung der Prozessmedien einschließlich Gewinnung/Herstellung und Charakterisierung von betonproben Charakterisierung von Betonproben“	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 30.04.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 736.792,89 €
<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

Da in Beton eindringende radioaktive Stoffe größtenteils an den sog. Zementstein gebunden werden, kann durch die Separierung des **Zementsteins** von den Betonzuschlagstoffen eine deutliche Mengenreduzierung endzulagernder radioaktiver Abfälle erwartet werden. Als Trennverfahren bietet sich die elektrohydraulische Zerkleinerung an. Es soll deshalb an mehreren relevanten Betonsorten untersucht werden, ob und mit welchen Arbeitsparametern mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung eine hinreichende Dekontamination erreichbar ist und inwieweit die mineralischen Zuschlagstoffe freigebbar sind. Zur Verifizierung des Ansatzes sind zunächst Voruntersuchungen mit inaktivem Referenzmaterial und mit getracerten Prüfkörpern vorgesehen. Es schließen sich die Errichtung einer Laborversuchsanlage und die Durchführung von Trennversuchen mit realen kontaminierten Betonproben an. Bestandteil des Arbeitsprogramms sind Untersuchungen zur Dekontamination/Recycling des als Koppelmedium verwendeten Wassers und zur Konditionierung sekundärer Abfälle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

- AP1: Projektkoordination und Administratives
- AP2 Bereitstellung und Charakterisierung von Beton aus kerntechnischen Anlagen
- AP3 Untersuchungen zur Verifizierung der Kontaminationsverteilung in radioaktiv kontaminierten Betonproben
- AP4 Aufbau der Versuchsanlage zur Elektroimpulszerkleinerung, Durchführung von Versuchen zur Separation an synthetischen und realen Betonproben
- AP5 Untersuchungen zur Behandlung des Prozesswassers
- AP6 Experimentelle Untersuchungen zur Konditionierung der erhaltenen Stofffraktionen
- AP7 Stoffstrom-/Radionuklidbilanzierung, Verfahrensbewertung, Fortschreibung Verwertungskonzept

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

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

- AP1: Die Aktivitäten zu AP 1 erfolgten planmäßig. Das 3. Projektmeeting wurde wie geplant im Oktober 2020 in Dresden durchgeführt.
- AP2: Die Charakterisierungen wurden weitgehend abgeschlossen. Je nach Erfordernis erfolgten noch einzelne Analysen an Betonproben, die als Ausgangsmaterial für die Versuche dienen.
- AP3: Die Versuche zur Verifizierung der Kontaminationsverteilung in radioaktiv kontaminierten Betonproben mit inaktiven Tracern wurden abgeschlossen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Sorption vor allem durch das Phasenverhältnis flüssig/fest und durch die Art des verwendeten Zements bestimmt wird. Die Einwirkzeit (Dauer 10/30/120 d) ist hingegen von geringerer Bedeutung für Ausmaß und Stärke der Sorption, da in der Regel rasch ein Sättigungszustand erreicht wird. Das Sorptions- und Desorptionsverhalten von Co, Eu und Cs gegenüber Beton aus Stade / Rossendorf bzw. gegenüber frisch hergestellten Betonproben unterscheidet sich nur wenig. Davon abweichend hängt das Sorptionsverhalten bei Sr stark vom verwendeten Zementtyp ab. Bei den Betonproben aus Stade und bei Betonmischungen auf Basis von Zement Typ CEM I wurde so eine starke Konzentrationszunahme infolge Auslaugung aus der Matrix festgestellt. Eu und Co werden nahezu quantitativ und irreversibel von Beton/Zementstein sorbiert, Desorption ist analytisch kaum nachweisbar. Cs wird je nach Phasenverhältnis zu 75 – 99 % sorbiert mit den niedrigsten Werten bei CEM I. An Betonkies ist die Sorption generell um einen Faktor von ca. 5 schwächer. Vor allem für Strontium ließ sich auch eine hohe Desorption von der Oberfläche des Kieses bei pH 6,5 – 7,0 nachweisen, was auf eine niedrige Bindungsstärke bzw. Sorptionsenthalpie hinweist.
- AP4: Das Arbeitspaket wird federführend durch den Verbundpartner ImpulsTec GmbH bearbeitet. Es fanden weitere technische und strahlenschutztechnische Abstimmungen zur Aufstellung und zum Betrieb einer Laboranlage im Radionuklidlabor des IKTS statt. Der Verbundpartner zur Durchführung erster Versuche zur Prozesswasserbehandlung entsprechende Wasserproben erzeugt und übergeben.
- AP5: Für die Behandlung des Prozesswassers wurde ein Versuchsstand für die inaktive Erprobung geplant und errichtet sowie die korrekte Funktion getestet. Erste orientierende Versuche zeigten, dass die für eine Wiederverwendung des Wassers erforderliche Teilentsalzung nach entsprechender Vorbehandlung erreichbar ist. Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass dieser Behandlungsschritt auch eine effektive Abtrennung der relevanten Kationen/Radionuklide aus dem Prozesswasser ermöglicht.
- AP6: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.
- AP7: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.

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

AP1: Das nächste Verbundmeeting ist für Mai 2020 geplant.

AP2: Die Untersuchungen sind im Wesentlichen abgeschlossen. Nur bedarfsweise erfolgen noch ergänzende Analysen.

AP3: Die Untersuchungen unter Verwendung inaktiver Tracer (Co, Cs, Eu, Sr) sind abgeschlossen. Die Durchführung analoger Versuche mit Radiotracer zur Verifikation ist für 2021 vorgesehen.

AP4: Die Umsetzung einer Versuchsanlage zur elektrohydraulischen Fragmentierung wird weiter vorbereitet.

AP5: Die Untersuchungen werden fortgesetzt, wobei als nächstes die Arbeitsparameter der Elektrodialyse (ED) zu bestimmen sind und detaillierte Untersuchungen zum etwaigen Übergang der Kontaminanten während der ED durchzuführen sind. Hierzu werden dem Prozesswasser des Verbundpartners entsprechende Mengen von Salzen der o.g. Metalle als Tracer hinzugefügt. Weiterhin soll die Freisetzung dieser Metalle während der elektrohydraulischen Zerkleinerung mittels entsprechend präparierter Betonproben in Vorbereitung auf die Untersuchungen an aktivem Material abgeschätzt werden.

AP6: Die Bearbeitung ist erst im 3. Jahr der Laufzeit vorgesehen.

AP7: Ausgehend von den Ergebnissen zu AP3 wird die Bearbeitung fortgesetzt.

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

Für das BMBF-Förderprojekt WARREBA, Fkz. 15S9412 wurden Daten aus der Charakterisierung der Betonsorten zur Verfügung gestellt. Es besteht gelegentlicher Kontakt zu den Bearbeitern.

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

Für die KONTEC 2021 wurde ein Vortrag für die KONTEC-direkt-Session angenommen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9413B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> ImpulsTec GmbH, Wilhelm-Eichler-Straße 34, 01445 Radebeul	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt „Verfahrensentwicklung zur Abtrennung kontaminierter Bestandteile aus Beton beim Rückbau kerntechnischer Anlagen“ Teilprojekt B: Verfahrensentwicklung zur Abtrennung von radioaktiv kontaminierten Zementstein mittels elektrohydraulischer Fragmentierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2019 bis 30.04.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 56.592,78 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Stefan Eisert	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> stefan.eisert@impulstec.com

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Da in Beton eindringende radioaktive Stoffe größtenteils an den sog. Zementstein gebunden werden, kann durch die Separierung des Zementsteins von den Betonzuschlagstoffen eine deutliche Mengenreduzierung endzulagernder radioaktiver Abfälle erwartet werden. Als Trennverfahren bietet sich die elektrohydraulische Zerkleinerung an. Es soll deshalb an mehreren relevanten Betonsorten untersucht werden, ob und mit welchen Arbeitsparametern mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung eine hinreichende Dekontamination erreichbar ist und inwieweit die mineralischen Zuschlagstoffe freilegbar sind. Zur Verifizierung des Ansatzes sind zunächst Voruntersuchungen mit inaktivem Referenzmaterial und mit getracerten Prüfkörpern vorgesehen. Es schließen sich die Errichtung einer Laborversuchsanlage und die Durchführung von Trennversuchen mit realen kontaminierten Betonproben an. Bestandteil des Arbeitsprogramms sind Untersuchungen zur Dekontamination/Recycling des als Koppelmedium verwendeten Wassers und zur Konditionierung sekundärer Abfälle.

### 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

- AP1: Vorbereitende Arbeiten
- AP3: Aufbau der Versuchsanlage zur Elektroimpulszerkleinerung, Durchführung von Versuchen zur Separation an synthetischen und realen Betonproben
- AP6: Stoffstrom-/Radionuklidbilanzierung, Verfahrensbewertung, Fortschreibung Verwertungskonzept

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

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

- AP1: Im Berichtszeitraum wurde die Detailplanung eines temporären Versuchsstandes beim Projektpartner Fraunhofer IKTS für den Aufschluss von kontaminierten Betonproben abgeschlossen. Neben den Restriktionen hinsichtlich des Strahlenschutzes stehen vor

allein die örtlichen Anforderungen zur Einbringung und Aufstellung des Teststandes im Vordergrund. Nach der Auslegung startete die Umsetzung des Teststandes, welchen im nächsten Schritt bei der ImpulsTec aufgebaut und in Betrieb genommen werden soll, bevor er im weiteren Projektverlauf am Fraunhofer IKTS installiert und für die Behandlung von radioaktiven Betonmuster verwendet wird.

AP3: Die Arbeiten zur systematischen Untersuchung des Betonaufschlusses mit unterschiedlichen Pulsenergien wurden fortgesetzt. Für eine einfache Bewertung des Zerkleinerungserfolges wurde ein einfaches Verfahren zur Auflösung des Zementsteins mittels eines handelsüblichen „Betonlöser“ erprobt und eingesetzt. Dies ermöglicht eine vergleichsweise schnelle Qualifizierung der Zerkleinerungsergebnisse. Bei einer Versuchsreihe zur Intervallbehandlung von Betonproben aus Stade mit hoher und niedriger Pulsenergie wurden neben einer Siebanalyse zur Ermittlung der Korngrößenverteilung wurde auch der Zementrestgehalt nach der Schockwellenbehandlung für ausgewählte Proben analysiert. Dadurch ist ein Vergleich der beiden Setups auch auf Basis der Reinheit der Gesteinskörnung möglich.

Die Versuchsreihe diente auch dazu den Fortschritt der Zerkleinerung und der Zementsteinabtrennung während der Schockwellenbehandlung zu untersuchen. Aus diesem Grund wurde der Behandlungsprozess in Schritten von 10 Entladungen durchgeführt und das Zerkleinerungsprodukt anschließend auf einem Nasssiebturm klassiert. Nachfolgende Abbildung 1 zeigt das Ergebnis der Siebanalyse.

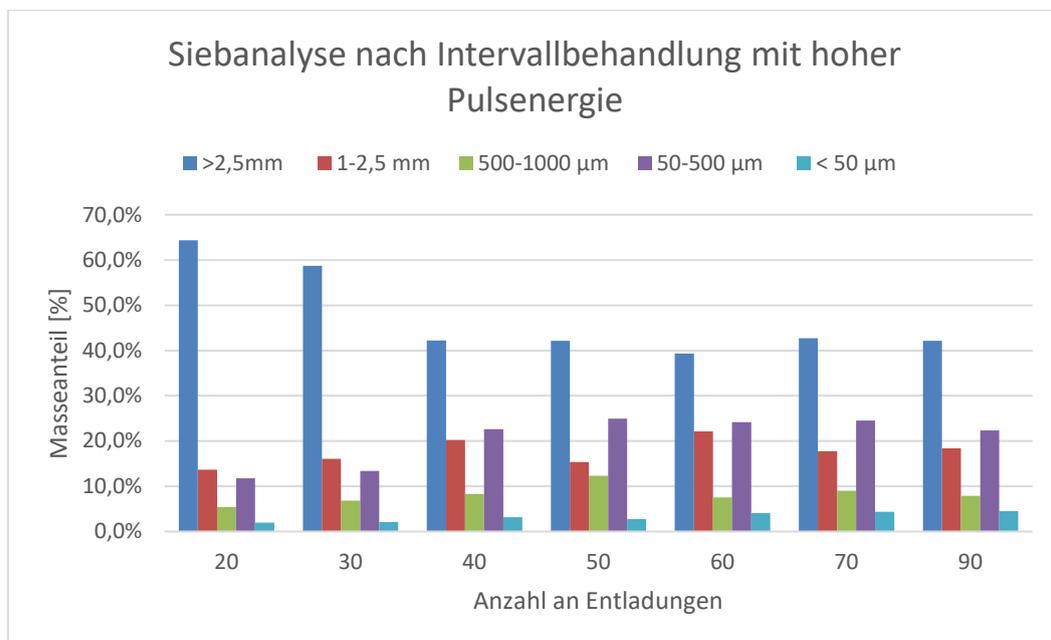


Abbildung 3: Siebanalyse Versuchsreihe mit hoher Pulsenergie

Der abnehmende Masseanteil der Grobfraktion ist ein Indiz dafür, wie viel Restverbunde, d.h. Agglomerate aus Kies und Zementstein, noch vorhanden sind. Man erkennt, dass der Anteil der Fraktion >2,5 mm bereits nach 40 Entladungen nahezu konstant bleibt. Nach optischer Bewertung der Proben wird deutlich, dass der grobe Kies freigelegt wurde und keine nennenswerten Restverbunde mehr zu erkennen sind. Lediglich kleinere Oberflächenanhaftungen an Zementstein. Da der Masseanteil sich trotz weiterer Behandlung bis auf insgesamt 90m Entladungen nicht nennenswert ändert, ist auch davon

auszugehen, dass der grobe Kies durch den Schockwellenprozess mit hoher Pulsenergie nicht bzw. nur gering geschädigt wird.

Zur Bewertung des Restgehaltes an Zementstein wurden die größten drei Siebfraktionen bei allen Intervallen mit Betonlöser nachbehandelt. Zusätzlich wurden für einige Intervalle auch die beiden Feinfraktionen untersucht. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse dargestellt. Nach 90 Entladungen wurde der Restgehalt an Zementstein in der Grobfraktion >2,5 mm auf 2,6 m% reduziert. Damit konnten die Wirksamkeit des Schockwellenverfahrens und damit der selektive Abtrag des Zementsteins auch analytisch nachgewiesen werden. Der abgelöste Zementstein reichert sich wie zu erwarten war in der Feinfraktion an. In der Fraktion <50 µm konnten nach 90 Entladungen 79 m% Zementstein nachgewiesen werden.

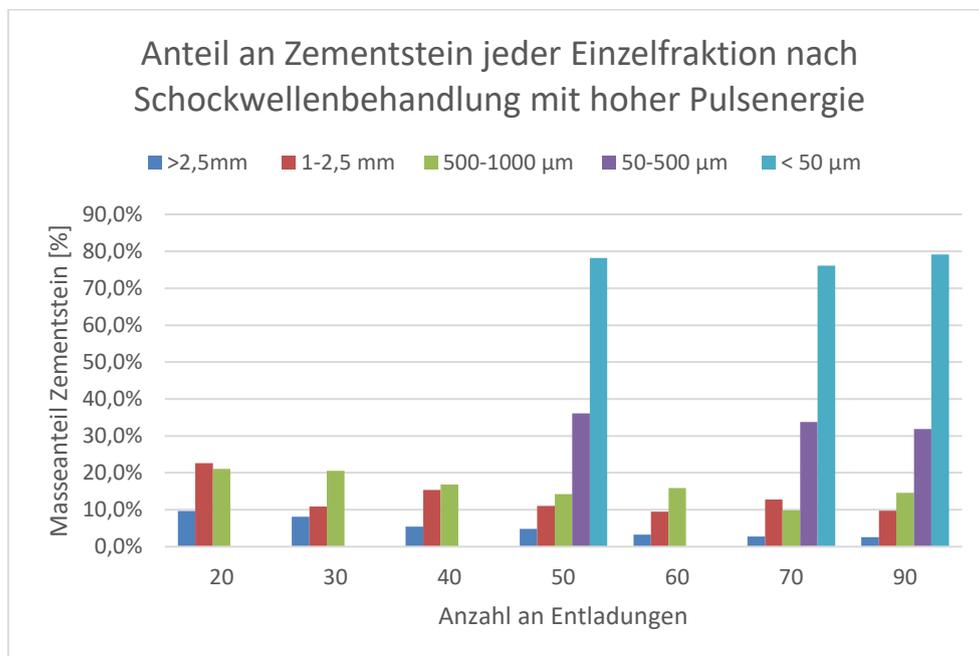


Abbildung 4: Zementsteingehalt Versuchsreihe mit hoher Pulsenergie

In der nächsten Versuchsreihe wurde die Vorgehensweise mit dem Setup der niedrigen Pulsenergie reproduziert. Durch die niedrigere Pulsenergie werden pro Intervall 250 Entladungen erzeugt. Abbildung 3 zeigt die Siebanalyse. Im Vergleich zu der Behandlung mit hoher Pulsenergie ist zu erkennen, dass die Grobfraktion bis zum Ende der Behandlung abnimmt. Nach 1750 Entladungen beträgt sie nur noch lediglich 9,4 m%. Da die verwendeten Betonproben in etwa denselben Anteil an grober Gesteinskörnung hatten, bedeutet dies, dass die kleine Pulsenergie, die neben der Abtrennung des Zementsteins auch den Kies signifikant schädigt.

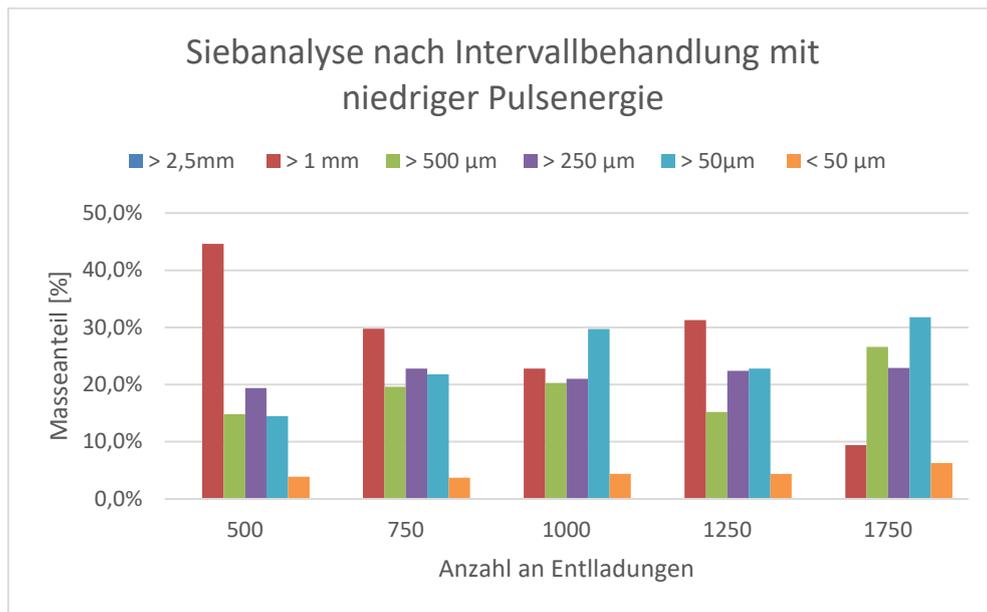


Abbildung 5: Siebanalyse Versuchsreihe mit niedriger Pulsenergie

In Abbildung 4 sind die Restgehalte an Zementstein für die Versuchsreihe mit kleiner Pulsenergie dargestellt. Der Restgehalt an Zementstein in der Fraktion >2,5 mm nach 1750 Entladungen ist mit 3,19 m% in einer ähnlichen Größe wie bei der hohen Energie. Auch der Zementsteingehalt in der Feinfraktion ist mit 76 m% etwa identisch. Aufgrund der geringeren Schädigung der Gesteinskörnung wird die hohe Pulsenergie für weitere Versuchsreihen verwendet.

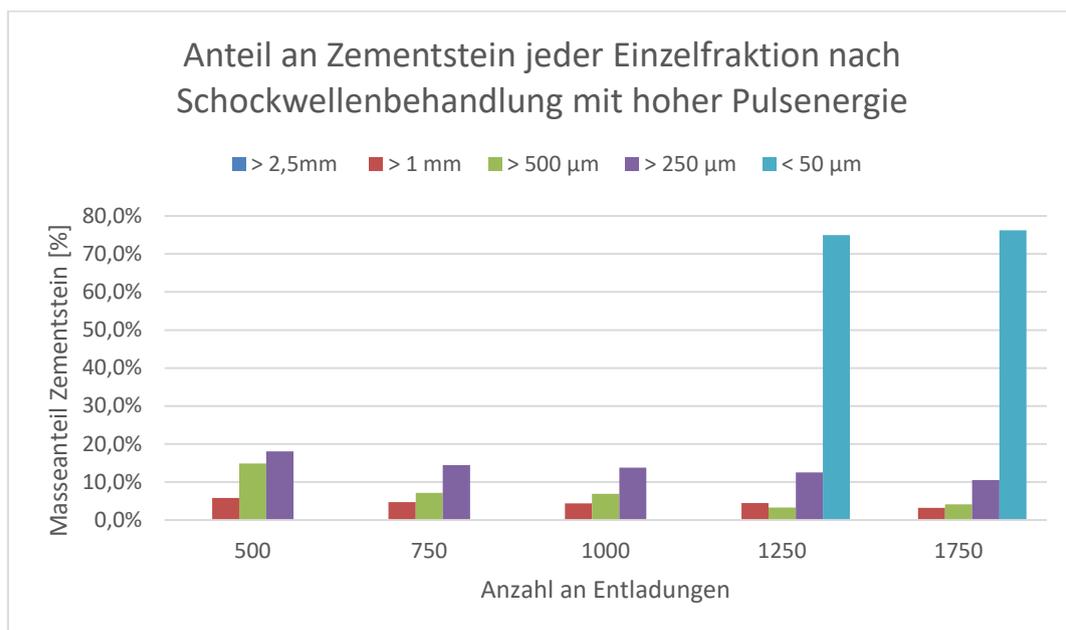


Abbildung 6: Zementsteingehalt Versuchsreihe mit niedriger Pulsenergie

Als nächster Schritte rückt die weitere Optimierung des Behandlungsprozesses mit dem Ziel der weiteren Verringerung der Restzementgehalte in der groben Kiesfraktion in den Fokus. Ziel dabei ist es ein Maximum der erzielbaren Reinheit der groben Gesteinskörnung auf rein mechanischem Wege mittels Schockwellenprozess zu erproben.

AP6: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.

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

AP1: Geplant ist die Umsetzung des Konzeptes der temporären Versuchsanlage für den Aufschluss kontaminierter Betonproben am Fraunhofer IKTS.

AP3: Die Arbeiten zur Entwicklung des Aufschlussprozesses für verschiedene Betonproben sollen fortgeführt werden. Ziel dabei ist es die maximal erzielbare Reinheit zu ermitteln.

AP6: Die Bearbeitung ist erst im 3. Jahr der Laufzeit vorgesehen.

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

Derzeit werden keine direkten Bezüge zu anderen Vorhaben gesehen. Allgemein kann das Projekt der Gruppe von Vorhaben zugeordnet werden, die eine Reduzierung des Aufkommens endzulagernder radioaktiver Rückstände zum Ziel haben.

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

-keine-

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31, 76131 Karlsruhe	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 541.108,80 €
<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

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an der restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.11.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.05.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort
- AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

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

Während des Berichtszeitraumes sind im Wesentlichen die Arbeiten von AP 3, AP 4 und AP 5 in enger Zusammenarbeit zwischen KIT-TMB, HTWG, CONTEC GmbH und SAT Kerntechnik GmbH durchgeführt worden.

#### AP 3: Aufbau des Versuchstandes

Die Probekörper wurden in der Werkstatt des KIT-TMB hergestellt. Die Prüfung der Druckfestigkeit von Probewürfeln ist bei der MPA Karlsruhe erfolgreich durchgeführt worden.

Die Einhausung wurde geplant. Dies ergab Folgendes:

Eine einfache aufklappbare Deckenklappe (obere Seite) und eine feste Rückwand aus Holz mit Anschlüssen für die integrierte Absaugung (hintere Seite) sind für die Einhausung des Versuchstandes aufgebaut worden.

Eine Laserscanner-Halterung wurde entsprechend dem Anwendungsbedarf konzipiert und hergestellt.

Es wurde begonnen eine Werkzeughalterung entsprechend dem Anwendungsbedarf zu konzipieren und herzustellen. Die Werkzeughalterung ist eine sehr wichtige Komponente für die Versuchsdurchführung und soll die Einstellung einer beliebigen Bearbeitungsrichtung, -winkel und -höhe ermöglichen. Nicht alle Geräte können mit derselben Werkzeughalterung eingespannt werden, weshalb diese modifizierbar ausgestaltet wird.

Eine Gefährdungsbeurteilung für eine sichere und reibungslose Versuchsdurchführung wurde mit Unterstützung der SAT Kerntechnik GmbH erstellt.

#### AP 4: Inbetriebnahme des Versuchstandes/ der Messtechnik und Optimierung

Die ausgewählten Maschinen sind handgeführt in Betrieb genommen worden.

Der Laserscanner wurde auf die Laserscanner-Halterung montiert und in Betrieb genommen.

Ein Schallpegelmessgerät ist getestet und wird für die weiteren Versuche bereitgestellt.

Auch ein Vibrationsmessgerät wird weiter getestet und für die Versuche vorbereitet.

#### AP5: Entwicklung und Anfertigung des Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

In Kooperation mit der CONTEC GmbH hat die HTWG für die Teilfunktionen: „Abtragsprinzip“, „Abraum auffangen“ und „Werkzeug halten/ führen“ Wirkprinzipien für die Versuchsmuster erarbeitet.

Für alle Teilfunktionen (gleichläufiger und gegenläufige Stufenfräser, oszillierendes Werkzeug für hochfrequentes Raspeln) wurden CAD-Modelle erstellt und die Konstruktionen optimiert/vereinfacht.

Es wurden Winkelschleifer als Antriebe bestellt und in Betrieb genommen. Zudem konnten erste Frässcheiben angefertigt werden.

Die Firma CONTEC GmbH beginnt mit dem Bau des ersten Versuchsmusters (gleichläufiger Stufenfräser) und beschäftigt sich mit einem passenden Gehäuse und einer entsprechenden Absaugung.

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

AP 3: Die Einhausung für den Prüfstand wird in der Werkstatt des KIT-TMB weiter aufgebaut.

AP 4: In Zusammenarbeit von KIT-TMB und der HTWG sollen die Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung weitergeführt werden.

AP 5: Die Projektpartner HTWG, KIT-TMB und CONTEC GmbH fertigen und optimieren die Versuchsmuster und die Einhausung mit Absaugung weiter.

AP7: Beginn mit der Durchführung der experimentellen Versuchsreihen

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

Keine

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

Geplante Veröffentlichungen:

08/2021 KONTEC Symposium 2021

09/2021 DEM Symposium 2021

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Hochschule Konstanz – Technik, Wirtschaft und Gestaltung HTWG, Labor für Produktentwicklung und Maschinenkonstruktion, Alfred-Wachtel-Str. 8, 78462 Konstanz	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont) Teilvorhaben: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 309.288,00 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Dr.sc.agr. Kurt Heppler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> kheppler@htwg-konstanz.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an den restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.11.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.05.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort

AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

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

Während des Berichtszeitraumes sind im Wesentlichen die Arbeiten von AP 3, AP 4 und AP 5 in enger Zusammenarbeit zwischen KIT-TMB, HTWG, CONTEC GmbH und sat. Kerntechnik GmbH durchgeführt worden.

#### AP 3: Aufbau des Versuchstandes

Die Probekörper wurden in der Werkstatt des KIT-TMB hergestellt. Die Prüfung der Druckfestigkeit von Probewürfeln ist bei der MPA Karlsruhe erfolgreich durchgeführt worden.

Die Einhausung wurde geplant. Dies ergab Folgendes:

Eine einfache aufklappbare Deckenklappe (obere Seite) und eine feste Rückwand aus Holz mit Anschlüssen für die integrierte Absaugung (hintere Seite) sind für die Einhausung des Versuchstandes aufgebaut worden.

Eine Laserscanner-Halterung wurde entsprechend dem Anwendungsbedarf konzipiert und hergestellt.

Es wurde begonnen eine Werkzeughalterung entsprechend dem Anwendungsbedarf zu konzipieren und herzustellen. Die Werkzeughalterung ist eine sehr wichtige Komponente für die Versuchsdurchführung und soll die Einstellung einer beliebigen Bearbeitungsrichtung, -winkel und -höhe ermöglichen. Nicht alle Geräte können mit derselben Werkzeughalterung eingespannt werden, weshalb diese modifizierbar ausgestaltet wird.

Eine Gefährdungsbeurteilung für eine sichere und reibungslose Versuchsdurchführung wurde mit Unterstützung der sat. Kerntechnik GmbH erstellt.

#### AP 4: Inbetriebnahme des Versuchstandes/ der Messtechnik und Optimierung

Die ausgewählten Maschinen sind handgeführt in Betrieb genommen worden.

Der Laserscanner wurde auf die Laserscanner-Halterung montiert und in Betrieb genommen.

Ein Schallpegelmessgerät ist getestet und wird für die weiteren Versuche bereitgestellt.

Auch ein Vibrationsmessgerät wird weiter getestet und für die Versuche vorbereitet.

#### AP5: Entwicklung und Anfertigung des Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

In Kooperation mit der CONTEC GmbH hat die HTWG für die Teilfunktionen: „Abtragsprinzip“, „Abraum auffangen“ und „Werkzeug halten/ führen“ Wirkprinzipien für die Versuchsmuster erarbeitet.

Für alle Teilfunktionen (gleichläufiger und gegenläufige Stufenfräser, oszillierendes Werkzeug für hochfrequentes Raspeln) wurden CAD-Modelle erstellt und die Konstruktionen optimiert/vereinfacht.

Es wurden Winkelschleifer als Antriebe bestellt und in Betrieb genommen. Zudem konnten erste Frässcheiben angefertigt werden.

Die Firma CONTEC GmbH beginnt mit dem Bau des ersten Versuchsmusters (gleichläufiger Stufenfräser) und beschäftigt sich mit einem passenden Gehäuse und einer entsprechenden Absaugung.

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

AP 3: Die Einhausung für den Prüfstand wird in der Werkstatt des KIT-TMB weiter aufgebaut.

AP 4: In Zusammenarbeit von KIT-TMB und der HTWG sollen die Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung weitergeführt werden.

AP 5: Die Projektpartner HTWG, KIT-TMB und CONTEC GmbH fertigen und optimieren die Versuchsmuster und die Einhausung mit Absaugung weiter.

AP7: Beginn mit der Durchführung der experimentellen Versuchsreihen

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

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Geplante Veröffentlichungen:

08/2021 KONTEC Symposium 2021

09/2021 DEM Symposium 2021

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> CONTEC - Maschinenbau - & Entwicklungstechnik GmbH Hauptstraße 146, 57518 Alsdorf	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 191250,05 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Johannes Greb	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> greb@contecgmbh.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa über 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an der restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.11.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.05.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort

AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

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

Während des Berichtszeitraumes sind im Wesentlichen die Arbeiten von AP 5 in enger Zusammenarbeit zwischen KIT-TMB, HTWG, sat. Kerntechnik GmbH und CONTEC GmbH durchgeführt worden.

#### AP5: Entwicklung und Anfertigung des Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

In Kooperation mit der HTWG hat die CONTEC GmbH für die Teilfunktionen: „Abtragsprinzip“, „Abraum auffangen“ und „Werkzeug halten/ führen“ Wirkprinzipien für die Versuchsmuster erarbeitet.

Für alle Teilfunktionen (gleichläufiger und gegenläufige Stufenfräser, oszillierendes Werkzeug für hochfrequentes Raspeln) wurden CAD-Modelle erstellt und die Konstruktionen optimiert/vereinfacht.

Es wurden Winkelschleifer als Antriebe bestellt und in Betrieb genommen. Zudem konnten erste Frässscheiben angefertigt werden.

Die Firma CONTEC GmbH beginnt mit dem Bau des ersten Versuchsmusters (gleichläufiger Stufenfräser) und beschäftigt sich mit einem passenden Gehäuse und einer entsprechenden Absaugung.

Parallel baut die CONTEC GmbH den ersten Gegenläufigen Stufenfräser.

Für beide Fräsvarianten werden die erforderlichen Diamantrennscheiben in den erforderlichen Durchmessern hergestellt.

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

AP 5: Die Projektpartner HTWG, KIT-TMB und CONTEC GmbH fertigen und optimieren die Versuchsmuster und die Einhausung mit Absaugung weiter.

AP7: Beginn mit der Durchführung der experimentellen Versuchsreihen

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

Keine

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

Geplante Veröffentlichungen:

08/2021 KONTEC Symposium 2021

09/2021 DEM Symposium 2021

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9416D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> SAT Kerntechnik GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Gerätes für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2019 bis 31.07.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 541.108,80 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Stefan Stemmler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> stemmler@sat-kerntechnik.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur eine Oberflächendekontamination aller Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen etwa 150.000 m<sup>2</sup> Betonoberflächen, die für die Freigabe bis zu einer bestimmten Tiefe gleichmäßig dekontaminiert werden müssen, bevor anschließend die Rückbauarbeiten an der restlichen Gebäudestrukturen ausgeführt werden können. Diese Arbeiten sind mit großen technischen Herausforderungen verbunden, da neben Ecken und Kanten mit zahlreichen geometrischen Wandstrukturen (Störstellen genannt) zu rechnen ist. Die Verwendung von Nadelpistolen, Hammerwerken, Stock- und Schleifgeräten entspricht dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte wurden nicht speziell für die Dekontamination von Gebäudestrukturen entwickelt und haben oftmals keine integrierten Absaugsysteme.

Ziel des Forschungsvorhabens ist daher einen teilautomatisierten Demonstrator für eine trocken-mechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen zu entwickeln. Der Prototyp wird an einem eigenen Versuchsstand getestet und optimiert. Der Nachweis der Funktionsfähigkeit im realen Umfeld ist vorgesehen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.08.19-31.12.19): Grundlagenanalyse von Ecken, Kanten, Störstellen sowie Geräteauswahl
- AP 2: (01.01.20-30.04.20): Anforderung des Versuchsstandes
- AP 3: (01.03.20-31.01.21): Aufbau des Versuchsstandes
- AP 4: (01.09.20-31.07.21): Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung
- AP 5: (01.11.20-31.08.21): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster/Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung
- AP 6: (01.08.21-30.09.21): Zusammenführung und Endmontage der Teilsysteme der Versuchsmuster
- AP 7: (01.05.21-31.12.21): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse einschließlich Verbesserung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.01.22-30.04.22): Versuche vor Ort
- AP 9: (01.05.22-31.07.22): Dokumentation und Evaluation

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

Während des Berichtszeitraumes sind im Wesentlichen die Arbeiten von AP 3, AP 4 und AP 5 in enger Zusammenarbeit zwischen KIT-TMB, HTWG, CONTEC GmbH und SAT Kerntechnik GmbH durchgeführt worden. Wir bieten die Beratungsleistungen für andere Projektteilnehmer in folgende Arbeitspakete.

#### AP 3: Aufbau des Versuchstandes

Die Probekörper wurden in der Werkstatt des KIT-TMB hergestellt. Die Prüfung der Druckfestigkeit von Probewürfeln ist bei der MPA Karlsruhe erfolgreich durchgeführt worden.

Die Einhausung wurde geplant. Dies ergab Folgendes:

Eine einfache aufklappbare Deckenklappe (obere Seite) und eine feste Rückwand aus Holz mit Anschlüssen für die integrierte Absaugung (hintere Seite) sind für die Einhausung des Versuchstandes aufgebaut worden.

Eine Laserscanner-Halterung wurde entsprechend dem Anwendungsbedarf konzipiert und hergestellt.

Es wurde begonnen eine Werkzeughalterung entsprechend dem Anwendungsbedarf zu konzipieren und herzustellen. Die Werkzeughalterung ist eine sehr wichtige Komponente für die Versuchsdurchführung und soll die Einstellung einer beliebigen Bearbeitungsrichtung, -winkel und -höhe ermöglichen. Nicht alle Geräte können mit derselben Werkzeughalterung eingespannt werden, weshalb diese modifizierbar ausgestaltet wird.

Eine Gefährdungsbeurteilung für eine sichere und reibungslose Versuchsdurchführung wurde mit Unterstützung der SAT Kerntechnik GmbH erstellt.

#### AP 4: Inbetriebnahme des Versuchstandes/ der Messtechnik und Optimierung

Die ausgewählten Maschinen sind handgeführt in Betrieb genommen worden.

Der Laserscanner wurde auf die Laserscanner-Halterung montiert und in Betrieb genommen.

Ein Schallpegelmessgerät ist getestet und wird für die weiteren Versuche bereitgestellt.

Auch ein Vibrationsmessgerät wird weiter getestet und für die Versuche vorbereitet.

#### AP5: Entwicklung und Anfertigung des Versuchsmusters/ Entwicklung und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung

In Kooperation mit der CONTEC GmbH hat die HTWG für die Teilfunktionen: „Abtragsprinzip“, „Abraum auffangen“ und „Werkzeug halten/ führen“ Wirkprinzipien für die Versuchsmuster erarbeitet.

Für alle Teilfunktionen (gleichläufiger und gegenläufige Stufenfräser, oszillierendes Werkzeug für hochfrequentes Raspeln) wurden CAD-Modelle erstellt und die Konstruktionen optimiert/vereinfacht.

Es wurden Winkelschleifer als Antriebe bestellt und in Betrieb genommen. Zudem konnten erste Frässcheiben angefertigt werden.

Die Firma CONTEC GmbH beginnt mit dem Bau des ersten Versuchsmusters (gleichläufiger Stufenfräser) und beschäftigt sich mit einem passenden Gehäuse und einer entsprechenden Absaugung.

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

AP 3: Die Einhausung für den Prüfstand wird in der Werkstatt des KIT-TMB weiter aufgebaut.

AP 4: In Zusammenarbeit von KIT-TMB und der HTWG sollen die Inbetriebnahme des Versuchsstandes/ der Messtechnik und Optimierung weitergeführt werden.

AP 5: Die Projektpartner HTWG, KIT-TMB und CONTEC GmbH fertigen und optimieren die Versuchsmuster und die Einhausung mit Absaugung weiter.

AP7: Beginn mit der Durchführung der experimentellen Versuchsreihen

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

Keine

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

Geplante Veröffentlichungen:

08/2021 KONTEC Symposium 2021

09/2021 DEM Symposium 2021

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9418A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt LaDECO: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminationstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 816.489,05 €
<b>Projektleiter:</b> Prof. Dr.-Ing. Antonio Hurtado	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Antonio.Hurtado@tu-dresden.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Projekt LaDECO sollen umfassende Erkenntnisse zu noch offenen Fragestellungen der laserbasierten Dekontamination gegeben werden, um damit die Kenntnisse zur Prozesssicherheit zu vertiefen und praxistaugliche Verfahren zur Prozesskontrolle zu entwickeln.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Projektarbeit liegt in der Charakterisierung der entstehenden Sekundäremissionen (Partikel und Gase). In den bisherigen Untersuchungen wurde eine intensive Partikelentstehung während der Laserabtragsprozesse beobachtet. Da diese Partikel -prozessparameterabhängig- nanoskalig und damit lungengängig sind, soll der Zusammenhang zwischen Prozessparametern und Partikeleigenschaften aufgeklärt werden. Die Arbeiten sollen in einer Modellentwicklung für die Partikelentstehung in Laserabtragsprozessen münden. Darauf soll die sicherheitstechnische Bewertung der Partikelentstehung aufbauen, die eine Auswahl von Systemen zur höchstmöglichen Rückhaltung der Partikel ermöglicht.

Ein weiterer wesentlicher Schwerpunkt liegt in der Weiterentwicklung des Verfahrens der Dekontamination von metallischen Oberflächen. Entsprechend den in kerntechnischen Anlagen real existierenden Gegebenheiten und in Anlehnung an dort tatsächlich gemessene Nuklidvektoren werden diese Oberflächenvarianten definiert kontaminiert und der Dekontaminationsfaktor nach Laserabtrag anhand radiologischer Messungen ermittelt und optimiert.

Zur Absicherung des Einsatzvermögens von Lasertechnik unter stark radioaktiven Bedingungen werden in Kooperation mit Fraunhofer INT die optischen Komponenten in Langzeitversuchen hohen Strahldosen ausgesetzt und online die Dämpfung der Optiken ermittelt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- TUD-1: Entwicklung und Aufbau eines Teststandes zur Untersuchung der Partikelentstehung,  
Status: abgeschlossen
- TUD-2: Charakterisierung der freigesetzten Partikel und Auswahl von Systemen zur Rückhaltung,  
Status: in Vorbereitung
- TUD-3: Durchführung von Versuchen auf radiologisch kontaminierten Oberflächen,  
Status: in Bearbeitung
- TUD-4: Ausschluss der Schädigung optischer Komponenten durch radioaktive Strahlung,  
Status: in Bearbeitung
- TUD-9 Erstellung des Abschlussberichtes,  
Status: nicht begonnen

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

**TUD-1:** Die Realisierung des Versuchstandes wurde im zurückliegenden Berichtszeitraum abgeschlossen. Neben der notwendigen Messtechnik zur Charakterisierung der Prozesszustände wurde auch die Aerosolentnahme und zugehörige Messtechnik installiert und getestet. Die Erprobung des Versuchstandes konnte aufgrund von Defekten an den vorhandenen Lasern bisher nur mit einem Aerosolgenerator und einer Salzlösung durchgeführt werden.

Für die Versuche im TUD-2 wurden reproduzierbare Betriebspunkte der Absaugung festgelegt und charakterisiert. Dazu wurden u.a. die Strömungsgeschwindigkeiten, Druckverluste und die zugehörige Partikeltransporteffizienz bestimmt.

**TUD-3:** Die vorbereitenden Arbeiten zum Abtrag radiologisch kontaminierter Oberflächen wurden in folgenden Punkten abgeschlossen: Ermittlung der in kerntechnischen Anlagen typischen Oberflächen (Edelstahl, Baustahl, Baustahl oxidiert, Baustahl verzinkt, Baustahl lackiert), Beschaffung der Materialien, Präparation der Oberflächen zur Erlangung der real existierenden Oberflächengüte und Charakterisierung der Oberflächen als Referenz.

Zur Fixierung der radiologischen Abtragsprodukte wurde eine Einheit konstruiert, die für eine nahezu laminare Überströmung der in Bearbeitung befindlichen Fläche sorgt und die abgetragenen Partikel direkt vor Ort einem Filtersystem zuführt. Es wurden drei verschiedene Filterdesigns zur Untersuchung ihrer Effizienz ausgewählt und charakterisiert.

Die zum Einsatz kommenden vier Radionuklide Cs137, Sr85, Co60 und Am241 wurden mit der KTE abgestimmt. Zwei Angebote zur Lieferung der in wässriger Lösung befindlichen Nuklide liegen vor und können bei absehbarem Einsatz vom Radionuklidlabor bestellt werden. Die Vermessung der Oberflächen vor und nach der Dekontamination ist vereinbart und abgestimmt.

Erste Versuche zur Ermittlung von Laserparametern zum lateral vollständigen Abtrag von Oberflächen als Funktion (Pulsfrequenz, Scanfrequenz, Vorschub) wurden erfolgreich durchgeführt. Der Parametersatz in geometrischer Hinsicht steht damit für die Abtragsversuche zur Verfügung.

**TUD-4:** Die praktischen Untersuchungen zur Schädigung optischer Komponenten durch radioaktive Strahlung wurden planmäßig mit dem IV. Quartal 2020 abgeschlossen. Sowohl eine für die Lasermaterialbearbeitung typische Faser für den Hochleistungsbereich als auch optische Gläser (exponiert als Schutzgläser oder Fokussieroptiken) wurden einer für SiO<sub>2</sub> Äquivalentdosis

von 1000 Gy bei einer Dosisrate von rund  $60 \text{ Gyh}^{-1}$  ausgesetzt. Bei der Lichtleitfaser konnte simultan während der Gammabestrahlung Laserstrahlung transmittiert werden und die Dämpfung der optischen Eigenschaften der Faser während der Gammabestrahlung ermittelt werden. Bei den optischen Gläsern wurden die Transmissionseigenschaften vor, direkt nach der Bestrahlung und im zeitlichen Abstand von 14 Tagen gemessen und unter Berücksichtigung von Qualitätsschwankungen zwischen den einzelnen Gläsern und der Messunsicherheit ausgewertet.

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

**TUD-1:** keine

**TUD-2:** In Vorbereitung der Charakterisierung der freigesetzten Partikel wird ein Referenzlacksystem festgelegt und die entsprechenden Metall- und Betonproben präpariert. Die Analyse der Betonzusammensetzung und der Lackbestandteile wird vorbereitet.

**TUD-3:** Einer planmäßigen Fortführung der praktischen Versuche zur Bestimmung der Parameter zum Abtrag jeder der verschiedenen Oberflächen als Funktion (Laserleistung, Laserintensität, Defokussierung, Anzahl der Bearbeitungen) stehen seit Dezember 2020 der reglementierte Präsenzbetrieb und die Hygieneanforderungen der TU Dresden entgegen. Maßnahmen zur Fortführung der praktischen Tätigkeiten unter Berücksichtigung des geltenden Hygienekonzeptes und der Lasersicherheit sind in Arbeit.

Die Absaugeinheit befindet sich in der Herstellung. Nach Fertigstellung werden sich noch im I. Quartal 2021 Untersuchungen der Wirksamkeit der Filtersysteme anschließen.

**TUD-4:** Die vollständige Auswertung der Ergebnisse unter Betrachtung möglicher Schädigungsmechanismen in den optischen Komponenten wird im I. Quartal 2021 abgeschlossen.

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

-

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

-

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9418B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Qualifizierung der laserbasierten Dekontaminierungstechnologie für den Einsatz im nuklearen Rückbau (LaDECO)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2019 bis 30.09.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 617.234,40 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hartmut.krause@iwtt.tu-freiberg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Projekt LaDECO sollen umfassende Erkenntnisse zu noch offenen Fragestellungen der laserbasierten Dekontamination gegeben werden, um damit die Kenntnisse zur Prozesssicherheit zu vertiefen und praxistaugliche Verfahren zur Prozesskontrolle zu entwickeln.

Schwerpunkt der Arbeiten an der TU Bergakademie Freiberg sind die detaillierte Untersuchung und Optimierung der Verbrennung der PCB-haltigen Lackschichten sowie die Entwicklung eines online-Monitoring-Verfahrens für die Überwachung der Verbrennung und die Überprüfung des Lackabtrags von Betonoberflächen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Verbrennung der Lackschichten ist das Schadstoffemissionspotenzial und dessen Zusammenhang mit der Temperatur- und der Verbrennungsmittelzuführung zu bestimmen. Darauf aufbauend soll ein Modell zur thermischen Umsetzung des Lackes und der Partikelentstehung während des Dekontaminationsprozesses erstellt werden, welches als Grundlage für die sicherheitstechnische Bewertung und die Auswahl geeigneter Filtersysteme dient. Diese Untersuchungen werden durch numerische Simulationen unterstützt. Zur Überwachung der vollständigen Verbrennung ist ein online-Monitoring-Verfahren zu entwickeln und in das Dekontaminationssystem zu integrieren. Neben der Verbrennungsüberwachung ist ein bildgebendes Verfahren zu entwickeln, welches die Vollständigkeit des Lackabtrages auf Betonoberflächen nach der Laser-Dekontamination überwachen kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 5: Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von Lacken mittels berührungsloser Analytik (Status: in Bearbeitung)
- AP 6: Numerische Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von Lacken und zum Partikeltransport (Status: in Bearbeitung)
- AP 7: Konzeptionierung und Entwicklung eines Detektionssystems zur Identifizierung von Lackschichten auf Betonflächen (Status: abgeschlossen)
- AP 8: Untersuchung zur Nachweisbarkeit von Lackschichten und -resten auf Betonflächen (Status: in Bearbeitung)
- AP 9: Erstellung des Abschlussberichts (Status: planmäßig noch nicht begonnen)

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

**AP 5:** Die Auswertung der Ergebnisse zur Detektion von CCI-Radikalen aus LaPLUS erbrachten keine für LaDECO verwertbaren Ergebnisse. Ebenso kann der Versuchsstand aufgrund der erweiterten Aufgabenstellung nicht wiederverwendet werden. Daraufhin wurde ein neuer Versuchsstand konzipiert und konstruiert. Ein neuer IR-Strahler und neue Messtechnik wurden beschafft. Beschaffung und Bau des neuen Versuchsstandes wurden begonnen. Zudem wurden Lackproben gefertigt, mit welchen die systematische Untersuchung der Verbrennungs- und Zersetzungsreaktionen durchgeführt werden soll.

**AP 6:** Für die Modellierung des Betonarbeitskopfes wurde zunächst das 3D-CAD-Modell für die numerische Modellierung angepasst, Fehler beseitigt und lokal vereinfacht, um die Anzahl der numerischen Elemente zu begrenzen. Weiterhin besteht beim Betonarbeitskopf das Problem sehr unterschiedlicher Längenskalen. So variieren die charakteristischen Abmessungen des zu modellierenden Teils zwischen 40 cm und 0,2 mm im Bereich der Düsenöffnungen für die Spülströmung. Nach einer Sensitivitätsanalyse für die Gitterabmessungen wurde das Modell in zwei Teilbereiche unterteilt, den Einlassbereich für Spülung der Laseroptik sowie den Einlassbereich aus der Umgebung und die Abtragszone. Die Strömungssimulation der Spülströmung im Einlassbereich der Spülung werden momentan durchgeführt.

**AP 7:** Die Vorversuche wurden unter den Gesichtspunkten des neuen Projektes ausgewertet und darauf aufbauend wurde ein neues Konzept für den Versuchsstand zur Abtragsimulation entwickelt. Die Konstruktion des Versuchstandes wurde abgeschlossen. Zusätzlich wurden die erforderlichen Bauteile, insb. zwei neue Strahlungsquellen beschafft. Zudem wurden Lackproben für die Versuche gefertigt. Somit steht den Untersuchungen zur Nachweisbarkeit von Lackschichten im Rahmen von Arbeitspaket 8 nichts mehr im Wege. Dieses Arbeitspaket ist damit abgeschlossen.

**AP 8:** Die Versuche zur systematischen Ermittlung der Stoffdaten wurden begonnen. Es liegen jedoch noch keine verwertbaren Ergebnisse vor.

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

**AP 5:** Der Bau des Versuchsstandes wird fortgesetzt und soll bis Ende März 2021 abgeschlossen werden. Nach erfolgter Inbetriebnahme wird Funktion und Messtechnik durch Vorversuche überprüft. Parallel dazu wird ein Versuchsplan erstellt und mit der Untersuchung der Verbrennungs- und Zersetzungsreaktionen begonnen. Im Rahmen des AP soll eine Messkampagne an der TU Dresden am realen Arbeitskopf begleitet und ausgewertet werden. Aufbauend auf den ersten Ergebnissen am Versuchsstand und bei der Messkampagne der TU Dresden werden weiteren Versuche geplant.

**AP 6:** Die Ergebnisse der instationären Simulationen im Spülbereich der Laseroptik sollen abgeschlossen und anschließend ausgewertet werden. Das sich ergebende Strömungsprofil an der Schnittstelle ist gleichzeitig Eingangsgröße für den vorderen Bereich des Betonarbeitskopfes. Die Modellierung der Laserquelle soll im nächsten Schritt durch einen gerichteten Strahler implementiert werden. Anschließend werden die Simulationen im Bereich der Abtragszone gestartet.

**AP 8:** Die Versuche zur Ermittlung der Stoffdaten werden fortgeführt und ausgewertet. Auf Grundlage dieser Messdaten wird die Software zur Auswertung und Visualisierung weiterentwickelt und mit der Erstellung einer Heuristik zur Beurteilung der Oberflächengüte der Proben begonnen.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9421A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWE Nuclear GmbH, Huysenallee 2, 45128 Essen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kernkraftwerken - Teilvorhaben: Verfahrenstechnik und Engineering"	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2020 bis 28.02.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 378.228,62 €
<b>Projektleiter:</b> Herr Jörg Recknagel	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Joerg.Recknagel@kkw.rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

### Gesamtzielsetzung des Verbundes:

Ziel des Projekts ist, erstmals eine automatisierte und autonome Abtragung der Beschichtung von Bauteilgruppen mittels UHD-Wasserstrahltechnik beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu realisieren und im KKW Biblis im industriellen, produktiven Maßstab einzusetzen. Die Bauteilgeometrien sind höchst unterschiedlich und überwiegend nicht durch geometrische Primitive beschreibbar. Es werden zwei Prototypanlagen gebaut, zunächst ein Prototyp im Labormaßstab aus dem anschließend in mehreren Evaluierungsrunden ein Prototyp in Industriequalität entwickelt wird.

### 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 integriert diese in die vorhandene Infrastruktur. Die Arbeitspakete werden dabei in enger Zusammenarbeit unter stetiger Evaluierung der Ergebnisse mit dem IGD bearbeitet.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in acht Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 – Anforderungen/Systemdesign

AP2 – Autonome 3D-Erfassung der Oberflächengeometrie

AP3 – Robotergestützte Entschichtung

AP4 – Simulation und Integration

AP5 – Prototypenbau

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP6 – Anlagenimplementierung

Implementierung des Prototyp2 in den Kontrollbereich des KWB

AP7 – Evaluierung

AP8 – Projektmanagement

RWE Nuclear GmbH ist Projektkoordinator und im 2. Halbjahr an den AP1, AP3, sowie AP5 bis AP8 beteiligt.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

#### AP1: Anforderungen/Systemdesign

- Auswertung der Versuchsdaten des Wasserwerkzeugs vom Juni 2020.
- Ableitung einer Konstruktion für einen neuen, speziell angepassten Düsenkopf mit eigenem Antrieb.
- Ingenieurtechnische Betreuung der Konstruktion des finalen Wasserwerkzeugs und Ableitung weiterer technischer Optimierungen.
- Veranlassung, Betreuung und Auswertung von ersten Leistungstests (Feldversuche Teil 2a) mit dem ersten Prototyp an original beschichteten Blechteilen.
- Aus den Versuchsergebnissen wurden die Wirkzonen und der Einfluss unterschiedlicher Parameter analysiert sowie erste Parameterarrays für eine optimierte Strahldüsenführung abgeleitet
- Erstellung eines 3D-druckfähigen CAD-Modells zur Analyse der Greifkinematik am Roboter-Demonstrator IGD01. Bewertung der Greifanalysen.
- Evaluierung verschiedener Aufstellungsvarianten und deren technische Beurteilung und Bewertung in Anlehnung an die VDI 2222 und 2225.  
Als Ergebnis zeigte sich, dass die technisch/wirtschaftlich beste und sicherste Lösung darin besteht, die Geometrieerkennung und Bearbeitung der Bauteile zentral in der Dekontbox am Gelenkarm desselben Industrieroboters durchzuführen.

#### AP3: robotergestützte Entschichtung

- Erstellung von Auswertetabellen und graphischen Ableitungen von Grenzkurven zur Erfassung der physikalischen Wirkparameter des neuen Wasserwerkzeug-Prototyps.
- Entwicklung eines Konzeptes zur Robotersteuerung, um Kollisionen mit Störkanten außerhalb des Arbeitsvolumens und Schäden zu vermeiden (Kollision mit Umgebungswänden, Boden, Decke, Raumeinbauten, Drehtisch und Spannplatte), da am designierten Robotermodell keine direkten Safety Planes mit Performance Level definierbar sind. Maßnahmen: Mechanische Beschränkung Achse 1, Raumbereichsbeschränkung durch Paralleltask, Auslesen und Beschränken von Drehmoment (Achsantriebe), Achsgeschwindigkeit und kartesische Geschwindigkeit mit hoher Frequenz.

#### AP5 Prototypenbau RWE

- Abstimmung der Aufstellung für den Anlagenprototyp RWE01/02 mit den beteiligten Fachabteilungen am Standort Kraftwerk Biblis.
- Vorstellung und grundsätzliche Abstimmung des Projektablaufs mit dem Arbeitsschutz seitens Leitendem Sicherheitsingenieur, Berufsgenossenschaft, Bezirksregierung.
- CAD-Vorplanung für den Roboter-Standort, die Aufstellung der Schaltschränke, Sicherheitskonzept und Trassenführung für die Medienleitungen, Stromversorgungs- und Signalleitungen.
- Technische Lösungen für den Schutz der optischen und elektronischen Komponenten des Scankopfes in der Feuchtraumatmosphäre der Dekontbox wurden erarbeitet.
- Ausarbeitung des finalen Aufstellungskonzeptes und der technischen Spezifikation für den RWE01 Prototyp.
- Definition des Aufgabenumfanges für den Systemintegrator beim Prototypenbau. Erarbeitung eines Lastenhefts und Ausschreibung der Leistungen. Vorbereitung der Auftragsvergabe.

AP6: Anlagenimplementierung

- CAD-gestützte Aufstellungsplanung für den Prototyp RWE02 im Kontrollbereich des Kraftwerks Biblis.
- Festlegung des Leistungsumfangs für den Bereich „Anlagenbau“, der die Implementierung der Prototypanlage begleiten soll.
- Ausarbeitung der technischen Spezifikationen in Form eines Lastenheftes.
- Anstoßen des Beschaffungsprozesses für den Bereich „Anlagenbau“ zur Integration des Prototyps RWE01 auf dem Werksgelände und zur Implementierung der Anlage als Prototyp RWE02 in den Kontrollbereich Block A.
- Erarbeitung eines Schnittstellenplans zur Dokumentation und Darstellung der Prozess- und Arbeitsschritte der verschiedenen Projektteilnehmer

AP7: Evaluierung

- Ermittlung der günstigsten Prozessführung und bestmöglichen Platzierung für den Scan- und Bearbeitungsprozess sowie der Evaluierung von technisch geeigneten Lösungen für ein integriertes Konzept, das für die Feuchtraumatmosphäre der Dekontbox geeignet ist.
- Aufbau eines Konzeptes für die Qualitätssicherung der einzelnen Entwicklungsschritte.

AP8: Projektsteuerung/Administrative Projektarbeit

- Projektcontrolling -inhaltlich/kostenseitig. Vereinbarung weiterer verbindlicher Projektziele/Meilensteine zwischen den Projektpartnern.
- Planung für die Einbindung und Koordination der künftigen neuen Projektteilnehmer (Systemintegration/Anlagenbauer).
- Fortschreibung Projektterminplan, Fortschreibung Master-Memoliste und Projektdokumentation auch für Systemintegration und Anlagenbau.
- Durchführung von zwei Meilenstein-Progressmeetings für den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Gesamtprozesses am Demonstrator IGD01 als Präsenzveranstaltung für den Projektträger und intern für die Geschäftsführung.
- Durchführung von 9 Projektmeetings der Projektpartner (teils als Präsenzveranstaltung, überwiegend als Online-Meeting).
- Teilnahme an zahlreichen Fachgesprächen mit Herstellern und Lieferanten (überwiegend online).
- Organisation und Betreuung der Versuche für die UHD-Wasserstrahltechnik im Technikum der Firma URACA.
- Berichtswesen extern für den Projektträger, intern für die Geschäftsführung.

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

AP1: Durchführung weiterer Feldversuche mit dem Wasserwerkzeug zur weiteren Erhebung der phys. Wirkparameter und des Verhaltens an ausgewählten Bauteilgeometrien. Technische Umsetzung weiterer konstruktiver Optimierungen am Wasserwerkzeug.

AP3: Numerische Ableitung der Wirkparameter.

AP5: Der Fokus liegt auf den Vorbereitungen für RWE01. Nachfolgende Schritte: Beauftragung des Systemintegrators, Abnahme und Beschaffung des Wasserwerkzeugs, Ausschreibung und Beauftragung für den Anlagenbauer.

AP6, AP7, AP8: Vorbereitende Maßnahmen zur Implementierung im Kontrollbereich, Bewertung und Controlling der Leistungen des Anlagenbauers/Systemintegrators und der Projektpartner sowie deren Koordinierung.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

keine neuen Erkenntnisse

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9421B
<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> Verbundvorhaben: Robotergestützte Bearbeitung von Baugruppen beim Rückbau von Kraftwerken - Teilvorhaben: Autonome Digitalisierung und Entschichtung von Baugruppen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2020 bis 28.02.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.170.790,66 €
<b>Projektleiter:</b> Herr Pedro Santos	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> pedro.santos@igd.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

### Gesamtzielsetzung des Verbundes:

Ziel des Projekts ist, erstmals eine automatisierte und autonome Abtragung der Beschichtung von Bauteilgruppen mittels UHD-Wasserstrahltechnik beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu realisieren und im KKW Biblis im industriellen, produktiven Maßstab einzusetzen. Die Bauteilgeometrien sind höchst unterschiedlich und überwiegend nicht durch geometrische Primitive beschreibbar. Es werden zwei Prototypanlagen gebaut, zunächst ein Prototyp im Labormaßstab aus dem anschließend in mehreren Evaluierungsrunden ein Prototyp in Industriequalität entwickelt wird.

### Teilprojekt IGD:

Das Fraunhofer IGD entwickelt die notwendige autonome Roboter-gestützte 3D-Digitalisierung beliebiger Objektoberflächen, sowie die Bahnplanung für einen mit UHD-Wasserstrahltechnik ausgestatteten Entschichtungsroboter unter Berücksichtigung der Strahldüsen-Wirkparameter und Störgeometrien.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in acht Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 – Anforderungen/Systemdesign

AP2 – Autonome 3D-Erfassung der Oberflächengeometrie

AP3 – Robotergestützte Entschichtung

AP4 – Simulation und Integration

AP5 – Prototypenbau

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP6 – Anlagenimplementierung

Implementierung des Prototyp2 in den Kontrollbereich des KWB

AP7 – Evaluierung

AP8 – Projektmanagement

Das Fraunhofer IGD ist an AP1-AP7 beteiligt.

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

#### AP1: Anforderungen/Systemdesign

- Der größte Teil von diesem AP wurde im ersten Halbjahr ausgeführt. Übriggeblieben sind kleinere Systementscheidungen, die mit der endgültigen Konfiguration der Demonstratoren zusammenhängen und in den jeweiligen APs durchgeführt werden.
- Das AP wurde noch etwas verlängert, da Untersuchungen bei URAKA und die Zusammenfassung von Scanner und Reinigungseinheit zu berücksichtigen waren.

#### AP2: Autonome 3D- Erfassung

Ziel: Erfassung eines unbekanntes teilweise glänzenden Objektes. Der Hauptfokus lag im zweiten Halbjahr auf der Fertigstellung des 1. Demonstrators am IGD. In diesem wurden geeignete Verfahren aus dem 1. Halbjahr integriert. Zudem stellte sich heraus, dass eine Kombination aus Erfassung und Reinigungsmaschine große Vorteile gegenüber zwei getrennten Stationen hat, z.B. bezüglich der Arbeitssicherheit. Schwerpunkte waren hier folgende Tätigkeiten:

- Kombination von Scan und Reinigungsprozess in einer Maschine.
- Optimierung der verteilten Scannerarchitektur um alle zeitkritische Operationen auf im Scankopf befestigten Microrechner auslagern zu können. Dies war auch im Hinblick auf eine spätere CE Zertifizierung des Gesamtsystems notwendig und erhöht die Stabilität des Systems.
- Der Scankopf verwendet jetzt durchgehend CE zertifizierte Basiskomponenten.
- Filterung der Scanergebnisse für Kandidatensuche der Bahnplanung
- Entwicklung, Bau und Verwendung eines 1:1 Scankopf-Dummys des späteren Prototyps im Kraftwerk Biblis, um erste Erkenntnisse bezüglich seiner Konstruktion zu gewinnen.

Des Weiteren wurden Arbeiten zur Verbesserung des Demonstrators begonnen:

- Fortentwicklung Hybrides IK Verfahren, um Vorteile von Vorwärtskinematik und der robotereigenen IK zu kombinieren.
- Fortentwicklung eines geschlossenen Regelkreises zwischen Roboter und Scanner basierend auf der Analyse der einzelnen Scanlinien für Nachscans.
- Erste Planungen zur Segmentierung zwischen Objekt und dessen Verspannung.

#### AP3: robotergestützte Entschichtung

Ziel: Reinigung auf Basis von direkt auf Punktwolken erfolgreicher Pfadplanung.

- Für den Demonstrator wurde hier ein erster Ansatz für die Umwandlung von Geometrie in einen Reinigungspfad umgesetzt.
- Arbeiten am Pfadextraktion für die Reinigung wurden fortgesetzt.
- Planungen für die Lösungsraumsuche in der Menge an Basistrajektorien.

#### AP4: Steuerung, Simulation, Integration

Ziel: Entwicklung einer virtuellen Reinigung zur Bahnoptimierung.

- Vorbereitungen für die Berücksichtigung von Parametern, die bei Experimenten bei URACA ermittelt wurden.
- Auswahl von Kollisionserkennungstechniken, um während der Bahnplanung erzeugte nicht erlaubte Bewegungen zu erkennen. Hier sind verschiedenen Grade der Kollisionserkennung möglich. Im Demonstrator wurde ein erstes Verfahren verwendet, das die Reinigungslanze grob als Zylindrisches Objekt betrachtet. Hier wird an einer genaueren Approximation des Werkzeuges gearbeitet, um freiere Platzierungen im Arbeitsraum zu erlauben.

- Die Teile aus AP3 und AP4 bilden hierbei weiterhin ein System bestehend aus Planung und Simulation, die in mehreren Durchläufen optimiert werden kann.

#### AP5 Prototypenbau RWE

- Beiträge zur Konzeptentwicklung für die Aufstellung und den Betrieb von RWE01 / RWE02 außerhalb des Kontrollbereichs, basierend auf dem Design des Laborprototypen und dessen Anpassungen.
- Ergebnisse aus diesem AP wurden auf den Demonstrator am IGD übertragen, um den sich in Planung befindlichen Prototypen II so weit wie möglich simulieren zu können.
- Entwicklung eines 1:1 Dummys des geplanten Reinigungswerkzeugs, um mögliche Probleme frühzeitig zu erkennen.
- Analyse der erforderlichen Schnittstellen für Prototyp II um eine Einheitliche Steuer- und Kontrollschnittstelle für beide Prototypen in AP2 und AP3 zu entwickeln und die damit verbundenen Projektrisiken zu minimieren.

#### AP6: Anlagenimplementierung

- Nur in Bezug auf die Planung der späteren Implementierbarkeit von RWE02.

#### AP7: Evaluierung

Evaluierung der unter AP2, AP3, AP5 und AP6 vorgeschlagenen und bearbeiteten Konzepte im Hinblick auf die technische Umsetzungsfähigkeit (räumliche Anordnung, logistische Abläufe Arbeitssicherheitsaspekte, Verfahrenstechnik). Die Ergebnisse hieraus wurden soweit möglich wieder zurück zum Prototyp übertragen, um Designentscheidungen früh testen zu können.

#### AP:8 Projektsteuerung/Administrative Projektarbeit

- Von RWE durchgeführt.

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

Der nächste Große Meilenstein ist der Abnahme/Funktionstest der Rohform von RWE01 beim Auftragsfertiger. Die wichtigste notwendige Komponente für AP2 und AP3 ist hier die gemeinsame Schnittstelle für beide Prototypen, die sich gerade in Entwicklung befindet. Hierdurch ist es möglich, einen reinen Schnittstellentest durchzuführen, ohne den gesamten Prozess testen zu müssen.

Des Weiteren werden die im Demonstrator gewonnenen Erkenntnisse in AP2,3 und 4 verarbeitet um den Scan, die Reinigung und den Simulationsprozess zu verfeinern.

Erkennung der Verspannung als Störgeometrien ist weiter ein großes Thema, da es unterschiedliche Festhaltetechniken gibt, die verschiedener Erkennungsmethoden bedürfen.

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

Keine neuen gegenüber letztem Bericht.

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

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.11.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425A
<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> Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS)	
<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. Die körperlich sehr anstrengende Arbeit der Rissfreilegung soll so auf nur einen Bediener in einer sicheren Umgebung reduziert werden. Es soll komplett auf den Aufbau eines Gerüsts verzichtet und auf schon vorhandene Transporttechnik (Stapler oder Hubsteiger) zurückgegriffen werden. Somit wird keine weitere Technik außer der Fräseinheit als Anbaugerät für die Transporttechnik benötigt. Außerdem sollen nachgelagerte, schon vorhandene Saugaggregate verwendet werden.

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.

Die entwickelte, hybride Frästrommel, welche durch den phasenweisen Einsatz von Schlaglamellen (Betonabtrag) und Wendeschneidplatten (Stahlabtrag) hochbewehrten Stahlbeton ohne Werkzeugwechsel effizient abtragen kann, stellt einen innovativen und vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieser Problematik dar.

## **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)**

Das Verbundprojekt MAARISS wurde am 19.10.2020 zum 01.11.2020 bewilligt.

Im Anschluss an die internen Organisationsphasen wurde Mitte November 2020 ein Kick-off Meeting aller Projektpartner durchgeführt, aufgrund der aktuellen Covid-19-Pandemie im digitalen Rahmen. Neben dem generellen Projektablauf und der damit verbundenen erneuten Abstimmung des Rahmenzeitplans wurden erste weiterführende Projektaufgaben der Partner koordiniert. Im Fokus stand dabei das Arbeitspaket 1 (Erarbeitung des Lastenheftes), das die Basis für alle weiteren Arbeitspakete darstellt.

Das Arbeitspaket 1 wurde tiefgehend strukturiert und terminlich abgestimmt. Federführend wird das AP 1 durch das Karlsruher Institut für Technologie bearbeitet, welches durch die beiden anderen Projektpartner in diesem Arbeitspaket unterstützt wird. Ziel des Arbeitspaketes ist einerseits den Stand der Technik bezüglich Abtragstechnologien für Stahlbetonstrukturen zu aktualisieren. Hierbei arbeiten insbesondere die Kraftanlagen Heidelberg GmbH zu. Weiterhin wird ein Anforderungsprofil für das zu entwickelnde, mobile Abtragsystem erstellt. Hierzu wird auf Kundenwünsche, -anforderungen sowie Gegebenheiten und Rahmenbedingungen in kerntechnischen Anlagen hinsichtlich Baustrukturen sowie der Handhabung des Werkzeuges zurückgegriffen, welche im Rahmen von „DefAhS“ aufwändig erfasst wurden. Für den Entwurf des mobilen Anbaugeräts mit den anzustrebenden Eigenschaften arbeitet insbesondere die Herrenknecht AG zu.

Diese Informationen werden in einem Lastenheft zusammengefasst. Die Abstimmungen zum AP 1 fanden und finden weiterhin ausschließlich im digitalen Rahmen in Videokonferenzen statt.

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

Bis Ende Februar soll das AP 1 abgeschlossen sein, hier schließt auch der Meilenstein 1 an. Somit sind die Zielparameter definiert und unter allen Partnern abgestimmt.

Im Rahmen des AP 2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ soll der „DefAhS“-Demonstrator am KIT in Betrieb genommen werden. Im Zuge vielseitiger Versuchsreihen sollen die Ergebnisse des Vorgängerprojekts weiter untersucht und optimiert werden, um eine breite Datengrundlage für die Auslegung der „MAARISS“-Komponenten zu schaffen.

Im kommenden Halbjahr startet im Mai zudem das AP 3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“. Hierfür werden bereits seitens des Karlsruher Instituts für Technologie Planungen unternommen, um das Strömungsmodell und ein Absaugungskonzept zu erstellen.

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

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

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

keine

Es haben sich keine Aktualisierungen zu den in der Vorhabensbeschreibung aufgeführten Verwertungsmöglichkeiten ergeben.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.11.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Herrenknecht AG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2020 bis 31.10.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 433.937,82 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Gerhard Wehrmeyer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> wehrmeyer.gerhard@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. Die körperlich sehr anstrengende Arbeit der Rissfreilegung soll so auf nur einen Bediener in einer sicheren Umgebung reduziert werden. Es soll komplett auf den Aufbau eines Gerüsts verzichtet und auf schon vorhandene Transporttechnik (Stapler oder Hubsteiger) zurückgegriffen werden. Somit wird keine weitere Technik außer der Fräseinheit als Anbaugerät für die Transporttechnik benötigt. Außerdem sollen nachgelagerte, schon vorhandene Saugaggregate verwendet werden.

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.

Die entwickelte, hybride Frästrommel, welche durch den phasenweisen Einsatz von Schlaglamellen (Betonabtrag) und Wendeschneidplatten (Stahlabtrag) hochbewehrten Stahlbeton ohne Werkzeugwechsel effizient abtragen kann, stellt einen innovativen und vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieser Problematik dar.

## 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)

Das Verbundprojekt MAARISS wurde am 19.10.2020 zum 01.11.2020 bewilligt.

Mitte November 2020 wurde ein Kick-off Meeting aller Projektpartner durchgeführt, welches aufgrund der aktuellen Covid-19-Pandemie im digitalen Rahmen stattfand. Neben dem generellen Projektablauf und der damit verbundenen erneuten Abstimmung des Rahmenzeitplans wurden erste weiterführende Projektaufgaben der Partner koordiniert. Im Fokus stand dabei das Arbeitspaket 1 (Erarbeitung des Lastenheftes), das die Basis für alle weiteren Arbeitspakete darstellt. Federführend wird das AP 1 durch das Karlsruher Institut für Technologie bearbeitet, welches durch die Kraftanlagen Heidelberg GmbH und die Herrenknecht AG in diesem Arbeitspaket unterstützt wird. Die Herrenknecht AG arbeitet für den Entwurf des mobilen Anbaugeräts mit den anzustrebenden Eigenschaften dem KIT zu. Diese Informationen werden in einem Lastenheft zusammengefasst. Die Abstimmungen zum AP 1 fanden und finden weiterhin ausschließlich im digitalen Rahmen in Videokonferenzen statt.

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

Für das erste Halbjahr 2021 sind die AP 1-3 unter der Federführung des KIT sowie der Start des AP 4 unter der Federführung der Herrenknecht AG geplant. Die Herrenknecht AG unterstützt die Projektpartner in den AP 1-3, diskutiert und erörtert die Ergebnisse mit den Projektpartnern und lässt diese in AP 4 in die Neuentwicklung/-konzeptionierung eines hochmobilen Anbaugerätes einfließen.

Zunächst wird bis Ende Februar das AP 1 „Analyse des Stands der Technik“ abgeschlossen sein. Hierdurch werden die Zielparameter definiert und unter allen Projektpartnern abgestimmt. Im Rahmen des AP 2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ soll der „DefAhS“-Demonstrator am KIT wieder in Betrieb genommen werden. Im Zuge dieser Inbetriebnahme steht die Herrenknecht AG dem KIT sowohl fachlich unterstützend als auch bei eventuell notwendigen konstruktiven Anpassungen des Versuchsstandes zur Seite. Das ab Mai 2021 startende AP 3 „Absaugungskonzept für den Materialtransport“ wird die Herrenknecht AG wieder fachlich unterstützen.

Die Spezifikationen eines Anbaugeräts wurden bereits im Projekt DefAhS definiert und werden in AP 4 um die neu gewonnenen Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1, 2 und 3 erweitert bzw. angepasst. Diese sollen in die Gesamtkonzeption mit einfließen. Weiterhin liegt der Fokus von AP 4 für das erste Halbjahr 2021 vor allem auf den Themen Gewichtsreduktion (Ideensammlung und

Erstellung erster Konzepte einer kompakteren und leichteren Bauweise unter anderem durch den Einsatz neuer Materialien und Anpassung der Konstruktion), Antrieboptimierung sowie der Erstellung erster Konzepte für die Anbindung an ein Trägergerät.

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

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

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

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.11.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9425C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Kraftanlagen Heidelberg GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Mobiles Anbaugerät zur automatisierten Rissüberfräsung (MAARISS)	
<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. Die körperlich sehr anstrengende Arbeit der Rissfreilegung soll so auf nur einen Bediener in einer sicheren Umgebung reduziert werden. Es soll komplett auf den Aufbau eines Gerüsts verzichtet und auf schon vorhandene Transporttechnik (Stapler oder Hubsteiger) zurückgegriffen werden. Somit wird keine weitere Technik außer der Fräseinheit als Anbaugerät für die Transporttechnik benötigt. Außerdem sollen nachgelagerte, schon vorhandene Saugaggregate verwendet werden.

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.

Die entwickelte, hybride Frästrommel, welche durch den phasenweisen Einsatz von Schlaglamellen (Betonabtrag) und Wendeschneidplatten (Stahlabtrag) hochbewehrten Stahlbeton ohne Werkzeugwechsel effizient abtragen kann, stellt einen innovativen und vielversprechenden Ansatz zur Lösung dieser Problematik dar.

## 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)

Das Verbundprojekt MAARISS wurde am 19.10.2020 zum 01.11.2020 bewilligt.

Im Anschluss an die internen Organisationsphasen wurde Mitte November 2020 ein Kick-off Meeting aller Projektpartner durchgeführt, aufgrund der aktuellen Covid-19-Pandemie im digitalen Rahmen. Neben dem generellen Projektablauf und der damit verbundenen erneuten Abstimmung des Rahmenzeitplans wurden erste weiterführende Projektaufgaben der Partner koordiniert. Im Fokus stand dabei das Arbeitspaket 1 (Erarbeitung des Lastenheftes), das die Basis für alle weiteren Arbeitspakete darstellt.

Das Arbeitspaket 1 wurde tiefgehend strukturiert und terminlich abgestimmt. Federführend wird das AP 1 durch das Karlsruher Institut für Technologie bearbeitet, welches durch die beiden anderen Projektpartner in diesem Arbeitspaket unterstützt wird. Ziel des Arbeitspaketes ist einerseits den Stand der Technik bezüglich Abtragstechnologien für Stahlbetonstrukturen zu aktualisieren. Für den Entwurf des mobilen Anbaugeräts mit den anzustrebenden Eigenschaften arbeitet insbesondere die Herrenknecht AG zu. Diese Informationen werden in einem Lastenheft zusammengefasst.

Im Berichtszeitraum hat Kraftanlagen Heidelberg hauptsächlich bei der Erstellung des Lastenheftes in AP 1 dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zugearbeitet. Dafür wurden Informationen und Vorgaben zusammengestellt, um ein Anforderungsprofil für das zu entwickelnde, mobile Abtragsystem zu erstellen. Hierzu wurde auf Kundenwünsche, -anforderungen sowie Gegebenheiten und Rahmenbedingungen in kerntechnischen Anlagen hinsichtlich Baustrukturen sowie der Handhabung des Werkzeuges zurückgegriffen, welche im Rahmen von „DefAhS“ aufwändig erfasst wurden.

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

Die Abstimmungen zum AP 1 fanden und finden weiterhin ausschließlich im digitalen Rahmen in Videokonferenzen statt. Bis Ende Februar soll das AP 1 abgeschlossen sein, hier schließt auch der Meilenstein 1 an. Somit sind die Zielparameter definiert und unter allen Partnern abgestimmt.

Im Rahmen des AP 2 „Schnittprozessanalyse und -verbesserung“ soll der „DefAhS“-Demonstrator am KIT in Betrieb genommen werden. Im Zuge vielseitiger Versuchsreihen sollen die Ergebnisse des Vorgängerprojekts weiter untersucht und optimiert werden, um eine breite Datengrundlage für die Auslegung der „MAARISS“-Komponenten zu schaffen.

Im kommenden Halbjahr startet im Mai zudem das AP 3 „Absaugungskonzept für den Materialabtransport“. Hierfür werden bereits seitens des Karlsruher Instituts für Technologie Planungen unternommen, um das Strömungsmodell und ein Absaugungskonzept zu erstellen.

Kraftanlagen Heidelberg wird dabei die Arbeiten der Projektpartner unterstützen und diese hinsichtlich der kerntechnischen Randbedingungen, Vorgaben etc. beraten.

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

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

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

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9406A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH (Framatome)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM), Teilprojekt: Entwicklung und Bau der Messanlage	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.09.2018 bis 31.08.2021	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 657.634,30 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Laurent Coquard	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> laurent.coquard@framatome.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FINT) haben sich zum Ziel gesetzt, die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle zu entwickeln und für Ablieferungspflichtige anwendbar zu machen. Die Zielstellung des Projektes ist dem Forschungsfeld „Zerstörungsfreie Deklaration bzw. Analyse von (Alt-)Abfällen“ zuzuordnen. Innerhalb des Projektes wird die Messanlage QUANTOM® für die zerstörungsfreie Überprüfung der stofflichen Beschreibung aufgebaut und erprobt. QUANTOM® wird im Strahlenschutzbauwerk von AiNT aufgebaut und getestet. Später wird die Messanlage in einen Stahlblechcontainer integriert. Dies ermöglicht den Einsatz der Messanlage direkt dort, wo die Altabfälle gelagert oder konditioniert werden. Durch die raum aufgelöste stoffliche Analyse von 200-l-Fässern können im Endlagerungsverfahren KONRAD getätigte stoffliche Beschreibungen von Abfallprodukten verifiziert und einfach ergänzt werden, wodurch die Nachqualifizierung von Altabfällen erleichtert wird und die Kosten für die nukleare Entsorgung reduziert werden. Anhand der Möglichkeit Abfallfässer mittels QUANTOM® zerstörungsfrei und ohne Neuverpackung zu analysieren wird die Strahlenexposition des Betriebspersonals im Vergleich zu einer zerstörenden Prüfung stark vermindert und eine Vergrößerung des Abfallvolumens vermieden. Der Tätigkeitsschwerpunkt von Framatome liegt in der konstruktiven Entwicklung und dem Bau und Betrieb der Messanlage. Die Zielstellung von AiNT liegt auf der Erforschung und Entwicklung von neuen Methoden und Softwarelösungen für die PGNAA von großvolumigen Proben. Der Projektfokus von FINT liegt in der Messung des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums innerhalb und außerhalb der Messanlage.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, an denen Framatome beteiligt ist, sind: AP1 (Anlageauslegung, Konstruktion und Detailengineering), AP5 (Softwareentwicklung für Betrieb und Messdatenauswertung), AP7 (Methode zur Identifizierung chemischer Verbindungen), AP9 (Aufbau & Inbetriebnahme der stationären Messanlage), AP10 (Experimentelle Validierung mit verschiedenen Matrices), AP11 (Aufbau & Inbetriebnahme der mobilen Messanlage), AP13 (Experimentelle Validierung mit radioaktiven Abfällen).

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

Seit dem 30.06.2020 wurde seitens Framatome hauptsächlich an den Arbeitspaketen AP5 und AP9 gearbeitet. Der Kran wurde sowohl mechanisch als auch elektrisch vollständig aufgebaut. Die programmierten automatischen Abläufe (Fass greifen, Fass hineinschwenken, Fass absetzen, Abschirmung holen, Fass messen etc.) wurden mit leeren und vollen Fässern getestet. Die Inbetriebsetzung des Kranes wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Fässer ohne Winkelringdeckel (z.B. mit flachem Deckel) können nicht direkt vom Fassgreifer gegriffen werden. Für solche Fälle, wurde ein spezieller Winkelringadapter entwickelt, gefertigt und erfolgreich getestet. Jegliche 200-l-Fasstypen können nun gegriffen werden.

Der Neutronengenerator konnte erfolgreich in die Messanlage eingebaut werden. Anschließend wurde der Generatoreinschub mit Graphit, PE-Platten befüllt und die Abschirmung montiert. Die Verkabelung des Neutronengenerators und der Aggregate wurde optimiert (besserer Zugang u. platzsparend). Der Seitenkanalverdichter für die Abkühlung des Neutronengenerators/Kammer wurde installiert und in Betrieb genommen. Die Hardwareintegration in die Anlagensteuerung (SPS) wurde erfolgreich abgeschlossen, wobei die sicherheitsrelevanten Schutzschaltungen implementiert wurden. Der Neutronengenerator kann nur betrieben werden, wenn die Anlage geschlossen ist.

Im September 2020 wurden die einstellbaren Tische für die zwei HPGe Detektoren entwickelt, bestellt und errichtet. Die Tische wurden erfolgreich montiert, sowie die Einstellungen durchgeführt. Anschließend wurde die gesamte Elektronik der HPGe Detektoren aufgebaut und ebenso in Betrieb genommen. Es wurden Validierungsmessungen mittels Punktquellen ausgeführt, um die Effizienz der Detektoren im eingebauten Zustand zu prüfen (AINT). Das untere Bild zeigt den Stand der Anlage Ende Oktober 2020:



Die gesamte Anlage wurde Ende Oktober mit einem nicht radioaktiven Fass erprobt. Erstmals konnte ein Fass mit Neutronen bestrahlt und das entsprechende induzierte Gamma Spektrum aufgenommen werden. Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Softwaremodulen wurde erfolgreich getestet. Am 26.10.2020 fand die Abnahme durch den Sachverständigen statt. Die Messanlage wurde mängelfrei abgenommen.

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

In Q1 2021 werden die Arbeitspakete AP10 und AP13 fortgeführt. Es ist geplant die Validierungsphase mit Referenzfässern bis Ende Januar 2021 weiter durchzuführen. Die entsprechende Auswertung wird seitens AINT durchgeführt. Die Validierungsphase mit radioaktiven Abfallfässer wird anschließend gestartet (geplant ist Ende Januar 2021/Anfang Februar 2021). Es werden zunächst 4 radioaktive Abfallfässer angeliefert, gemessen und ausgewertet.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es gibt keinen Bezug bzw. keinen Austausch zu anderen öffentlich geförderten Projekten.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

##### Online Veröffentlichung:

<https://www.framatome.com/solutions-portfolio/portfolio/product?product=A1688>

Dr. L. Coquard, Dr. A. Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, ICOND, Digital, 24-26.11.2020.

Dr. L. Coquard, Dr. A. Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, WMS 2020 Conference, Phoenix, Arizona, USA, March 8-12, 2020.

##### Internationale Pressemitteilung von Framatome:

<http://www.framatome.com/EN/businessnews-1456/framatome-entwickelt-mobile-technologie-zur-zerstrungsfreien-analyse-von-radioaktiven-abfillen.html>, 18.12.2018.

Dr. L. Coquard, Dr. A. Havenith, et al.: „**Stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM®**“, KONTEC 2019, Dresden, 27. - 29. März 2019.

Dr. A. Havenith, Dr. L. Coquard et al.: **Projektsteckbrief zum BMBF-Förderprojekt**, <http://www.framatome.com/businessnews/liblocal/docs/Presse/QUANTOM-GER-201811.pdf>, 22.11.2018.

Dr. A. Havenith, Dr. L. Coquard et al.: “**QUANTOM - Non-destructive scanning of waste packages for material description and plausibility check**”, AMNT 2019, Berlin, 07. - 08. Mai 2019.

Dr. A. Havenith et al.: **QUANTOM®-Non-destructive scanning of radioactive waste packages for material characterization**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17. - 21. Juni 2019.

Dr. O. Schumann et al.: **QUANTOM® - Optimization of the online neutron flux measurement system**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17. - 21. Juni 2019.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9406B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM), Teilprojekt: Methoden- und Softwareentwicklung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.09.2018 bis 31.08.2021	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 621.605 Euro
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Andreas Havenith	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> havenith@nuclear-training.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FINT) haben sich zum Ziel gesetzt, die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle zu entwickeln und für Ablieferungspflichtige anwendbar zu machen. Die Zielstellung des Projektes ist dem Forschungsfeld „Zerstörungsfreie Deklaration bzw. Analyse von (Alt-)Abfällen“ zuzuordnen. Innerhalb des Projektes wird die Messanlage QUANTOM® für die zerstörungsfreie Überprüfung der stofflichen Beschreibung aufgebaut und erprobt. QUANTOM® wird im Strahlenschutzbauwerk von AiNT errichtet und getestet. Später kann die Messanlage in einen Stahlblechcontainer integriert werden oder wird in einer Konditionierungsstätte aufgebaut. Dies ermöglicht den Einsatz der Messanlage direkt dort, wo die Altabfälle gelagert oder konditioniert werden. Durch die raum aufgelöste stoffliche Analyse von 200-l-Fässern können im Endlagerungsverfahren KONRAD getätigte stoffliche Beschreibungen von Abfallprodukten verifiziert und einfach erstellt werden, wodurch die Nachqualifizierung von Altabfällen erleichtert wird und die Kosten für die nukleare Entsorgung reduziert werden. Anhand der Möglichkeit, Abfallfässer mittels QUANTOM® zerstörungsfrei und ohne Neuverpackung zu analysieren, wird die Strahlenexposition des Betriebspersonals im Vergleich zu einer zerstörenden Prüfung stark vermindert und eine Vergrößerung des Abfallvolumens vermieden. Der Tätigkeitsschwerpunkt von Framatome liegt in der konstruktiven Entwicklung und dem Bau und Betrieb der Messanlage. Die Zielstellung von AiNT liegt auf der Erforschung und Entwicklung von neuen Methoden und Softwarelösungen für die PGNAA von großvolumigen Proben. Der Projektfokus von FINT liegt in der Messung des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums innerhalb und außerhalb der Messanlage.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, an denen AiNT beteiligt ist, sind:

- AP1 Anlagenauslegung, Konstruktion und Detailengineering
- AP2 Strahlenschutzkonzept inkl. Abschirm- und Aktivierungsberechnungen
- AP3 Nuklearphysikalische Simulation inkl. Validierung
- AP4 Genehmigungsverfahren für den Betrieb der Messanlage
- AP5 Softwareentwicklung für Betrieb und Messdatenauswertung
- AP6 Mathematische Methodenentwicklung
- AP7 Methode zur Identifizierung chemischer Verbindungen

- AP8 Neutronenspektrometrie und Neutronenflussmessung
- AP9 Aufbau & Inbetriebnahme der stationären Messanlage
- AP10 Experimentelle Validierung mit verschiedenen Matrices
- AP11 Aufbau & Inbetriebnahme der mobilen Messanlage
- AP12 Online-Neutronenflussmessung innerhalb der Messkammer
- AP13 Experimentelle Validierung mit radioaktiven Abfällen
- AP14 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Auf Grundlage der nuklearphysikalischen Simulationen der Messanlage mit MCNP wurde das Detailengineering für die stationäre Messanlage QUANTOM® (AP1) abgeschlossen. Im Berichtszeitraum wurde in den Arbeitspaketen AP2 bis AP14 gearbeitet. Innerhalb des Berichtszeitraums wurde der Aufbau der stationäre Messanlage QUANTOM® (AP9) inkl. der Integration des Krans abgeschlossen und die Inbetriebsetzung erfolgte. Am 26.10.2020 hat der Sachverständige im Auftrag der atomrechtlichen Aufsichts- und Genehmigungsbehörde die Messanlage und das Messverfahren bzgl. dem baulichen und operativen Strahlenschutz geprüft und erfolgreich abgenommen. Da die Genehmigung für die Inbetriebnahme der stationären Messanlage gemäß § 12 StrlSchG (AP4) bereits seit Juni 2019 vorliegt, konnte nach der erfolgreichen Sachverständigenprüfung sofort der Testbetrieb beginnen. Arbeitspaket AP4 ist somit bis auf die regelmäßige Korrespondenz mit der Behörde und die Überwachung der Genehmigungsaufgaben abgeschlossen. Der Testbetrieb begann mit der Messung der leeren Messkammer, während der Neutronengenerator aktiv war (aktiver Untergrund). Es folgten Messungen mit leeren 200-l-Stahlfässern verschiedener Bautypen. Hierdurch wurde die Eignung für verschiedene Bauarten von 200-l-Fässern belegt. Nachfolgend begann die experimentelle Validierung mit nichtradioaktiven Referenzmaterialien. Zum Vergleich wurden diese nichtradioaktiven Referenzmaterialien ebenfalls am Department of Nuclear Analysis and Radiography, Centre for Energy Research am Forschungsreaktor in Budapest sowie mit der AiNT-Messanlage [ZEBRA](#) mittels P&DGNAA analysiert. Die Ergebnisse der an den Referenzmaterialien vorgenommenen Multielementanalysen werden in der experimentellen Validierung (AP10) mit den QUANTOM®-Messungen verglichen.

Die Auswertung der erhobenen Messdaten erfolgt durch die in AP6 entwickelten mathematischen Methoden, welche in die Software zur Messdatenauswertung (AP5) implementiert werden. Innerhalb der Software- und Methodenentwicklung ist insbesondere an der Modellierung von Gamma- und Neutronentransportrechnungen und deren iterativer Kopplung gearbeitet worden. Im Berichtszeitraum wurde der deterministische Neutronentransportcode (AiNT-Bezeichnung SPARC) und der Code für die Berechnung von Photopeak-Effizienzen (AiNT-Bezeichnung TRACER) weiterentwickelt. Mittels SPARC werden für das partitionierte Fassmodell im 200-l-Fass der totale Neutronenfluss und die Neutronenspektren berechnet. Die im Projekt entwickelte Neutronentransportmodellierung (SPARC) basiert auf einer  $SP_N$ -Diffusionsapproximation und einem Finite-Elemente-Programm zur Lösung der partiellen Differentialgleichungen. Der Solver für das Differentialgleichungssystem wurde implementiert und anhand verschiedener Testfälle verifiziert. Hierbei stieg im Berichtszeitraum die Komplexität der Testfälle kontinuierlich an. Die entwickelte Gammatransportmodellierung (TRACER) berechnet die energieabhängige Photopeak-Effizienz der HPGe-Detektoren der aus dem 200-l-Fass emittierten prompten und verzögerten Gamma-Strahlung.

Zusammenfassend lag der Schwerpunkt innerhalb der Software- und Methodenentwicklung (AP5 & AP6) im Berichtszeitraum beim Softwaremodul zur Berechnung von Photopeak-Effizienzen, insbesondere für Gamma-Energien über 7 MeV, bei Verfahren zur Beschleunigung und Erhöhung

der Richtigkeit der deterministischen Neutronentransportmodellierung sowie der Automatisierung der Peak-Auswertung und der Betriebs- und Steuerungssoftware. Hierzu erfolgten umfangreiche Tests der Betriebs- und Steuerungssoftware im Messbetrieb. Es wurde ein Konzept für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse erstellt (AP14).

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

In Q1 2021 werden die Arbeitspakete AP2 bis AP14 bearbeitet. Parallel zum Testbetrieb mit den nichtradioaktiven Referenzmaterialien erfolgt die absolute Kalibrierung der He-3-Detektoren und der U-238-Spaltkammer. Der Meilenstein „Testbetrieb des Neutronengenerators und Kalibrierung der Detektoren“ wird in Q1 2021 abgeschlossen werden. Die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Software- und Methodenentwicklung für den Neutronentransportcode (SPARC) und den Code für die Berechnung von Photopeak-Effizienzen (TRACER) werden fortgesetzt. Innerhalb von AP5 und AP6 wird ein Schwerpunkt auf die iterative Kopplung der einzelnen Softwaremodule gelegt. Im laufenden Testbetrieb wird die Steuerungssoftware weiter getestet und bedarfsgerecht weiterentwickelt. Auf Grundlage der ersten Messdaten der Referenzmaterialien wird weiter an der Software zur Automatisierung der Peak-Auswertung gearbeitet.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es gibt keinen Bezug bzw. keinen Austausch zu anderen öffentlich geförderten Projekten.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Neue Webseite inkl. Video: <https://www.framatome.com/solutions-portfolio/portfolio/product?product=A1688>

Dr. L. Coquard, Dr. A. Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, ICOND, Digital, 24-26.11.2020.

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, WM2020 Conference, March 8 – 12, 2020, Phoenix, Arizona, USA

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **QUANTOM® - Non-destructive characterization of radioactive waste packages for material characterization**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17<sup>th</sup> – 21<sup>st</sup> June 2019

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **QUANTOM® - Non-destructive scanning of waste packages for material description and plausibility check**, AMNT 2019, Berlin, 07. - 08. Mai 2019

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **Stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM®**, KONTEC 2019, Dresden, 27. - 29. März 2019.

Dr. Olaf Schumann et al.: **QUANTOM® - Optimization of the online neutron flux measurement system**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17. - 21. Juni 2019.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9406C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-INT für die Fraunhofer-Gesellschaft	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Quantitative Analyse toxischer und nicht-toxischer Materialien (QUANTOM) - Teilprojekt: Online-Messungen des Neutronenflusses	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2021	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 147.403,24 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Theo Köble	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> theo.koebler@int.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Kooperationspartner Framatome GmbH (Framatome), die Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT) und das Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen (FINT) haben sich zum Ziel gesetzt, die Prompt-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA) zur Charakterisierung radioaktiver Abfälle zu entwickeln und für Ablieferungspflichtige anwendbar zu machen. Die Zielstellung des Projektes ist dem Forschungsfeld „Zerstörungsfreie Deklaration bzw. Analyse von (Alt-)Abfällen“ zuzuordnen. Innerhalb des Projektes wird die Messanlage QUANTOM® für die zerstörungsfreie Überprüfung der stofflichen Beschreibung aufgebaut und erprobt. QUANTOM® wird im Strahlenschutzbauwerk von AiNT aufgebaut und getestet. Später wird die Messanlage in einen Stahlblechcontainer integriert werden oder wird in einer Konditionierungsstätte aufgebaut. Dies ermöglicht den Einsatz der Messanlage direkt dort, wo die Altabfälle gelagert oder konditioniert werden. Durch die raum aufgelöste stoffliche Analyse von 200-l-Fässern können im Endlagerungsverfahren KONRAD getätigte stoffliche Beschreibungen von Abfallprodukten verifiziert und einfach ergänzt werden, wodurch die Nachqualifizierung von Altabfällen erleichtert wird und die Kosten für die nukleare Entsorgung reduziert werden. Anhand der Möglichkeit Abfallfässer mittels QUANTOM® zerstörungsfrei und ohne Neuverpackung zu analysieren wird die Strahlenexposition des Betriebspersonals im Vergleich zu einer zerstörenden Prüfung stark vermindert und eine Vergrößerung des Abfallvolumens vermieden. Der Tätigkeitsschwerpunkt von Framatome liegt in der konstruktiven Entwicklung und dem Bau und Betrieb der Messanlage. Die Zielstellung von AiNT liegt auf der Erforschung und Entwicklung von neuen Methoden und Softwarelösungen für die PGNAA von großvolumigen Proben. Der Projektfokus von FINT liegt in der Messung des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums innerhalb und außerhalb der Messanlage.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Arbeitspakete des Gesamtvorhabens, an denen FINT beteiligt ist, sind:

- AP1 Anlagenauslegung, Konstruktion und Detailengineering
- AP8 Neutronenspektrometrie und Neutronenflussmessung
- AP12 Online-Neutronenflussmessung innerhalb der Messkammer
- AP13 Experimentelle Validierung mit radioaktiven Abfällen

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

Im Berichtszeitraum wurde seitens FINT in den Arbeitspaketen AP8, AP12 und AP13 gearbeitet. Die Messanlage QUANTOM® wurde im Technikum von AiNT komplett aufgebaut und in Betrieb genommen. Auch die Neutronendetektoren wurden in der Gesamtanlage in Betrieb genommen (AP12). Die Messungen von Referenzfässern wurden begonnen. Die Messungen des Neutronenflusses und des Neutronenspektrums außerhalb der Anlage QUANTOM® (AP8) wurden im Fraunhofer-INT weiter vorbereitet. An der Vorbereitung der experimentellen Validierung mit radioaktiven Abfällen wurde beratend mitgearbeitet (AP13).

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

Im ersten Halbjahr 2021 werden die Arbeitspakete AP8 und AP13 weiterbearbeitet. Die Neutronenflussmessung außerhalb der stationären Anlage mit dem Neutronenspektrometer ROSPEC wird durchgeführt, sobald die Inbetriebnahme der Anlage im Technikum von AiNT vollständig abgeschlossen ist. Die Messung des Neutronenspektrums außerhalb der Messkammer soll dann parallel zur Vermessung der Referenzfässer durchgeführt werden (AP8). Der Testbetrieb der stationären Messanlage QUANTOM® wird unterdessen fortgesetzt und bei der Kalibrierung mit Referenzfässern mitgewirkt. Demnächst werden auch Referenzfässer mit radioaktivem Inhalt vermessen werden (AP13).

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es gibt keinen Bezug bzw. einen Austausch zu anderen öffentlich geförderten Projekten.

### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, WM2020 Conference, March 8 – 12, 2020, Phoenix, Arizona, USA

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **QUANTOM® - Non-destructive characterization of radioactive waste packages for material characterization**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17th – 21st June 2019

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **QUANTOM® - Non-destructive scanning of waste packages for material description and plausibility check**, AMNT 2019, Berlin, 07. - 08. Mai 2019

Dr. Andreas Havenith, Dr. Laurent Coquard et al.: **Stoffliche Beschreibung und Plausibilitätsprüfung radioaktiver Abfälle mittels QUANTOM®**, KONTEC 2019, Dresden, 27. - 29. März 2019.

Dr. Olaf Schumann et al.: **QUANTOM® - Optimization of the online neutron flux measurement system**, ANIMMA 2019, Portorož (Slovenien), 17. - 21. Juni 2019.

Dr. L. Coquard, Dr. A. Havenith, et al.: **Non-destructive Material Characterization of Radioactive Waste Packages with QUANTOM®**, ICOND, Digital, 24. - 26.11.2020

Produktfilm QUANTOM®, Framatome, 2020: <https://www.framatome.com/solutions-portfolio/portfolio/product?product=A1688>

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9407A
<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> Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit. Teilprojekt A: Entwicklung, Erprobung und Bewertung neuer Konditionierungsverfahren mit Nuklidseparation zur Volumenreduktion	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2021	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.219.438,39 €
<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

Eine bestimmende Größe für die Bemessung der Endlagerkapazität für radioaktive Abfallstoffe ist die unterzubringende Menge an C-14-haltigem Reaktorgraphit, wobei die Bindungsform des Isotops C-14 im Graphit von großer Bedeutung ist. Die Zielstellung des Vorhabens besteht deshalb darin, eine neue Prozesskette moderner Dekontaminationsverfahren für die endlagergerechte Behandlung von radioaktivem Reaktorgraphit zu entwickeln und im Labor- bzw. Technikumsmaßstab zu erproben. Diese Technologie, bestehend aus den Teilschritten Charakterisierung, Oberflächendekontamination, Klassierung, Umsetzung des Graphits zu Synthesegas, Radionuklidabtrennung und Umsetzung zu endlagergerechtem Feststoffen, soll es künftig ermöglichen, den Reaktorgraphit durch weitgehende Separation der darin enthaltenen Radionuklide so zu konditionieren, dass die geplante Endlagerkapazität dafür hinreichend ist.

### 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

- AP1: Projektkoordination
- AP2: Bereitstellung und Charakterisierung von Reaktorgraphit
- AP3: Ermittlung und Analyse der leichter freisetzbaren Nuklidfraktion und Auswahl von Verfahren zu deren Konditionierung
- AP4: Vergasung des vorbehandelten Graphits
- AP5: Dekontamination des erzeugten Synthesegases durch Isotopentrennung
- AP6: Umsetzung des mit C-14 angereicherten Gasstroms zu C-14-CaCO<sub>3</sub>
- AP7: Bilanzierungen, zusammenfassende Bewertung, Verwertungskonzept

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

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten und die wichtigsten hierbei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt:

- AP1: Die Aktivitäten zu AP 1 erfolgten gemäß Bearbeitungsfortschritt. Das vierte Verbundtreffen musste aufgrund neuerlicher länger andauernder Zutritts- und Kontaktbeschränkungen auf 2021 verschoben werden.
- AP2: Die Arbeiten zu AP 2 werden überwiegend durch VKTA Rossendorf als Nachauftragnehmer ausgeführt. Für weitere Untersuchungen bei IKTS wurde ein Graphitblock aus dem Segment 3 der thermischen Säule mit einer spezifischen C-14-Aktivität von rund 120 Bq/g (Leitnuklid) ausgewählt. Weitere Kontaminanten sind Tritium, Co-60 und Eu-152 (1-2 Bq/g). Aus diesem Block wurden insgesamt 20 Proben für Versuche herausgearbeitet, an denen bis Jahresende detaillierte radiologische und chemische Untersuchungen durchgeführt wurden, um den radiologischen und chemischen Ausgangszustand vor den Dekontaminationsuntersuchungen detailliert zu beschreiben. Die chemischen Untersuchungen zeigten, dass es sich um einen chemisch sehr reinen Graphit handelt, der vor allem aktivierbare chemische Elemente nur in Spuren enthält. Die Gehalte liegen häufig unter der Nachweisgrenze der ICP-MS im ppt-Bereich. Gehalte >1 mg/kg wurden für Al, Ca, Ti, Fe, Ni und Cu festgestellt, die jedoch meist nur schwer aktivierbar sind bzw. abgesehen von Ca und Ni nur kurzlebige Isotope bilden.
- AP3: Die Untersuchungen mit den Schwerpunkten thermische Desorption und elektrochemische Dekontamination wurden unter Verwendung von freigemessenem Reaktorgraphit abgeschlossen. Für die weiteren Untersuchungen an radioaktivem Reaktorgraphit und für diejenigen zur Auswahl von Konditionierungsverfahren für die freigesetzten Radionuklide wird nur noch die elektrochemische Dekontamination betrachtet. Mit der Übergabe der detaillierten Analytik durch VKTA konnten die Versuchsvorbereitungen abgeschlossen werden. Der Aufbau entsprechender Apparaturen und deren Erprobung wurde begonnen.
- AP4: Das Arbeitspaket wird durch den Verbundpartner TU-Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, bearbeitet.
- AP5: Die Fertigung der Versuchsanlage zur Trennung der Kohlenstoffisotope mittels Membrandiffusion konnte abgeschlossen werden. Lieferverzögerungen und die aktuelle Pandemiesituation verhinderten eine frühere Fertigstellung. Mit der Anlage wurden erste Trennversuche durchgeführt. Die Trenneffekte liegen derzeit noch nicht im angestrebten Bereich. Die Arbeiten zur Entwicklung spezifischer Membranen wurden weitergeführt.

Zur Vorbereitung der Untersuchungen zur Trennung der C-Isotope mittels Thermodiffusion wurde auf Basis der im vorherigen Berichtszeitraum durchgeführten Auslegungs- und Modellrechnungen mit der Umrüstung der Versuchsanlage begonnen. Diese Arbeiten waren zum Ende des Berichtszeitraums noch nicht abgeschlossen.

Die Untersuchungen zur An-/Abreicherung von C-Isotopen mittels elektrochemischer Techniken wurden begonnen. Bzgl. der sog. Gegenstromelektrolyse wurde die Abhängigkeit des Trenneffektes von Stromdichte, Trennröhlänge und von der chemischen Bindungsform des Kohlenstoffs untersucht. Bisher konnten Verschiebungen der Isotopenzusammensetzung von bis zu 1% in einer Separationsstufe verzeichnet werden.

Parallel dazu wurden die Untersuchungen mit Ausnutzung des kinetischen Isotopeneffekts bei elektrochemischen Elektrodenreaktionen begonnen. Erste Ergebnisse belegen eine

Verschiebung des Isotopenverhältnisses bei Kohlenstoff um 4 - 5% in nur einer Prozessstufe.

AP6: Eine Bearbeitung war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen.

AP7: Die Arbeiten wurden im Berichtszeitraum weitergeführt und der Vorbehandlungs- und Vergasungsprozess auf Basis von Analysendaten für Rossendorfer Graphit aus dem RFR sowie auf der Grundlage von Literaturdaten radiologisch bewertet. Kritisch können dabei mechanische Vorbehandlungsstufen bzw. Transport- und Reinigungsprozesse sein, während von den eigentlichen Hauptprozessstufen voraussichtlich nur eine geringe Strahlenexposition ausgehen würde, selbst wenn Graphit mit deutlich höherer Aktivität auf diese Weise behandelt werden würde.

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

AP1: Das nächste Verbundmeeting ist für Februar 2021 geplant, vorbehaltlich weiterer Corona-bedingter Restriktionen. Eine Entscheidung zur Art der Durchführung wird kurzfristig getroffen. Weitere Abstimmungen mit den Partnern sind auch weiterhin quartalsweise geplant.

AP2: Das AP wird planmäßig weiterbearbeitet, soweit erforderlich.

AP3: Mit Reaktorgraphit aus dem Segment 3 des RFR werden die Versuche zur elektrochemischen Dekontamination durchgeführt, ebenso Untersuchungen zur elektrochemischen Vergasung

AP4: Geplant sind Abstimmungen mit dem Verbundpartner zu den konkreten Bearbeitungsschritten.

AP5: Die Untersuchungen zur Isotopentrennung werden fortgesetzt.

AP6: Die Bearbeitung ist erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.

AP7: Die Bewertungen bzgl. der einzusetzenden Verfahren und der anzuwendenden Prozessschritte wird fortgesetzt.

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

Bei der Planung des Projektes wurden die Ergebnisse der Projekte CAST, CarboWASTE und CarboDISP berücksichtigt. Auf die dort beschriebenen methodischen Ansätze soll –soweit im konkreten Fall möglich- zurückgegriffen werden.

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

Ein Beitrag war für den RCA-workshop von VKTA und Helmholtz-Zentrum in Rossendorf angemeldet. Die Tagung wurde jedoch situationsbedingt abgesagt und auf 2021 verschoben. Für die KONTEC 2021 wurde ein Vortrag als Plenarvortrag angenommen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020		<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9407B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Bergakademie Freiberg		
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt GraKon – Entwicklung neuer Verfahrensansätze zur endlagergerechten Konditionierung von Reaktorgraphit, Teilprojekt B		
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2018 bis 31.08.2021	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 516.043,96 €	
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Bernd Meyer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Bernd.Meyer@iec.tu-freiberg.de	

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Eine maßgebliche Größe für die Bemessung der zu errichtenden deutschen Endlagerkapazitäten für radioaktive Abfälle ist die Einlagerung von C-14-haltigem Reaktorgraphit/Kohlestein. Es bestehen derzeit erhebliche Unsicherheiten, ob die geplante Endlagerkapazität die Aufnahme der vorhandenen Mengen an Reaktorgraphit zulässt. Gegenwärtig sind keine Konditionierungsverfahren bekannt, die eine substantielle Verringerung der einzulagernden Menge C-14-haltigen Graphits ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund besteht die Zielstellung des Vorhabens darin, eine neue Prozesskette modernster Dekontaminationsverfahren für die endlagergerechte Behandlung von radioaktivem Reaktorgraphit zu entwickeln und im Labor- bzw. Technikumsmaßstab zu erproben.

Das Teilprojekt B verfolgt in diesem Rahmen das Ziel, Möglichkeiten zur Überführung von Reaktorgraphit in gasförmige Komponenten zu erproben als Voraussetzung, um eine gezielte Abtrennung des kontaminierten Kohlenstoffes in der Gasphase und damit eine Minimierung und Spezifizierung des einzulagernden Materials realisieren zu können.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Der Arbeitsplan baut sich entlang der avisierten Gesamtprozesskette auf und umfasst die Graphitcharakterisierung, die Oberflächendekontamination, die Umsetzung des Graphits zu Synthesegas, die Radionuklidabtrennung und die Umsetzung zu endlagergerechten Feststoffen. Die entwickelte Gesamtprozesskette wird bilanziert und Konzepte für die technische Realisierung abgeleitet. Die Prozessschritte sollen auf der Basis von Reaktorgraphit aus einem Forschungsreaktor getestet werden. Im Teilprojekt B steht die Betrachtung des thermochemischen Vergasungsverhaltens von Reaktorgraphit im Mittelpunkt und umfasst:

- Labortechnische Untersuchungen des Konversionsverhaltens von Reaktorgraphit,
- die Identifikation geeigneter Vergasungsprozesse,
- die Entwicklung einer Prozesskette für die optimale Gaserzeugung sowie
- die Mitwirkung bei der Gesamtprozesskettenbilanzierung und –konzeption.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Die Arbeiten im Berichtszeitraum beziehen sich auf AP 320 (Untersuchung des Konversionsverhaltens) und AP 330 (Identifikation geeigneter Konversionsprozesse) sowie auf den Beginn des AP 340 (Entwicklung der Prozesskette für die Vergasung).

#### AP 320 Untersuchung des Konversionsverhaltens

- Die thermogravimetrischen Untersuchungen zur Umsetzung des Reaktorgraphits mit Wasserdampf wurden weitergeführt. Untersucht wurde der Einfluss des Systemdruckes und der Temperatur bei 1, 5, 20, 40 bar im Temperaturbereich von 900 bis 1100 °C in Temperaturschritten von 50 °C in einem Gasstrom von 100 Vol.-% Wasserdampf. Erwartungsgemäß erhöht sich die Umsatzgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur für alle gewählten Drücke. Mit der Druckerhöhung werden die Vergasungsreaktionen ebenfalls beschleunigt. Diese Tendenz gilt bei allen gewählten Temperaturen bis zu einem Druck von 20 bar. Zwischen 20 und 40 bar ist der Druckeinfluss gering.
- Die Ermittlung der kinetischen Parameter entsprechend Arrhenius-Ansatz erfolgte unter Berücksichtigung des gesamten o. g. Parameterbereichs. Die Aktivierungsenergie beträgt bei einem Umsatz von 50 Ma.-% ca. 215 kJ/mol und unterscheidet sich bei allen gewählten Drücken um weniger als 3 %. Die Erwartete Unabhängigkeit der Aktivierungsenergie vom Systemdruck konnte damit bestätigt werden.
- Bei der autothermen Vergasung wird technisch i. d. R. von Wasserdampf/Sauerstoff-Gemischen als Vergasungsmittel ausgegangen. Deshalb wurden Untersuchungen zum Einfluss des Partialdruckes von Wasserdampf mit 50 und 80 Vol.-% (Rest Sauerstoff) durchgeführt. Die OnSet-Temperatur beträgt in beiden Fällen ca. 705 °C und liegt damit im gleichen Bereich wie für Luft mit 700 °C. Für reinen Wasserdampf wurden dagegen 1000 °C ermittelt.
- Die Untersuchungen zur Kinetik mit Wasserdampf/Sauerstoff-Gemischen wurden isotherm im Temperaturbereich von 700 bis 950 °C bei 1 bar durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Übergang vom poren-diffusions- zum grenzfilmdiffusionskontrollierten Bereich bei 800 °C liegt. Die ermittelten Aktivierungsenergien betragen im Bereich 700 – 800 °C 132 bzw. 140 kJ/mol und im Bereich 800 – 950 °C 10 bzw. 9 kJ/mol.
- Durch analoge kinetische Untersuchungen mit synthetischer Luft (20 Vol.-% O<sub>2</sub>) wurde für den Temperaturbereich von 700 bis 800 °C mit 123 kJ/mol eine ähnliche Aktivierungsenergie ermittelt wie für die Wasserdampf/Sauerstoff-Vergasung. Geringe Differenzen zwischen beiden Aktivierungsenergien können mit der hemmenden Wirkung durch die Belegung von aktiven Zentren des Graphitgitters durch Wasserdampf erklärt werden. Aufgrund der deutlich geringeren Reaktionsgeschwindigkeit im betrachteten Temperaturbereich ist der Wasserdampf anscheinend kaum an der primären Kohlenstoffumsetzung beteiligt.
- AP 330 und AP 340:
- Auf der Basis, der bisher experimentell ermittelten kinetischen Parameter kann abgeschätzt werden, dass als optimales Vergasungsmittel ein Wasserdampf/Sauerstoff oder Kohlendioxid/Sauerstoff-Gemisch eingesetzt werden sollte. Die Beimischung des Sauerstoffs ist erforderlich, um einen autothermen Vergasungsbetrieb zu ermöglichen.
- Als Reaktorprinzip wird eine Festbett- bzw. Wanderbettvergasung favorisiert. Strömungstechnisch bedingt kann (und muss) dafür eine gröbere Körnung eingesetzt werden. Im Vergleich mit anderen Vergasungsverfahren ergibt sich daraus bei Festbettverfahren der geringste Aufbereitungsaufwand für den Reaktorgraphit. Eine gröbere Körnung erfordert allerdings für einen vollständigen Kohlenstoffumsatz eine längere Verweilzeit, die jedoch im Festbett gut darstellbar ist.

- Auf dieser Basis wurden zwei Prozessketten mit Dampf/O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-Gemischen als Vergasungsmittel entwickelt. Zu den Hauptkomponenten der Prozessketten gehören folgende Prozessstufen: Zweistufige Zerkleinerung des Reaktorgraphits (Zielkorngroße 5 – 10 mm) und Nachzerkleinerung des Siebdurchgangs (< 5 mm) für die separate Eindüsung in den Vergaser, Vergasungsmittelbereitstellung, Gegenstromfestbettvergasung mit Asche-/Schlackeausschleusung, Gaskühlung und -reinigung. In Abhängigkeit von den Ergebnissen der Projektpartner kann vor der Isotopenabreicherung eine Synthese zu höhermolekularen Kohlenstoffverbindungen ergänzt werden. Ggf. sind Zuschlagstoffe für die Einbindung von mineralischen Vergasungsrückständen zu berücksichtigen.

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

Die geplanten Weiterarbeiten betreffen die Weiterführung des AP 320 und AP 330 sowie des AP 340. Die nächsten Schritte umfassen im Detail:

- Weiterführung der reaktionskinetischen Untersuchungen zur hydrierenden Vergasung
- Weiterentwicklung eines geeigneten Vergasungsverfahrens auf Grund der experimentell ermittelten Prozessparameter,
- Entwicklung thermodynamischer Modelle für die Vergasung auf der Basis der Software ASPEN Plus.

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

Es sind keine Änderungen gegenüber der Antragsstellung abzusehen.

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

Im Projekt sind derzeit keine Berichte und Veröffentlichungen entstanden.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9410A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie Teilprojekt: Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2019 bis 28.02.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 187.025,17 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Matthias Dewald	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> matthias.dewald@grs.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines automatisierbaren Systems zur zuverlässigen Charakterisierung und Quantifizierung des C-14-Gehalts von Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), das im industriellen Bereich eingesetzt werden kann und Schwierigkeiten z. B. im Bereich der Untergrundunterdrückung oder aufwändiger Probenaufbereitung bei bisher genutzten Verfahren wie Liquid Scintillation Counting (LSC) umgeht und gleichzeitig in der Lage ist, das Unterschreiten der künftig geltenden Freigabewerte zuverlässig zu belegen. Ferner sollen Schnittstellen eines solchen AMS-Systems für die Messung weiterer Radionuklide definiert werden, um künftig die simultane Messung von C-14, Cl-36 und H-3 aus einer einzelnen Probe zu ermöglichen.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in die Teilprojekte „Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie“ (Universität zu Köln) und „Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen (GRS gGmbH). Ziel des hier beantragten Teilvorhabens ist, auf Basis der Ergebnisse der Reaktorgraphit-Charakterisierung mittels AMS und unter Berücksichtigung der mit der neuen Strahlenschutzgesetzgebung einhergehenden Freigabekriterien Empfehlungen für eine konkrete Freigabeprozedur zu definieren. Darüber hinaus soll bewertet werden, ob eine Charakterisierung von Reaktorgraphit mittels AMS als Stand von Wissenschaft und Technik angesehen werden kann, und welche Bedeutung die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Entsorgung vorhandener Reaktorgraphit-Bestände in Deutschland hat.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Eine ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans findet sich in der Vorhabensbeschreibung. Die Arbeiten werden sind in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1 Voruntersuchungen an unbestrahlten Graphitproben
- AP 2 Voruntersuchungen an bestrahlten Reaktorgraphitproben
- AP 3 Herstellung von Referenz-Probenmaterial für die AMS-Messungen
- AP 4 Entwicklung des Gassystems mit Elemental Analyzer und Verbindung zur AMS-Anlage
- AP 5 Test des Gassystems zur Verdünnung über die Charakterisierung der bestrahlten Referenz-Graphitproben
- AP 6 Betrachtung und Bewertung von möglichen Entsorgungspfaden vor dem Hintergrund der Ergebnisse

- AP 7 Messung von Reaktorgraphitproben aus realen kerntechnischen Anlagen
- AP 8 Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Freigabepfade und die Charakterisierung radioaktiver Abfälle
- AP 9 Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse
- AP 10 Verbundkoordination und Projektmanagement

Im folgenden Balkenterminplan sind die Einzelnen Arbeitspakete in ihrer zeitlichen Abfolge und Zuordnung dargestellt. Gegenüber der vorläufigen Balkenterminplan aus der Antragsphase haben sich kleinere Änderungen ergeben, da die Arbeitspakete 6, 7 und 8 für vorbereitende Arbeiten etwas ausgeweitet wurden. Der Hauptanteil der Arbeiten dieser Arbeitspakete wird jedoch wie geplant in den Jahren 2020 und 2021 ablaufen.

	2019				2020				2021				2022			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
AP 1 <i>Voruntersuchung unbestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 2 <i>Voruntersuchung bestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 3 <i>Herstellung Referenzprobenmaterial</i>			UK													
AP 4 <i>Entwicklung des Gassystems</i>		UK														
AP 5 <i>Test Gassystem mit Referenzmaterial</i>		UK														
AP 6 <i>Betrachtung/Bewertung Entsorgungspfade</i>		GRS														
AP 7 <i>Messung realer Proben aus Anlagen</i>		GRS			UK											
AP 8 <i>Beurteilung der Ergebnisse</i>		GRS														
AP 9 <i>Aufarbeitung/Veröffentlichung</i>		UK														
AP 10 <i>Verbundkoordination</i>		GRS														

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

#### AP 6: Betrachtung und Bewertung von möglichen Entsorgungspfaden vor dem Hintergrund der Ergebnisse

Die begonnenen Arbeiten zur Betrachtung und Bewertung möglicher Entsorgungspfade im nationalen und internationalen Umfeld wurden fortgesetzt. Die Ergebnisse der Recherche zu grundlegenden Eigenschaften und der Wechselwirkung des Graphits mit typischen Strahlungsfeldern sowie die Charakterisierung und die Entsorgungsproblematik wurden dokumentiert, sodass sie als Teil des Abschlussberichtes genutzt werden können. Im Zuge des Vorhabens aufkommende Fragestellungen werden laufend bearbeitet und nachgepflegt.

Um trotz der Einschränkungen durch die COVID-19-Pandemie den internationalen Erfahrungsaustausch im Vorhaben zu ermöglichen, wurden die bisher erreichten Ergebnisse zusammengestellt und für die Versendung an interessierte Organisationen, wie z.B. das Paul Scherrer Institut, die Universität Manchester oder das Belgian Nuclear Research Centre vorbereitet.

#### AP 7: Messung von Reaktorgraphitproben aus realen kerntechnischen Anlagen

Im Berichtszeitraum wurde Kontakt mit dem belgischen Kernforschungszentrum SCK•CEN aufgenommen, um über die Bereitstellung von Graphitproben aus einem belgischen

Forschungsreaktor zu sprechen. Es wurde weiterhin Interesse bekundet, Graphit zur Verfügung zu stellen. Eine terminliche Festlegung blieb jedoch weiterhin erfolglos.

Graphitproben von den kerntechnischen Versuchs- und Prototypanlagen am Standort Karlsruhe KIT Campus Nord wurden bisher nicht gemessen. Die Priorität lag zunächst auf Messungen der definiert bestrahlten Graphitproben zum Erreichen des Meilenstein 1, die sich pandemiebedingt verzögert haben.

*AP 8: Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Freigabepfade und die Charakterisierung radioaktiver Abfälle*

Die vorbereitenden Arbeiten wurden fortgesetzt. Es konnte mit der Betrachtung von Messergebnissen definiert bestrahlter Graphitproben begonnen werden, die am Ende des Berichtszeitraumes vorlagen. Die Messungen hatten sich pandemiebedingt beim Verbundpartner Uni Köln geringfügig verzögert. Der Meilenstein 1 kann aus derzeitiger Sicht jedoch noch erreicht werden.

Die für das Jahr 2020 vorgesehene Reise nach Sydney, Australien zur AMS-15 Konferenz wurde aufgrund der COVID-19 Pandemie durch den Veranstalter abgesagt und ins Jahr 2021 verschoben. Ein entsprechender Änderungsdienst zur Verschiebung der Reisedaten in das Jahr 2021 wurde beantragt und genehmigt. Vor dem Hintergrund der aktuellen Pandemie-Entwicklung erscheint es fraglich, ob der neue Termin beibehalten werden kann. Der Veranstalter gibt bisher keine neuen Informationen dazu.

*AP 9: Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse*

Im Berichtszeitraum wurden die bisher erarbeiteten Ergebnisse des AP 6 für die spätere Verwendung im Abschlussbericht aufbereitet (s. auch AP 6).

*AP 10: Verbundkoordination und Projektmanagement*

Im Berichtszeitraum fanden Arbeiten zur Verbundkoordination statt, wie z. B. die Organisation regelmäßiger Projekttreffen. Durch die anhaltenden Einschränkungen aufgrund der COVID-19-Pandemie wurden Projekttreffen weiterhin per Videokonferenz durchgeführt.

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

Die begonnenen Arbeiten zur Betrachtung und Bewertung möglicher Entsorgungspfade im nationalen und internationalen Umfeld werden fortgesetzt (AP 6).

Trotz der erwähnten pandemiebedingten Verzögerungen wird davon ausgegangen, dass der Meilenstein Ende des ersten Quartals 2021 erreicht werden kann. Im ersten Halbjahr werden sich die Arbeiten demnach voraussichtlich auf die Betrachtung und Interpretation der kommenden AMS-Messungen konzentrieren (AP 7 und 8).

Diese Daten dienen auch als Basis für Arbeiten im AP 6 und AP 8, die entsprechend nachgezogen werden.

Die Ergebnisse der Arbeiten, die im Rahmen der AP 6 bis 8 erarbeitet werden, sollen weiterhin kontinuierlich in AP 9 für die spätere Veröffentlichung als Teil des Abschlussberichtes vorbereitet werden.

Die Arbeiten zur Verbundkoordination werden wie bisher fortgesetzt (AP 10).

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

Es besteht ein thematischer Bezug zum Forschungsvorhaben „Erforschung der Anforderungen an eine radiologische Charakterisierung zur Planung und Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen – Bestimmung von <sup>41</sup>Ca im Bioschild eines Leistungsreaktors mittels AMS“, (BMU-Vorhaben 3617R01364). Dieses Vorhaben wurde zum 30. Juni 2020 abgeschlossen. In diesem Vorhaben wurde untersucht, inwieweit sich AMS zur Charakterisierung von Reaktorbeton im Hinblick auf

schwer messbare Radionuklide, wie z.B. Ca-41 eignet. Die Ergebnisse sind im zugehörigen Abschlussbericht dokumentiert.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Im Berichtszeitraum wurde keine Ergebnisse oder Teilergebnisse veröffentlicht.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9410B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Universität zu Köln	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Charakterisierung und Quantifizierung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie TP: Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2019 bis 28.02.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 645.219,60 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Erik Strub	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> erik.strub@uni-koeln.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines automatisierbaren Systems zur zuverlässigen Charakterisierung und Quantifizierung des C-14-Gehalts von Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry, AMS), das im industriellen Bereich eingesetzt werden kann und Schwierigkeiten z.B. im Bereich der Untergrundunterdrückung oder aufwändiger Probenaufbereitung bei bisher genutzten Verfahren wie Liquid Scintillation Counting (LSC) umgeht und gleichzeitig in der Lage ist, das Unterschreiten der künftig geltenden Freigabewerte zuverlässig zu belegen. Ferner sollen Schnittstellen eines solchen AMS-Systems für die Messung weiterer Radionuklide definiert werden, um künftig die simultane Messung von C-14, Cl-36 und H-3 aus einer einzelnen Probe zu ermöglichen.

Das Verbundvorhaben gliedert sich in die Teilprojekte „Entwicklung eines Systems zur routinemäßigen Bestimmung von C-14 in Reaktorgraphit mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie“ (Universität zu Köln) und „Optimierung der Entscheidungsmessung und Freigabemengen (GRS gGmbH). Ziel des hier beantragten Teilvorhabens ist, auf Basis der Ergebnisse der Reaktorgraphit-Charakterisierung mittels AMS und unter Berücksichtigung der mit der neuen Strahlenschutzgesetzgebung einhergehenden Freigabekriterien Empfehlungen für eine konkrete Freigabeprozedur zu definieren. Darüber hinaus soll bewertet werden, ob eine Charakterisierung von Reaktorgraphit mittels AMS als Stand von Wissenschaft und Technik angesehen werden kann, und welche Bedeutung die gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf die Entsorgung vorhandener Reaktorgraphit-Bestände in Deutschland hat.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Eine ausführliche Beschreibung des Arbeitsplans findet sich in der Vorhabensbeschreibung. Die Arbeiten werden sind in folgende Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1 Voruntersuchungen an unbestrahlten Graphitproben
- AP 2 Voruntersuchungen an bestrahlten Reaktorgraphitproben
- AP 3 Herstellung von Referenz-Probenmaterial für die AMS-Messungen
- AP 4 Entwicklung des Gassystems mit Elemental Analyzer und Verbindung zur AMS-Anlage
- AP 5 Test des Gassystems zur Verdünnung über die Charakterisierung der bestrahlten Referenz-Graphitproben

- AP 6 Betrachtung und Bewertung von möglichen Entsorgungspfaden vor dem Hintergrund der Ergebnisse
- AP 7 Messung von Reaktorgraphitproben aus realen kerntechnischen Anlagen
- AP 8 Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf mögliche Freigabepfade und die Charakterisierung radioaktiver Abfälle
- AP 9 Aufarbeitung und Veröffentlichung der Ergebnisse
- AP 10 Verbundkoordination und Projektmanagement

Im folgenden Balkenterminplan sind die Einzelnen Arbeitspakete in ihrer zeitlichen Abfolge und Zuordnung dargestellt.

	2019				2020				2021				2022			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
AP 1 <i>Voruntersuchung unbestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 2 <i>Voruntersuchung bestrahltes Graphit</i>	UK															
AP 3 <i>Herstellung Referenzprobenmaterial</i>			UK													
AP 4 <i>Entwicklung des Gassystems</i>		UK														
AP 5 <i>Test Gassystem mit Referenzmaterial</i>		UK														
AP 6 <i>Betrachtung/Bewertung Entsorgungspfade</i>				GRS												
AP 7 <i>Messung realer Proben aus Anlagen</i>				UK												
AP 8 <i>Beurteilung der Ergebnisse</i>				GRS												
AP 9 <i>Aufarbeitung/Veröffentlichung</i>		UK														
AP 10 <i>Verbundkoordination</i>	GRS															

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

Die Arbeiten zu Voruntersuchungen an bestrahlten Graphitproben (AP 2) wurden im Berichtszeitraum fortgesetzt. Im Dezember 2020 wurden als Messungen mit unverdünnten und verdünnten bestrahlten Proben durchgeführt. Auf dieser Basis kann das AP 3 (Herstellung Referenzprobenmaterial in Kürze abgeschlossen werden). Die geplanten Arbeiten zum Aufbau des Gassystems wurden abgeschlossen (AP 4). Um höher aktivierte Proben besser handhaben zu können, soll gegebenenfalls das Gassystem nochmals modifiziert werden (entsprechender Antrag wird gestellt) Auch Tests des Gassystems mit Referenzprobenmaterial (AP 5) und erste Messungen mit realen Proben aus wurden durchgeführt, so dass trotz vorhergegangener Verzögerungen der Terminplan eingehalten werden kann. Eine weitere peer-review-Publikation zum Gassystem wird vorbereitet (AP9).

### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammunkten)

Die begonnenen Arbeiten werden wie geplant fortgesetzt. Insgesamt ergaben sich durch pandemiebedingt ausgefallene Messzeiten geringfügige Verzögerungen. Wenn nicht weiter Verzögerungen eintreten, kann der Meilenstein Ende des 1. Quartals 2021 trotzdem erreicht werden. Da außerdem ein unerwarteter Mitarbeiterwechsel (Auflösung des Vertrags mit A. Stolz 31.12.2020, Neubesetzung zum 15.01.2021) stattfindet, ist eine kostenneutrale Verlängerung angedacht.

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

Es besteht ein thematischer Bezug zum Forschungsvorhaben „Erforschung der Anforderungen an eine radiologische Charakterisierung zur Planung und Durchführung von Stilllegungsmaßnahmen – Bestimmung von  $^{41}\text{Ca}$  im Bioschild eines Leistungsreaktors mittels AMS“, (BMU-Vorhaben 3617R01364). In diesem Vorhaben wird derzeit untersucht, inwieweit sich AMS zur Charakterisierung von Reaktorbeton im Hinblick auf schwer messbare Radionuklide wie z.B.  $^{41}\text{Ca}$  eignet.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Eine peer-review-Publikation zum Gassystem wird vorbereitet (s.o.).

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9411
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbesserung der quantitativen Datenauswertung für die zerstörungsfreie Charakterisierung radioaktiver Behälter und Objekte (Quant)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.05.2019 bis 30.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 943.315,14 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Christoph Lierse von Gostomski	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Christoph.lierse@tum.de

### 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Rahmen des Vorhabens soll eine effektive Verknüpfung von Daten aus dem segmentierten Gamma-Scanning, Transmissionsmessungen mit Gamma-Strahlern und a-Priori-Informationen unter Verwendung bayes'scher Verfahren erarbeitet werden.

### 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die geplanten Arbeitsschritte sind:

- AP 1. Informationsgewinnung
- AP 2. Entwicklung eines Voxel-Modells
- AP 3. Modellentwicklung - Auswertung Gamma-spektrometrischer Messungen und Nuklididentifikation
- AP 4. Ableitung der Matrixzusammensetzung
- AP 5. Simulation der Messdaten
- AP 6. Iterative Optimierung
- AP 7. Korrelation von Messdaten und sonstigen Informationen
- AP 8. Realisation eines einfach zu bedienenden Auswerteprogramms
- AP 9. Verifikation durch Messungen mit Kalibrationsobjekten bekannter Matrixzusammensetzung und bekannter Aktivitätsverteilung
- AP 10. Diskussion der Ergebnisse und Abschluss des Projekts mit einem ausführlichen Bericht

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden die bisher entwickelten Algorithmen (AP 3) auf die Verwendung beliebiger Objektzusammensetzungen erweitert. Zur Validierung wurden verschiedene leicht zu interpretierende Verteilungen des Abschwächungskoeffizienten berechnet, um sich von der Korrektheit des Verfahrens zu überzeugen (AP 5).

Die im vorhergehenden Berichtszeitraum entwickelte Funktion zur Simulation der Kollimatoreigenschaften wurde durch Messungen mit verschiedenen Kalibrationsquellen überprüft. Hierbei stellte sich heraus, dass die bislang verwendete eindimensionale Parametrisierung der verwendeten Kollimatorfunktion zu keiner vollständig zufriedenstellenden Beschreibung der Realität führte. Diesem Problem wurde durch die Erweiterung auf eine zweidimensionale Parametrisierung entgegengewirkt. Ein Vergleich der Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit der überarbeiteten Kollimatorfunktion zeigen nun eine sehr gute

Übereinstimmung mit entsprechenden Messungen. Die Kollimatorfunktion wurde daraufhin in das Framework zur Simulation einer SGS-Messung eingepflegt (AP 8).

Mit der überarbeiteten Kollimatorfunktion konnten nun erstmals die Vorhersagen, d. h. die berechneten Ergebnisse einer Simulation für eine Modelbeschreibung, direkt mit den Ergebnissen von Messungen Kalibrationsfässern verglichen werden. Bei den Kalibrationsfässern handelt es sich um 200-l Abfallgebinde mit bekanntem Inhalt. Dieser hat eine gut definierte chemische Zusammensetzung, wodurch die physikalischen Eigenschaften mit Hinblick auf die Wechselwirkung mit Gamma-Strahlung in der Simulation ausreichend genau beschrieben werden können. Für die Simulation wurden zusätzlich Informationen aus Transmissionsmessungen in Form von Tomogrammen herangezogen, aus denen die geometrischen Zusammensetzungen und die zugehörigen (mittleren) Dichten ermittelt wurden (AP 4). Aus den Dichtewerten und aus Informationen von Datenbanken (z. B. für Massenschwächungskoeffizienten verschiedener Materialien) wurden die erforderlichen linearen Schwächungskoeffizienten bestimmt (AP 7). Die bislang durchgeführten Vergleiche zeigten innerhalb der Messstatistik eine gute Übereinstimmung. Weitere Validierungen mit verschiedenen Kalibrationsfässern sowie mit längeren Messzeiten, d. h. höherer Zählstatistik, sind geplant. Insbesondere soll das der Simulation zugrundeliegende physikalische Modell auf den Einfluss der kohärenten Streuung auf die Simulationsergebnisse untersucht werden.

Für die weiteren Arbeiten wurde eine zunehmende Anzahl an Messungen benötigt. Aus diesem Grund wurde ein Framework zur automatischen Auswertung und Dokumentation der Messungen erstellt. Insbesondere wurde Wert auf die systematische Auswertung der Spektren gelegt, die im weiteren Verlauf der Analyse die Grundlage für eine optimierte statistische Modellierung darstellt (siehe Weiterarbeit).

Das Simulationsprogramm basiert auf einem Voxel-basierenden Ansatz (AP 2). Dies kann zu großen Herausforderungen hinsichtlich Speicherbedarf und Zugriffszeiten führen. Als möglicher Lösungsansatz wurde im Rahmen eines Unterauftrags die Firma Marschelke Messtechnik mit der Untersuchung der Möglichkeit zur Einbindung von AMREX, einem Software Framework für massive parallele, blockstrukturierte Adaptive Mesh Refinement (ARM) Anwendungen beauftragt.

Im Rahmen der Verifikation der in AP 3 entwickelten Simulationsmodelle wurden die entsprechenden Arbeiten von der Hochschule Heilbronn (Unterauftragsnehmer) begonnen sowie mit der Erarbeitung alternativer Auswertemethoden zu den von uns genutzten MCMC-Methoden.

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

Bisher wurden die in den gemessenen Spektren nachgewiesenen Photonen mittels einer Poisson-Verteilung modelliert. Diese beschreibt die Realität jedoch nur bedingt. Die in der Auswertung genutzten Full-Energy-Peaks der charakteristischen Gamma-Linien in den gemessenen Spektren sitzen im Allgemeinen auf einem (kontinuierlichen) Untergrund auf. Dies erfordert eine Korrektur („Untergrundabzug“), der gerade bei niedrigen Zählraten eine naiv erwartete Poisson-Verteilung verfälscht und zu Abweichungen führt. Diese Problematik soll durch ein entsprechend geeignetes Model behoben werden.

Wie schon im vorhergehenden Bericht angedeutet, bestehen für bestimmte Aktivitätsverteilungen Ambiguitäten, die zu systematischen Abweichungen zwischen den mit MCMC rekonstruierten und tatsächlichen Aktivitätsverteilungen führen. Diese Unsicherheit soll

mit einem „Mixture“-Modell basierend auf einer Dirichlet-Verteilung verschiedener Referenzverteilungen (homogen, punktförmig und torroidal) abgebildet und hiermit das Ausmaß der systematischen Abweichungen bestimmt werden.

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

Über ENTRAP (European Network of Testing Facilities of Radioactive Waste Packages), in dem RCM Mitglied ist, wurde bekannt, dass sowohl bei CEA, Frankreich, als auch bei SCK/CEN, Belgien, Gruppen an ähnlich gelagerten Fragestellungen arbeiten. Es wurde ein direkter Kontakt zu diesen aufgenommen und in ersten (virtuellen) Treffen fand ein extensiver Informationsaustausch statt. Die gewonnenen Informationen werden im Rahmen des Vorhabens berücksichtigt.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

T. Bücherl, S. Rummel, M. Blaszczyński, Ch. Lierse von Gostomski, Improvement of Quantification in Non-Destructive Characterization of Radioactive Waste Packages – Introduction to the Ideas of a Currently Started Project”, WM2020, March 8 – 12. 2020, Phoenix, Arizona, USA, [https://s3.amazonaws.com/amz.xcdsystem.com/A464D2CF-E476-F46B-841E415B85C431CC\\_abstract\\_File498/FinalPaperPDF\\_20197\\_0123121044.pdf](https://s3.amazonaws.com/amz.xcdsystem.com/A464D2CF-E476-F46B-841E415B85C431CC_abstract_File498/FinalPaperPDF_20197_0123121044.pdf)

Eine weitere Veröffentlichung ist in Vorbereitung.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9420
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Managen im Baubetrieb (TMB) <b>Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebände	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2020 bis 31.12.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.588.164,16 € (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

Gesamtziel des Forschungsprojekts EMOS ist eine mobile Inspektionseinheit, die fernhantiert und automatisiert die gesamte Fassoberfläche, einschließlich Deckel und Boden, optisch erfasst, analytisch auswertet und sowohl elektronisch speichert als auch die Ergebnisse in Form eines Inspektionsberichts ausgibt. Auf diese Weise können wiederkehrende Überprüfungen des Fassbestands unter immer gleichen Prüfbedingungen absolviert werden. Ein entscheidender Vorteil ist die Möglichkeit einer fernhantierten Durchführung der Inspektion, um die Strahlendosis der Mitarbeiter vor Ort zu reduzieren. Die optische Auswertung, Darstellung und Ausgabe der Ergebnisse wird durch eine speziell zu entwickelnde Software eine exaktere Überprüfung und Analyse der Fassoberflächen gewährleisten, als dies durch manuelle und visuelle Inspektionen möglich ist, wie sie aktuell in den Zwischenlagern ausgeführt werden. Das kontinuierliche Monitoring der lagernden Fassgebände wird erleichtert und auch die Rückverfolgung einer möglichen Schadensentwicklung durch den Abgleich von archivierten Messergebnissen ist ein neuartiges und starkes Instrument, das dazu beiträgt, die Sicherheitsaspekte der Zwischenlagerung zu erhöhen und langfristig zu gewährleisten. Korrosionsschäden können mit Hilfe der Inspektionseinheit bereits in einem sehr frühen Stadium identifiziert werden und es können frühzeitig Maßnahmen getroffen werden, die dem Verlust der Integrität der Lagerbehälter entgegenwirken.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**AP1 (Grundlagenerarbeitung):** Recherchearbeiten, Ideenentwicklung, Erstellung und Abstimmung eines Anforderungsprofils, Zusammenstellung der möglichen Komponenten

**AP2 (Vorstudie):** Vorversuche zur Auslegung und Komponenten der Anlage, Vorversuche zur Konfiguration der Kamera- und Laserkomponenten und der optischen Aufnahme, Durchführung von Versuchen zur Detektion von Reaktionen im Fassgebände und Korrosionsentstehung in einem frühen Stadium (zusätzlich)

**AP3 (Konzeptphase):** Abgleich und Anpassung des Entwurfs mit KTA-Regelwerk und DIN-Normen für die Produktanwendung im kerntechnischen Bereich, Ausarbeitung eines abschließenden Entwurfs des kompletten Systems, Konzepterstellung, eine Auswertung der Versuche zur Detektion von Korrosion und Reaktion im Inneren des Fassgebändes und Erstellung eines zusätzlichen Projektantrags (zusätzlich)

**AP4 (Software-Entwicklung):** Überführung der Aufnahmen in lokales Koordinatensystem, automatische Erkennung von Schadstellen aus Bildern, automatische Analyse des 3D-Profiles der Oberfläche

**AP5 (Erstellung Demonstrator 1.0):** Bau des Systems (Demonstrator 1.0), Einbau des optischen Aufnahmesystems in den fertiggestellten Demonstrator 1.0 (M2)

**AP6 (Feineinstellungs- und Testphase):** Testphase und Kalibrierung des gesamten Aufnahmesystems, Anpassung von Änderungen aus der Testphase auf das ausgearbeitete Konzept aus Arbeitspakets 3

**AP7 (Validierungsphase):** Anpassung, Validierung und Verbesserung der Hard- und Software, Testaufnahmen mit kalibriertem, optischem System, Test der automatischen Prozessierung

**AP8 (Iterationsphase und Bau Demonstrator 2.0):** Wiederholung erforderlicher Schritte der Arbeitspakete 6 bis 8 bis zur finalen Reife des Demonstrators 1.0 (M3), Bau und Test des praxistauglichen Demonstrators 2.0

**AP9 (Praxisphase und Abschlusstest):** Testläufe unter realen Bedingungen, erneute Anpassung, Validierung und Verbesserung der Hard- und Software bis zur finalen Reife Demonstrator 2.0 (M4)

**AP10 (Evaluationsphase):** Evaluation des gesamten Vorhabens, Ausarbeitung von Ergebnispräsentationen

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu AP2 und AP3)

#### Vorstudie und Konzeptphase

**TMB:** Es erfolgte eine umfassende Recherche zum Anforderungsbedarf und den Randbedingungen für den Aufbau des Demonstrators um mögliche technische Lösungen für den Ablauf der Inspektionsvorgänge zu finden. Hierzu wurden diverse Zwischenlager (KTE, Kernkraftwerk Philippsburg, JEN) und das KAH besichtigt, um das Projekt räumlich und technisch der Praxis und den Bedürfnissen der Anwender anzupassen und um ein Bild von den zu inspizierenden, lagernden Abfallgebänden zu erhalten, sowie Herstellung des Praxisbezugs und Knowhows in Planungs- und Konzeptionsarbeiten weiter profitieren. Die einzelnen Anforderungen haben wir folgendermaßen erfüllt: um die Inspektionseinheit mobil zu halten, wird das gesamte System in einem geschlossenen 20“ High Cube Container ausgeführt. Um die optische Aufnahme der Gesamte Fassoberfläche, einschließlich Deckel und Boden, fernhantiert und automatisiert zu Erfassen von Schäden wie Korrosion, Beulen, Kratzer wurden mehrere Varianten erarbeitet und einer Bewertung unterzogen:

- Variante 1 Drehteller plus Greifarm - Vorteile sind minimale Anzahl an Sensoren und Gute Erfassbarkeit aller Fassflächen. Nachteile ist Höhe Kosten des Greifarms.
- Variante 2 - Kippanlage mit integrierter Wälz- und Rotationsvorrichtung - Vorteile ist minimale Anzahl an Sensoren. Nachteile ist die Rotation des Fasses möglicherweise nicht genügend stabil, welche durch mögliche Deformationen des Fasses und instabile Lagerung hervorgerufen werden kann.
- Variante 3 - Drehteller plus Fasskippanlage. Vorteile sind Gute Erfassbarkeit aller Fassflächen, größere Stabilität der Fassrotation, relativ günstiger Preis der Anlage. Nachteile sind Größere Anzahl an Sensoren erforderlich, Lineares Nachführen der Sensoren über Schiene erforderlich um den Messabstand beizubehalten.
- Variante 4 - Fasskippanlage mit integrierter Wälzvorrichtung ohne horizontale Rotation. Vorteile ist kein Drehteller notwendig und relativ günstiger Preis der Anlage. Nachteile sind größere Anzahl an Sensoren erforderlich, Rotation des Fasses möglicherweise nicht genügend stabil, Zusätzliche Linearbewegung der Sensoren zur Erfassung des Deckels notwendig.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile inklusive Kostenrechnung, wurde die Variante 3 Drehteller plus Fasskippanlage als Vorzugsvariante ausgewählt. Zusätzlich ist für die Fasskippanlage eine integrierte Wälzvorrückführung vorgesehen, so dass auch Großteile von Variante 4 getestet werden können. Nach Auswahl geeigneter Messtechniken für den zu entwickelnden Demonstrator beginnt die Einholung von Angeboten sowie die Beschaffung der erforderlichen Grundausstattung zum Bau der Inspektionseinheit. Für eine bessere Kompatibilität und Funktionalität der Komponenten untereinander, eine weitreichendere Gewährleistung, sowie Zeitgewinn wurde sich für eine Bestellung der erforderlichen Grundausstattung aus einer Hand entschieden. Dies beinhaltet im Wesentlichen die Containereinheit, die Förderkomponenten sowie die Mess- und Regelungstechnik.

**IPF:** Zunächst wurde eine Recherche inkl. Literaturstudie zur industriellen Datenerfassung mittels Laser-Lichtschnittverfahren durchgeführt. Außerdem wurde eine Schulung für den Einsatz und die Auswertung von Lichtschnittsensoren der Firma LMI Gocator besucht, inkl. der Aufklärung über verschiedene Laserklassen. Aufgrund der relativ geringen Messabstände wurde ein System der Laserklasse 2 gewählt, da hierfür keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen, z. B. Schutzbrillen, Laserschutzbeauftragter, erforderlich sind. Die Planung der Lasermessungen erfordert wegen der Größe der zu erfassenden Fässer eine entsprechende Länge der Laserlinie, welche nur durch sehr wenige Sensoren auf dem Markt erreicht wird. Die Randbedingungen und Grenzen beim Einsatz des Laserlichtschnittverfahrens wurden ermittelt. Für die notwendigen Vorversuche und Testmessungen wurden zwei Fässer in unterschiedlichen Größen und mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften (matte bzw. glänzende Oberfläche) beschafft. Danach wurden für Testzwecke verschiedene Beleuchtungen ausgeliehen. Mit dem am Institut vorhandenen Kameras konnten erste Versuche durchgeführt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Beleuchtungen so ausgerichtet werden können, dass im zentralen Bereich, der von den Kameras erfasst wird, keine störenden Glanzreflexe bzw. Überstrahlbereiche auftreten. Dies kann z. B. so erreicht werden, dass von links und rechts im Winkel von ca. 45° gleichzeitig beleuchtet wird. Aufgrund der räumlichen Restriktionen der Inspektionsanlage in einem Container und der Dimension der Fassgebilde sowie der notwendigen Genauigkeitsanforderungen wurden die Spezifikationen der Sensoren festgelegt. Dazu gehören Auflösung der Kameras, Öffnungswinkel der Objektive, Messfrequenz der Kameras und Lasersensoren, Länge der Laserlinie des Lichtschnittsensors und Größe und Anzahl der Beleuchtungen. Dazu wurde eine umfangreiche Recherche über auf dem Markt verfügbare Hardwarekomponenten durchgeführt, entsprechende Angebote zum Preisvergleich eingeholt und ausgewählt.

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

In den nächsten Monaten ist der komplette Bau des Systems geplant, sowie der Einbau des optischen Aufnahmesystems in den fertiggestellten Demonstrator 1.0 (M2).

Für das Jahr 2021 ist bei der KONTEC und bei der DEM eine *Posterpräsentation* vorgesehen.

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

Keine

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

Kurzvorstellung des Projektes auf der Homepage des TMB:

[https://www.tmb.kit.edu/Forschung\\_4703.php](https://www.tmb.kit.edu/Forschung_4703.php)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH (Framatome)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vrtual REmote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: Intuitive VR/AV Multi-Robotersteuerung für ein anwendungsnahe 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> M.Sc. Sebastian Kohn	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:virero@framatome.com">virero@framatome.com</a>

## 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, nuklidspezifisch 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 Vorhabensbeschreibung 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

Im Rahmen von AP1a) unterstützte Framatome im Berichtszeitraum die Planung der Versuchsanlage am Lehrstuhl FAPS hinsichtlich der Komponentenauswahl (u. a. Roboter, Steuerungen, 3D-Messtechnik). Die entsprechenden Systemanordnungen bezüglich der vorgesehenen Untersuchungen und eines späteren Anwendungsfalls wurden gemeinsam festgelegt. Dabei wurde der Einsatz einer zusätzlichen externen Roboterachse zur Vergrößerung des Arbeitsraums erörtert. Insbesondere verschiedene Ansteuerungen der externen Achse wurden seitens Framatome untersucht und verschiedene Konzepte hierzu ermittelt, u.a. eine direkte Einbindung in die Roboter-Kinematik (YASKAWA) über dessen Steuerung. Als Ergebnis dieser Planung konnte am Lehrstuhl FAPS mit der Montage bereits gelieferter Komponenten begonnen werden.

Für AP2 wurde bei Framatome ein Softwareentwicklungs- und Testarbeitsplatz eingerichtet. Hierzu wurde ein neuer Entwicklungsrechner bestellt. Gemeinsam mit einem zweiten bereits vorhandenem Entwicklungsrechner steht nun ein Sensor-Pipeline-Rechner mit Linux-Betriebssystem und ein Unity-Rechner mit einem Windows Betriebssystem zur Verfügung, letzterer wird zur Darstellung der virtuellen bzw. der erweiterten Realität (VR/AR) genutzt.

Zusätzlich wurde für parallele Softwareentwicklungstests bei Framatome ein bereits vorhandener Roboter (STÄUBLI) in Wandmontage in Betrieb genommen. Zu Testzwecken wurden zum Roboterflansch passende Kamerahalterungen entwickelt. Mit diesen können Kameras im Einzel- oder Stereobetrieb für die Umgebungsdarstellung verwendet werden. So konnten folgende Arbeiten in AP2a) am Framatome Teststand durchgeführt werden:

- Einlesen der Daten verschiedener 3D Kameras (MICROSOFT Azure Kinect, STEREO LABS ZedM und INTEL RealSense) in die jeweilige API (Programmierschnittstelle) bzw. ins SDK (Software Development Kit)
- Erstellen einer zentralen Applikation, kompatibel zu jedem zur Verfügung stehenden Kameratyp

- Programmierung einer sogenannten Sensor-Pipeline zur Weiterverarbeitung der Sensor- bzw. Kameradaten (Kamerabilder, externe und interne Kamerainformationen)
- Integration einer ROS (Robotic Operating System)-Schnittstelle zur Kommunikation und Datenübertragung der Sensor-Pipeline zwischen Sensor-Pipeline-Rechner und dem Unity-Rechner

Am Ende des Berichtszeitraumes wurden erste Dauertests der Sensor-Pipeline hinsichtlich der Stabilität gestartet. Zusammenfassend konnten in AP2a) die folgenden Fortschritte erreicht werden. Die physische Umgebung wird auf Unity-Seite in Form einer virtuellen Welt so realgetreu wie möglich nachgebildet. Statische Objekte wie den Handhabungstisch und die Wände wurden ebenfalls als statische Objekte in die virtuelle Realität eingefügt. Bewegliche Objekte wie die Roboter wurden mit ihren einzelnen Bewegungsachsen ebenso in der virtuellen Welt abgebildet. Die Ausrichtung der Bewegungsachsen wird bereits über ROS an den Unity-Rechner übertragen und die Roboter können somit echtheitsgetreu mit den richtigen Achswinkeln der Roboter dargestellt werden. Für dynamische Objekte innerhalb der Szene - wie zum Beispiel die zu sortierenden Teile aus den Abfallbehältern - wird aus den übersendeten Kamerabildern auf der Unity-Seite eine Punktwolke berechnet und in die VR gestreamt, damit der Operator mit der realen Welt interagieren kann. Dafür muss zunächst die extrinsische Pose (Orientierung und Position der Kameras im Raum) bestimmt werden. Um dies zu gewährleisten wurde eine sogenannte ArUco-Marker Funktion integriert, durch welche die extrinsische Pose sehr genau abgeschätzt werden kann, dies ermöglicht die Punktwolke an der richtigen Position in der VR einzublenden. Möglichst exakte Punktwolken sind eine zentrale Basisfähigkeit für die räumliche Charakterisierung in AP4a).

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

Im AP1a) unterstützt Framatome weiterhin die Errichtung der Versuchsanlage am Lehrstuhl FAPS. Nach erfolgreicher Errichtung können die Ergebnisse zur exakten Umgebungsrepräsentation aus AP2a) vom Framatome Teststand in die Versuchsanlage übertragen und dort evaluiert werden. Weitere Arbeiten in AP2 werden fortgeführt, z.B. die Erweiterung der Sensor-Pipeline, die Integration weiterer Kameras und notwendiger Segmentierungs- und Bildverarbeitungsalgorithmen. Eine dynamische Anpassungsmöglichkeit soll entwickelt werden, welche verschiedene Algorithmen zur Verbesserung der Darstellung vom Operator optional auswählen lässt. Ein wichtiger kommender Arbeitsschritt stellt außerdem die möglichst exakte Positionsbestimmung der Roboter dar. Als Vorbereitung zur Funktionsintegration in AP1b) und zur Validierung der eigenen Entwicklungen werden entsprechende Tests bezüglich der Richtigkeit der verwendeten Algorithmen entwickelt.

#### **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 teilnehmen.

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

A. Blank et al.: „**Robotic Technologies for Volume-Optimized Conditioning of Radioactive Waste – VIRERO**“, ICOND 2020, Aachen, 24. - 26. November 2020.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Virtual REmote RObotics for Radiometric Sorting (VIRERO) Teilprojekt: 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, nuklidspezifisch 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, radionuklidspezifisch 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“.

Im Rahmen des Projekts ist AiNT allein verantwortlich für AP3 „Radiologische Charakterisierung“: 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, wie auch für die orts aufgelöste Aktivitätsrekonstruktion.

Zusätzlich ist die AiNT in Arbeitspaket AP4b) „Datenfusion und Zwilling“ gemeinsam mit dem FAPS eingebunden.

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

### AP3a) Planung Messanlage & Detektormodellierung

Im Rahmen der Planung der Messanlage wurde das Anforderungsprofil der Detektoren festgelegt. Charakteristische Kriterien bei den Detektoren sind Effizienz, spektrale Auflösung, Messbereich inkl. max. Zählraten, die verarbeitet werden können, Temperaturstabilität und Investitions- und Betriebskosten. Da der Aktivitätsbereich der zu charakterisierenden Abfälle sich von freizugehenden rad. Reststoffen bis hin zu Hochdosisleistungsabfällen (HDL-Abfälle) streckt, wurden vier Detektoren spezifiziert, die die Anforderungen von einer Entscheidungsmessung im Rahmen der Freigabe bis hin zur schnellen Charakterisierung von HDL-Abfällen abdecken. Nachdem Detektoren verschiedener Hersteller verglichen wurden, wurden diese final spezifiziert und die Bestellung der vier Gamma-Detektoren wurde ausgelöst. Für die radiologischen Messungen werden ein Reinstgermaniumdetektor (HPGe-Detektor), zwei Szintillationsdetektoren (CeBr und NaI(Tl)) und ein energiekompensiertes Geiger-Müller-Zählrohr eingesetzt. Innerhalb des Berichtszeitraums wurde eine Messanlage zur automatisierten Positionierung der Detektoren über einem Sortiertisch konstruiert. Auf dem Sortiertisch befinden sich später die zu sortierenden radioaktiven Reststoffe. Die Detektoren schauen kollimiert nach unten auf den Sortiertisch. Für eine größtmögliche Flexibilität bezüglich des zu untersuchenden Aktivitätsinventars stehen vier unterschiedliche Kollimatoren zur Verfügung. Die Kollimatoren unterscheiden sich in ihrem Sichtfeld (Field of View: FOV) und erlauben somit eine kegelförmige Kollimation von einem max. Durchmesser von 48,3 mm bis 580,0 mm, projiziert auf die Oberfläche des Sortiertisches. Zur 3D-Geometrieerkennung der Objekte auf dem Sortiertisch wurden verschiedene Scanner verglichen und bewertet. Der selektierte 3D-Laserprofilscanner wurde beim Engineering der Messanlage berücksichtigt und bestellt. Innerhalb des Berichtszeitraums wurde das Detailengineering der Messanlage abgeschlossen.

### AP3c) Softwareentwicklung

Für die Fusionierung der 3D-Geometrieinformationen mit den Daten der radiologischen Charakterisierung ist eine Vorbearbeitung der Daten des Laserprofilscanners notwendig. Hierzu wurde zu den auf dem Markt verfügbaren 3D-Scannern recherchiert und deren Performance evaluiert. Mit zwei Geräten aus dem Consumerbereich wurde die Anwendbarkeit für VIRERO untersucht. Diese Geräte wurden mit einem Mock-Up, welches die tatsächliche Messsituation nachstellte, erprobt. Hierbei stellte sich heraus, dass Produkte der Consumerklasse für einen Einsatz im Projekt aufgrund mangelnder Messgenauigkeit nicht geeignet sind. Im Zuge der

Marktevaluation wurde der nun bestellte Laserprofilsensor mit einem Messabstand von 200 mm bis 400 mm bei einer Messbreite von 96 mm bis 194 mm als wirtschaftlichste Option ausgewählt. Die Genauigkeit der Tiefeninformation liegt im Sub-Millimeterbereich und ist damit mehr als ausreichend für den Anwendungsfall. Im Rahmen der Erprobung wurde ein Softwareprototyp mit der Bezeichnung Ply2Trac seitens AiNT entwickelt, welcher die zahlreichen vom Laserscanner akquirierten 3D-Punktwolken verarbeitet und in eine geeignete Geometriedarstellung des Sortiertisches und dem zu charakterisierenden Abfall überführt. Bei dem Prototyp kommt die Programmiersprache Python zum Einsatz. Im Rahmen der prototypischen Entwicklung wurde die Kompatibilität der fusionierten Geometriedaten mit der AiNT-eigenen Software TRACER bereits berücksichtigt, sodass unverzüglich mit der weiteren Entwicklung begonnen werden kann, sobald die Messanlage aufgebaut worden ist. Ein zusätzlicher Nutzen der gewonnenen Geometrieinformationen liegt in der Verwendung für die Greifposeschätzung der nachgeschalteten robotergestützten Sortierung, welche am FAPS entwickelt wird.

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

##### **AP3 a) Planung Messanlage & Detektormodellierung**

Für das Q2 2021 ist die Lieferung und der Aufbau der Messanlage (04/2021) avisiert. Die Detektoren sowie der 3D-Laserscanner sollen in 03/2021 AiNT zugestellt werden. Im nächsten Berichtszeitraum startet die Detektormodellierung für die mathematische Effizienzbestimmung. Das Grundkonzept der orts aufgelösten Aktivitätsrekonstruktion wird erarbeitet.

##### **AP3 b) Kalibrierung & Testbetrieb**

Nach dem Erhalt der Detektoren werden diese kalibriert und erste experimentelle Messungen mit Punktquellen durchgeführt. Die seitens des Herstellers spezifizierte Charakteristik wird überprüft. Nach dem die Messanlage angeliefert wurde, werden die Detektoren eingebaut und die Gesamtanlage in Betrieb gesetzt.

##### **AP3 c) Softwareentwicklung**

Die Entwicklung der Steuerungssoftware für den Messtisch beginnt in Q1 2021. Zu Beginn wird ein Konzept für die Softwarearchitektur erstellt. Das Konzept beinhaltet die Softwaremodule: AiNT-Steuerungssoftware, SPS-Steuerung der Messanlage, spektrometrische Auswertung, Ply2Trac und Aktivitätsrekonstruktion. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Softwaremodulen werden spezifiziert. Nötige Anpassungen der 3D-Geometrieerstellung aus den Daten des Laserscanners werden vorgenommen. Außerdem wird mit der Entwicklung der Software für die Aktivitätsrekonstruktion begonnen.

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

Im Rahmen weiterer F&E-Projekte, wie beispielsweise dem FORKA-Projekt QUANTOM® (Förderkennzeichen: 15S9406B) oder dem ERFE-Projekt ZEBRA (Förderkennzeichen EFE-0800541), 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**

A. Blank et al.: „**Robotic Technologies for Volume-Optimized Conditioning of Radioactive Waste – VIRERO**“, ICOND DIGITAL 2020, Aachen, 24. - 26. November 2020.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9422C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Vlrtual REmote RObotics for Radiometrie Sorting (VIRERO), Teilprojekt: 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 Messtechnologien entwickelt, um sowohl teleoperiert als auch teilautonom radioaktive Reststoffe zu zerlegen, nuklidspezifisch 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.

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 Gesamtvorhaben 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

AP5 (a) bis (d): Augmented Virtuality-Expertensystem sowie autonome Roboterfähigkeiten

## 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

Ein Fokus der Arbeiten lag auf der Planung und dem Aufbau der Versuchsanlage (AP1 (a)). Ausgehend von Vorüberlegungen der Antragsphase wurden für geeignet befundene Komponenten zusammen mit den Partnern bestimmt (u. a. Roboter, Steuerungen, Sicherheitssysteme). 3D-Simulationsgestützt erfolgte die Ermittlung der Systemanordnungen bezüglich der vorgesehenen Untersuchungen und eines späteren Use-Case. So wurden für die Abfallentnahme aus beengten Arbeitsräumen siebenachsige Knickarmroboter mit schlangenartigem Aufbau – also mit kurzen, gleichproportionierten Einzelgliedern – als zweckmäßig identifiziert. Ein wesentlicher Grund hierfür ist deren kinematische Redundanz durch Überbestimmtheit. Für das Führen einer Trennschere, wird dagegen ein Standardknickarmroboter mit einer hohen Traglast (>100 kg) als vorteilhaft angesehen. Konkret angeschafft wurden daher ein YASKAWA SIA20F sowie ein YASKAWA GP110. Zur Entwicklung und Bewertung einer beidhändigen simultanen Multi-Roboter Teleoperation wird darüber hinaus ein am Lehrstuhl vorhandener YASKAWA SIA10F in der Anlage integriert.

Für die Versuchsanlage und die anzufertigenden Subsysteme (u. a. höhenverstellbare Robotersockel, ansteuerbare Hubeinrichtungen als zusätzliche Roboterachse und Fassbereitstellungsvorrichtungen) wurden CAD-Konstruktionen angefertigt sowie die Spezifikation der jeweiligen Baugruppen erarbeitet. Nach dem Eintreffen erster Komponentenlieferungen wurde am Lehrstuhl mit der Anfertigung der Subsysteme sowie der Montage von Anlagenteilen begonnen (u. a. Schutzeinhausung, Sortiertisch und Abfallfassbereitstellung). Hinsichtlich der Absicherung wurde ein Gesamtkonzept aller mechatronischer Systembestandteile erarbeitet. Zum Ende des Berichtszeitraums wurde mit der Integration erforderlicher Sicherheits- und Steuerungstechnik begonnen.

Im Rahmen des AP2 (b) wurde eine bereits im Projektvorfeld entwickelte Middleware zur interoperablen Bewegungssteuerung bei der Teleoperation für das Projekt angepasst. Schwerpunkt der Arbeiten lag auf einer Portierung von Teilen der Middleware in die Programmiersprache C++ sowie in deren Erprobung. Die Überführung dient später dem Betrieb innerhalb eines Echtzeit-Kernels, wodurch die Grundlage für eine zuverlässige Kollisionsvermeidung im teleoperierten Multiroboterbetrieb geschaffen wird.

Innerhalb des AP4 (a) erfolgte eine vertiefte Recherche des Stands von Wissenschaft und Technik sowie die Eignungsbewertung von Segmentierungsverfahren zur räumlichen Charakterisierung von Szenen mit individuellen Handhabungsobjekten. Konventionelle pixelbasierte und salienz-basierte Verfahren sowie die Modellsegmentierung werden aufgrund der hohen zu erwartenden Objektvarianz als für den Anwendungsfall weniger geeignet bewertet. Der ableitbare Informationsgehalt einer kanten- und regionenbasierten Segmentierung wird als nicht ausreichend bewertet. Im Vergleich zu konventionellen Bildverarbeitungsalgorithmen werden künstliche neuronale Netze (KNN) für Szenen mit einer hohen Diversität an Merkmalen als

geeignet bewertet. Bei diesen ist bezüglich des Anwendungsfalls auf eine besondere Sorgfalt bei der Datensatzvorbereitung zu achten.

Ein möglicher Ansatz zur Segmentierung einer Szene mit unbekanntem hochindividuellen Handhabungsobjekten besteht darin, zunächst im Vorfeld bekannte Objekte sowie Systeme zu segmentieren, um die zu verarbeitende Gesamtdatenmenge zu reduzieren. Dies erweist sich für einen Sortierstand insofern als geeignet, da sich die Position und Orientierung jedes mechatronischen Systems jederzeit bestimmen lässt sowie ein Großteil der RGBD-Bildanteile aus der Anlage bestehen. Neben den bekannten Systemen werden Bildmerkmale hochindividueller Teile in die Trainingsdaten integriert. Der Ansatz dient einer ersten Teiledifferenzierung. Eine prototypische Umsetzung des Segmentierungsansatzes auf Basis von FuseNet (Hazirbas et al. 2016) zeigt in erfolgten Auswertungen, dass hochindividuelle Handhabungsobjekte echtzeitnah einer gemeinsamen Klasse zugeordnet werden, während bekannte Szenenobjekte eindeutig klassifiziert werden. Für eine Charakterisierung der unbekanntem Handhabungsobjekte ist allerdings eine Detailsegmentierung erforderlich, welche eine deutlich höhere Anzahl Objektmerkmale differenziert. Die Nutzung von Oberflächenmerkmalen wird hier als mögliche Verbesserung angesehen.

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

Ein Schwerpunkt der Arbeiten des Lehrstuhls in Q1/2021 liegt auf AP1 (a) zur Errichtung der Versuchsanlage. Aktuell in Anfertigung befindliche Anlagenstrukturen werden nach deren Eintreffen installiert, die verschiedenartigen Robotersysteme integriert und in Betrieb genommen. Hierzu gehört auch die Umsetzung des mit den Verbundpartnern konzipierten Sicherheitskonzepts. Nach der Inbetriebnahme und Durchführung erster Tests kann unter anderem die Fernsteuerung der Roboter (siehe AP2 (b)) sowie die von Framatome umgesetzte exakte Umgebungsrepräsentation der Anlage (vgl. AP2 (a)) evaluiert werden.

Komplementär zu den Arbeiten von Framatome bzgl. AP2 (a) werden von FAPS verschiedene 3D-Kamerasysteme zur räumlichen Charakterisierung bestimmt, in der Anlage installiert und bewertet. Im Anschluss erfolgt eine anwendungsnahe Erprobung mit Beispielabfallteilen (u. a. Filterkerzen, Beutelfilter sowie Abfall-/Schrottteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen). Für eine hochgenaue räumliche Geometriebestimmung wird zusammen mit der AiNT die Nutzung von 3D-Laserprofilscannern bewertet. Solche Systeme weisen das Potenzial zur Fusion mit einer radiologischen Charakterisierung im späteren Projektverlauf auf (vgl. AP4 (b)).

Zur Entwicklung der räumlichen und stofflichen Charakterisierung (AP4 (a)) hochindividueller Handhabungsobjekte, erfolgt die Erarbeitung einer neuartigen kombinierten Pipeline. Ziel ist dabei die verbesserte Segmentierung der bisher noch nicht eindeutig zuordbaren und daher unbekanntem Abfallteile. Erreicht werden soll dies unter anderem durch Kombination mit einer auf visuellen Merkmalen beruhenden stofflichen Charakterisierung.

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

Seit Projektstart haben sich keine Änderungen gegenüber der Antragstellung ergeben.

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

Blank, A et al.: Robotic Technologies for Volume-Optimized Conditioning of Radioactive Waste – VIRERO, 9th International Conference on Nuclear Decommissioning, 24.-26.11.2020, Aachen

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9417
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> USER2 – Umsetzung von Schwermetall-Landfarming zur nachhaltigen Landschaftsgestaltung und Gewinnung erneuerbarer Energien auf radionuklidbelasteten Flächen: Optimierungsstrategien	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 998.354,40 €
<b>Projektleiterin:</b> Prof. Dr. Erika Kothe	<b>E-Mail-Adresse der Projektleiterin:</b> erika.kothe@uni-jena.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Nach einer Etablierungsphase soll im vorliegenden Antrag die Möglichkeit einer mikrobiell gestützten Phytostabilisierung zur Erzeugung von Lignocellulose als nachwachsendem Rohstoff auf mit Schwermetallen und Radionukliden (SM/R) belastetem Substrat aus einem ehemaligen Uranbergbau nahe Ronneburg in Ost-Thüringen etabliert werden. Neben Uran werden insbesondere Cäsium und Strontium sowie Thorium und des Weiteren die Lanthanoiden als natürliche Analoga für dreiwertige Actiniden untersucht. Damit können auf den etablierten Testflächen die Untersuchungen zur Nutzung verschiedener Baumarten mit einer Unterpflanzung in naturnahen mehrstöckigen Beständen eingesetzt werden, die wachstumsfördernde Nachhaltigkeit des Auftrags von Rendzina auf einem stark belasteten Substrat unter dem Einfluss der SM/R-Speziation und kolloidalen/nanopartikulären Phasen zu untersuchen. Es erfolgen zudem Erosionsbeobachtungen unter Weiterentwicklung automatisierter Erfassungssysteme sowie Biodiversitätsanalysen im Zusammenhang mit optimiertem Baumwachstum. Die Quantifizierung der Erträge und des SM/R-Transfers in die Pflanze erlaubt die Einordnung der angewandten Strategien zur Aufforstung mit Kurzumtriebsplantagen, die auf andere mit SM/R-kontaminierte Standorte übertragen werden kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

In AP 1 (Nachhaltigkeit der Bodenzuschläge und Änderung der Effekte mit der Zeit) wird das Baumwachstum und der Effekt aufsteigender, kontaminierter Wässer längerfristig mit dem Einfluss der Inokulation korreliert und Analysen von europäischen Vergleichsstandorten zur Übertragbarkeit der Ergebnisse durchgeführt.

AP2 (Weiterentwicklung und Etablierung einer automatisierten Dokumentation) dokumentiert die Veränderungen mit einem Multiscanner- und LIDAR-System zur digitalen Kartierung von Wachstum und Vitalitätsfaktoren.

AP 3 (Stickstofffixierung durch Anpflanzen von Wirtspflanzen) widmet sich stickstofffixierenden Bakterien und der Stickstoffspeziation in Grund- und Porenwässern.

In AP 4 (Etablieren einer Bepflanzung auf stark belasteten Standorten) wird Pflanzenwachstum trotz stark belasteter Wässer erreicht werden und reaktiver Transport im Anstrom sowie die Schwermetalltoleranz im Wurzel-Pilzmycel-Bereich untersucht.

AP 5 (Kurzumtriebsplantagen auf trockenen und grobkörnigen Standorten) befasst sich mit Endomycorrhizapilzen und ihrer Kombination mit Ektomykorrhiza und Bodenmikroflora.

AP 6 (Erosionsschutz durch Unterpflanzung) wird Erosion beobachten und der Schutz durch

Einsatz von Gräsern auf den Abtrag wird erfasst.

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

(AP 1, 4 und 5) Die jährliche Bestimmung der Bodenatmung, Mikrobiologie und Bonitur des Wachstums der Bäume sowie die Bestimmung der Beikräuter und Bodenanalysen wird analysiert und in Bezug zu Vorergebnissen gesetzt. Im Dezember 2019 erfolgte die erste Baumernte auf dem Testfeld Gessenwiese, deren Biomasse analysiert wird. Die Mikrobiom-Analysen mit den Proben aus 2019 zeigen die Nachhaltigkeit der Inokulation.

(AP 2) Die Drohnen-Befliegung wurde Anfang Juni 2020 ein halbes Jahr nach der Ernte der Baumbiomasse durchgeführt. Die Validierung dieser Daten mit den vor Ort erhaltenen Messwerten zeigen gute Übereinstimmungen mit den Boniturdaten der Baumhöhen (+-15 % Abweichung). Die Daten zur Biomasseproduktion sowie den enthaltenen Schwermetallen (Wurzel-, Stamm-, Blattmaterial) wurden u.a. in Masterarbeiten eingehend erfasst und ausgewertet.

(AP 3) Stickstofffixierung durch Actinorhiza konnte durch Auffinden der Assoziation untermauert werden. In einer detaillierten Probenkampagne werden Bodenwässer untersucht, was aufgrund der Corona-Beschränkungen noch nicht abgeschlossen werden konnte. Zwei Probenahmen im März und Mai 2020 wurden dennoch durchgeführt und die gewonnenen Proben mittels NTA und LC-OCD-OND auf den Gehalt an nanopartikulärer Phase, organisch gebundenen Stickstoff, Nitrat und Ammonium und via ICP-MS auf die Spurenelemente untersucht.

(AP 5) Wechselwirkungen zwischen Ekto- und Endomycorrhiza konnten für verschiedene Baumarten gezeigt werden.

(AP 6) Auf den trockenen und nährstoffarmen Testflächen Erosionsplot und Plateauplot am Kanigsberg zeigt sich, dass die Unterpflanzung mit *Festuca rubra* einen signifikanten Einfluss auf das Baumwachstum hat. Die Bodenmikrobiologie ist hier ebenfalls verändert.

### 4. Geplante Weiterarbeit

AP 1: Es wurden vermehrt bodenmikrobiologische Untersuchungen durchgeführt, die die Nachhaltigkeit der Inokulation betreffen. Dazu wurden auch Wurzelhorizonte aufgegraben und die Mykorrhizierungsrate sowie -diversität bestimmt. Aus denselben Proben wurden chemische Parameter zum Boden gewonnen. Die Bonitur des Wachstums der Bäume, Bestimmung der Beikräuter und Bodenanalysen sind wie geplant für die Gessenwiese erfolgt. Aufgrund der Corona-Beschränkungen sind am Kanigsberg diese Untersuchungen zurückgestellt worden.

AP 2: Die nächste Validierung zur automatisierten Erfassung des Baumwachstums und der Bodenverlagerung ist für September 2021 geplant.

AP 3: Um die Verbreitung von Actinorhiza sowie die Aktivität der freilebenden Stickstofffixierer in ihrer Funktion für den Boden zu testen, wurden Bodenwasserproben, soweit verfügbar, analysiert. Es zeigt sich besonders bei den Erlen ein hoher N-Gehalt im Bodenwasser. Die Analysen zeigten leider auch Verschleiß der Bodensonden, die für die Messungen 2021 nachgekauft und eingebaut werden müssen, um das volle Spektrum der Messungen weiterhin zu erlauben und so Vergleichsdaten zu den vergangenen Jahren zu haben.

AP 4: Die Erfassung schwermetalltoleranter Pilze, in vitro-Systeme/Mikrokosmen zur Untersuchung molekularer Schwermetalltoleranzmechanismen, Hydrogeochemie incl. Kolloid-/Nanopartikelcharakterisierung, sowie SM/R-Speziation sind weitergeführt worden und können 2021 ausgewertet werden, um ein Transportmodell zu erstellen.

AP 5: Co-Kulturen, Mikrobiomanalysen, Wasser- und Nährstoffaustausch durch Untersuchung stabiler Isotope werden weitergeführt.

AP 6: Insbesondere die Chlorophyllfluoreszenzmessungen wurden mit besonders hoher Auflösung durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen einzelnen Blättern desselben Baums ebenso hoch sind, wie die Abweichung zwischen verschiedenen Bäumen. Daher kann im Folgenden die Zahl der Analysen verringert werden.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt basiert auf durch das BMBF geförderten, abgeschlossenen Projekten (Baubio, Phytorest, Strahlung und Umwelt II, Teilprojekt C, FKZ: 02NUK015C; Transaqua, FKZ: 02NUK030C; USER, FKZ: 15S9194).

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Wirth S, Krause K, Kunert M, Broska S, Paetz C, Boland W, Kothe E (2020) Function of sesquiterpenes from *Schizophyllum commune* in interspecific interactions. Plos One, [Epub ahead of print] PONE-D-20-28383R1
- Abdulsalam O, Wagner K, Wirth S, Kunert M, David A, Kallenbach M, Boland W, Kothe E, Krause K (2020) Phytohormones and volatile organic compounds, like geosmin, in the ectomycorrhiza of *Tricholoma vaccinum* and Norway spruce (*Picea abies*). Mycorrhiza, [Epub ahead of print] doi: 10.1007/s00572-020-01005-2.
- Traxler L, Wollenberg A, Steinhauser G, Chyzhevskiy I, Dubchak S, Großmann S, Günther A, Gupta DK, Iwanek KH, Kirieiev S, Lehmann F, Schulz W, Walther C, Raff J, Kothe E (2020) Survival of the basidiomycete *Schizophyllum commune* in soil under hostile environmental conditions in the Chernobyl Exclusion Zone. J Hazard Mater [Epub ahead of print] doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124002.
- Abdul Hayee (2020) Effects of xenobiotics on *Schizophyllum commune*. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Alisa Scherzer (2020) Untersuchungen der Schwermetall- und radionuklidgehalten in schnellwachsenden Gehölzen auf dem Kanigsberg, Ostthüringen. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Atif Ahmad (2020) *Tricholoma vaccinum*: Interactions and heavy metal tolerance. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Martin Richter (2020) Untersuchung des Schwermetalltransportes im System Boden-Pflanze auf dem Testfeld Gessenwiese im ehemaligen Uranabbaugebiet bei Ronneburg. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Florian Beulke (2020) Schwermetallverteilung in Pflanzen vom Testfeld Kanigsberg, Ronneburg. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9401A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Universität Kassel – Fachbereich Maschinenbau Institut für Arbeitswissenschaft und Prozessmanagement Arbeits- und Organisationspsychologie 34132 Kassel	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> SiKoR - Sicherer und kosteneffektiver Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2017 bis 31.10.2020	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 522.776,40 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Oliver Sträter	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> straeter@uni-kassel.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projektes ist, auf Basis von Risikobetrachtungen innovative Lösungen bzw. Unterstützungssysteme zur Optimierung der Rückbauplanung und -durchführung herzuleiten und Dritten zur Verfügung zu stellen. So wird z.B. durch Kombination der Risikoaspekte in der Projekt- und Prozessplanung mit den Mechanismen für eine gute menschliche Zuverlässigkeit eine robuste Planung der Prozesse erreicht. Die Teilziele des Vorhabens sind demgemäß:

- Planungsprozesse hinsichtlich Minimierung der technischen und menschlichen Risikobeiträge zu unterstützen
- Die Durchführung von Rückbauarbeiten hinsichtlich Minimierung der technischen und menschlichen Risikobeiträge zu unterstützen
- Empfehlung zur Integration dieser Erkenntnisse in das existierende Risikomanagement herzuleiten

Durch die präventiv ausgerichtete Unterstützung von Planungsprozessen und Arbeitsvorbereitungen mit zugehörigen Schnittstellen wird zusätzlich ein kosteneffektiver Rückbau unterstützt, indem Umplanungsaufwände bzw. Nacharbeiten minimiert werden.

Mit dem Vorhaben steht den deutschen Anlagen und deren Betreibern und Dienstleistern ein Verfahren und Instrument zur Verfügung, um Planungsaspekte im Rückbau zuverlässiger zu gestalten sowie Rückbauarbeiten zuverlässiger, sicherer und auch kosteneffizienter durchzuführen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: Kommunikation, Koordination, Dokumentation & Veröffentlichung  
 AP 2.2: Zusammenstellung eines Verfahrenskatalogs  
 AP 3.2: Erstellung eines Maschinenkatalogs  
 AP 4.2: Technische Risikoidentifizierung  
 AP 5: Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse  
 AP 6: Validierung

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

Im Juli 2020 wurde anhand des Mock-up-Aufbaus eines Rückbauszenarios im *remote support*-Labor des Fachgebietes A&O eine *remote support*-Führungssituation als Rollenspiel simuliert, um die im Rahmen des Projektes zu diesem Zweck entwickelten Unterstützungssysteme zu testen (AP 5). Der Begriff *remote support* stellt einen Spezialfall von Führung dar und bezeichnet eine Art der Tätigkeitsunterstützung, bei welcher eine Führungskraft bzw. ein Aufsichtsführender vor Ort (AvO) die Arbeitstätigkeiten seiner Mitarbeitenden unter Nutzung von Unterstützungssystemen aus der Distanz anleitet. Eine solche Tätigkeitsunterstützung kann im Rahmen von Rückbauarbeiten etwa erforderlich sein, wenn ungünstige Umgebungsbedingungen vorliegen oder wenn ein AvO bzw. eine Führungskraft mehrere Arbeitsstellen gleichzeitig koordinieren muss.

Die *remote support*-Führungssituation wurde inhaltlich derart gestaltet, dass die Aufgabe eines Mitarbeitenden darin bestand, im (fiktiven) Hochrisikobereich eines Atomkraftwerkes – dem *remote support*-Labor (Abb. 1) – an einem CNC-Schaltschrank (Abb. 1) eine Tastenkombination einzugeben sowie anschließend eine Stahlkonstruktion (Abb. 1) zurückzubauen. Das Unterstützungssystem, mit dem der Mitarbeitende im Rahmen des *remote support*-Prozesses im Rollenspiel ausgestattet wurde, ist das am Fachgebiet A&O entwickelte Motion-Capturing-System *cEYEBermanS*, welches aus einer Bewegungsmessung (Motion-Capturing) und einer Eye-Tracking Brille besteht und die Live-Übertragung von Blick- und Bewegungsdaten während der Arbeitstätigkeit ermöglicht (Abb. 3). Zusätzlich zu dem Unterstützungssystem *cEYEBermanS* waren der Mitarbeitende und die Führungskraft über ein Headset miteinander verbunden, über welches ein verbaler Austausch erfolgen und Fragen des Mitarbeitenden aktiv angesprochen und geklärt werden konnten, bevor kritische Situationen oder Unfälle entstanden.



Abbildung 1. Links: *remote support*-Labor; Mitte: CNC-Schaltschrank; Rechts: zurückzubauende Stahlkonstruktion

Die Führungskraft hielt sich während des Rollenspiels im *Digital Classroom* des Fachgebietes A&O (Abb. 3) auf, einer innovativen, mit Monitoren ausgestatteten Lern- und Gruppenarbeitsumgebung, auf dessen Monitore das Blickfeld des Mitarbeitenden, dessen visueller Fokus sowie dessen Bewegungsdaten über das Motion-Capturing- und Eye-Tracking-System des *cEYEBermanS* live übertragen wurden (Abb. 3). Die Führungskraft gab dem Mitarbeitenden im Rahmen des Rollenspiels die folgende Abfolge von Eingabeschritten vor:

- Drücken der Taste „Start“ und „Teach In“ auf dem Pinpad
- Eingabe der Zahlenkombination „957 513“ auf dem Pinpad
- Drücken der grünen Taste „Steuerung ein“
- Umlegen des roten Hauptschalters

Abbildung 2 zeigt das Bedienfeld des Schaltschranks. Anhand der rot markierten Bereiche lassen sich die Blickpunkte des Mitarbeitenden, die dieser bei der Eingabeabfolge am Schaltschrank vornimmt, nachvollziehen. Die Blickdaten werden über das Eye-Tracking-System live in den Digital

Classroom und an die Führungskraft übermittelt, wodurch Durchführungsfehler des Mitarbeitenden von dieser zeitnah erkannt und korrigiert werden können.

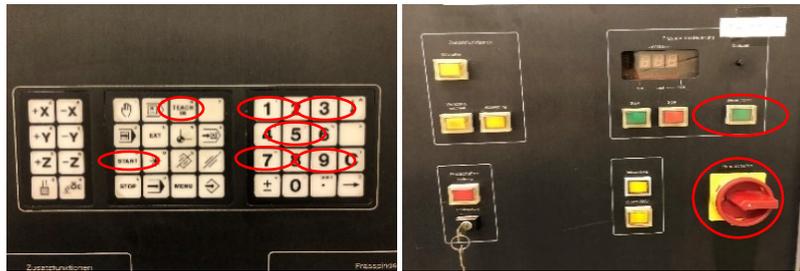


Abbildung 2. Eingabeabfolge am Schaltschrank

Durch die Übermittlung der visuellen und bewegungsbezogenen Informationen an die Führungskraft konnte diese die Tätigkeitsausführung des Mitarbeitenden live nachvollziehen und diesen dadurch optimal fachlich anleiten und unterstützen. Durch die Übertragung der Bewegungsdaten können über die konkrete Tätigkeitsunterstützung hinaus zudem körperliche Fehlbelastungen sowie mögliche Fehlbedienungen des Mitarbeitenden erkannt und korrigiert und so die Zuverlässigkeit der Arbeitstätigkeiten sichergestellt werden. Abbildung 3 zeigt, wie die Führungskraft im Digital Classroom den Mitarbeitenden durch die gleichzeitige Übertragung seiner Blick- und Bewegungsdaten im *remote support*-Prozess optimal unterstützen kann.



Abbildung 3. links: Videowand im *Digital Classroom*; rechts: parallele Informationsdarstellung von Blick- und Bewegungsdaten sowie Live-Übertragung der Rückbautätigkeit auf der Videowand im Rahmen des experimentellen Abbildung Rollenspiels

Im September 2020 fand in Heidelberg eine VDI-Fachkonferenz zum Thema “Rückbau konventioneller Kraftwerke und Industrieanlagen” statt. Dort hatte das Fachgebiet A&O gemeinsam mit dem KIT-TMB einen Stand (Abb. 4) bei der Fachaussstellung, an dem das Projekt SiKoR sowie die verwendeten Methoden präsentiert wurde und ein Austausch mit potenziellen Praxispartnern stattfand, die Interesse an einer Kooperation bekundeten (**AP 6**).



Abbildung 4. Projektstand SiKoR

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

Fertigstellung der Softwaretools für eine Safety-Scanning-Session  
Erstellung des Abschlussberichts (AP 1)

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

...

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Sträter, O., Osterland, J., Englisch, F., Freitag, D., Muxlhanga, H., Gentes, S., Kaiser, S., Röckel, P., Krauß, C. (2020) SIKOR - Sicherer und kosteneffektiver Rückbau. VDI Wissensforum, Rückbau konventioneller Kraftwerke und Industrieanlagen. VDI Düsseldorf.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9401B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften Institut für Technologie und Management im Baubetrieb 76131 Karlsruhe	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> SiKoR - Sicherer und kosteneffektiver Rückbau	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.11.2017 bis 31.10.2020	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 522.776,40 €
<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 Projektes ist, auf Basis von Risikobetrachtungen innovative Lösungen bzw. Unterstützungssysteme zur Optimierung der Rückbauplanung und -durchführung herzuleiten und Dritten zur Verfügung zu stellen. So wird z.B. durch Kombination der Risikoaspekte in der Projekt- und Prozessplanung mit den Mechanismen für eine gute menschliche Zuverlässigkeit eine robuste Planung der Prozesse erreicht. Die Teilziele des Vorhabens sind demgemäß:

- Planungsprozesse hinsichtlich Minimierung der technischen und menschlichen Risikobeiträge zu unterstützen
- Die Durchführung von Rückbauarbeiten hinsichtlich Minimierung der technischen und menschlichen Risikobeiträge zu unterstützen
- Empfehlung zur Integration dieser Erkenntnisse in das existierende Risikomanagement herzuleiten

Durch die präventiv ausgerichtete Unterstützung von Planungsprozessen und Arbeitsvorbereitungen mit zugehörigen Schnittstellen wird zusätzlich ein kosteneffektiver Rückbau unterstützt, indem Umplanungsaufwände bzw. Nacharbeiten minimiert werden.

Mit dem Vorhaben steht den deutschen Anlagen und deren Betreibern und Dienstleistern ein Verfahren und Instrument zur Verfügung, um Planungsaspekte im Rückbau zuverlässiger zu gestalten sowie Rückbauarbeiten zuverlässiger, sicherer und auch kosteneffizienter durchzuführen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm (KIT)

- AP 1: Kommunikation, Koordination, Dokumentation & Veröffentlichung
- AP 2.2: Zusammenstellung eines Verfahrenskatalogs
- AP 3.2: Erstellung eines Maschinenkatalogs
- AP 4.2: Technische Risikoidentifizierung
- AP 5: Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse
- AP 6: Validierung

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

**AP2.2:** Anpassung und Erweiterung des Verfahrenskatalogs durch Ergebnisse der Safety Scanning Session.

**AP 3.2:** Erweiterung des Maschinenkatalogs. Einarbeitung der fehlenden Information, die bei der Safety Scanning Session ermittelt wurden.

**AP5:** Erweiterung des Maschinenkatalogs nach den festgelegten Vorgaben aus dem Verfahrenskatalog. Anpassungen, die speziell für den Maschinenkatalog gelten. Darstellung und Suchfunktion in der Planungsunterstützung mit Projektpartner erarbeiten.

**AP6:** Durcharbeiten der Safety Scanning Session mit Bezug den Verfahrens- und Maschinenkatalog zu erweitern.

Teilnahme an der VDI-Fachkonferenz „Rückbau konventioneller Kraftwerke und Industrieanlagen“. Das KIT-TMB hat die A&O Kassel bei der Präsentation und der Fachausstellung unterstützt.

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

**AP2.2:** Fertigstellung des Verfahrenskatalogs.

**AP 3.2:** Fertigstellung Maschinenkatalog.

**AP 1:** Erstellung des Abschlussberichts.

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

keine

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

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9414A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (IIP)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbund: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) – Teilvorhaben: Methodische Konzeptionierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2019 bis 30.06.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 658.953,60 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Rebekka Volk	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> rebekka.volk@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Bereits abgeschlossene und noch laufende kerntechnische Rückbauprojekte weisen auch aufgrund von unzureichender Planung teilweise extreme Zeit- und Kostenabweichungen von der ursprünglichen Planung auf. Daher ist es das Ziel des Verbundvorhabens NukPlaRStoR, ein Planungswerkzeug zu entwickeln, das speziell auf die Bedürfnisse kerntechnischer Rückbauprojekte abgestimmt ist und die Planung wesentlich vereinfacht. Hierbei sollen alle wesentlichen Anforderungen zur kerntechnischen Rückbauplanung berücksichtigt und mit Hilfe mathematischer Methoden ein optimierender Planungsansatz entwickelt und implementiert werden.

Durch das zu entwickelnde Planungswerkzeug wird ein möglichst optimaler Plan (hinsichtlich der Kosten oder der Zeit und unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen) berechnet, der alle auszuführenden Arbeiten sowie alle während des Rückbaus anfallenden Stoffströme enthält. Ausgehend von den Stoffströmen wird mit Hilfe des Planungswerkzeugs eine logistische Planung (z.B. Transport und Bearbeitung innerhalb der Anlage, inkl. Konditionierung) sowie eine Behälterplanung inkl. Endlagerdokumentation ermöglicht. Des Weiteren soll das zu entwickelnde Planungswerkzeug mit anderen Programmen (bspw. REVK zur Reststoffverfolgung, Microsoft Project oder Oracle Primavera P6 EPPM zur Projektplanung) gekoppelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten im Verbundvorhaben besteht in der Entwicklung einer benutzerfreundlichen Oberfläche des Planungswerkzeugs.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt untergliedert sich in sieben Arbeitspakete (AP): Zunächst werden Daten aus bereits durchgeführten kerntechnischen und konventionellen Rückbauprojekten gesammelt und aufbereitet (AP1). Mit diesen Daten wird das Planungswerkzeug des abgeschlossenen Verbundvorhabens MogaMaR (Förderkennzeichen: 02S9113A; 15S9113A) getestet, um dessen Praxistauglichkeit nachzuweisen (AP2). Im Anschluss werden Weiterentwicklungen dieses Planungswerkzeugs vorgenommen, die jeweils mit den Daten getestet und validiert werden. Hierzu wird zunächst eine benutzerfreundliche Nutzeroberfläche erstellt (AP3), welche die Bedienung des Planungswerkzeugs ohne große Vorkenntnisse ermöglicht und Fehler bei der Verwendung verhindert. Das Planungswerkzeug wird mit Software gekoppelt, welche typischerweise beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt wird, allerdings den Plan nicht

optimiert (AP4). Dazu werden Schnittstellen zwischen dem Planungswerkzeug und solcher Software geschaffen. Je Vorgang wird bestimmt, welche und wie viele Stoffe zeitlich definiert bei dessen Ausführung anfallen (AP5). Hierzu werden die Stoffe in einer zuvor recherchierten und aufgestellten Klassifikation eingeordnet. Im Zuge der Abbildung von Stoffströmen im Planungswerkzeug wird eine logistische Planung zum Umgang mit den Stoffströmen entwickelt und implementiert. Dies umfasst eine Reststoff- und Abfallplanung und die dafür benötigten Produktkontrollmaßnahmen (AP6.1), die Planung von Logistik und Transport, Behandlung und Konditionierung (AP6.2), eine Behälterplanung (AP6.3) und die Erstellung einer Endlagerdokumentation (AP6.4). Außerdem wird das Planungswerkzeug um weitere Funktionen, wie zu berücksichtigende alternative Ausführungsmöglichkeiten (sog. Multi-Mode-Fall) (AP7.1), die Orte der Vorgangsausführung (AP7.2) sowie die Berücksichtigung von Verbrauchsressourcen (AP7.3) und Pufferlagern (AP7.4) erweitert.

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

Das KIT hat wie vorgesehen den Planungsalgorithmus der existierenden Projektablaufplanung für die Einbindung von Stoffströmen weiterentwickelt (AP5). Neben der methodischen Konzeptionierung des zugrundeliegenden Optimierungsmodells und -verfahrens lag der Schwerpunkt der Tätigkeit im Berichtszeitraum insbesondere auf der Entwicklung einer geeigneten Datenstruktur und entsprechender Programmierschnittstellen (AP4, AP5). Dabei wurde ein modularer Ansatz gewählt, sodass die bisher verfügbaren Datenstrukturen und Programmierschnittstellen weiterhin uneingeschränkt zur Verfügung stehen. In der aktuellen Version des Planungswerkzeugs (Version 2.0) bildet nun die Projektablaufplanung (d. h. das Planungswerkzeug aus dem MogaMaR-Projekt; Förderkennzeichen: 02S9113A; 15S9113A) das Basismodul und die Stoffstromplanung ein wahlweise aktivierbares Zusatzmodul.

Ausgangspunkt für die Stoffstromplanung (AP5) bildet die Zuweisung anfallender Reststoffe zu den einzelnen Vorgängen des Projekts. Für die Reststoffe können jeweils beliebige Stoffstrompfade vom Nutzer festgelegt werden. Daher wurde eine Literaturrecherche zu unterschiedlichen Klassifikationsmöglichkeiten durchgeführt. Ein Stoffstrompfad ist definiert als generische Folge von Stoffbehandlungsschritten und Pufferlagern, die dem Planungswerkzeug übergeben wird. Die Pufferlager werden im Optimiermodell als sogenannte kumulative Ressourcen abgebildet. Hierbei tangiert AP4 die in AP7.4 vorgesehene Einbindung von kumulativen Ressourcen, weshalb AP7.4 in den Berichtszeitraum vorgezogen wurde. Für kumulative Ressourcen können maximale Verfügbarkeiten festgelegt werden, die die begrenzten Pufferlagerkapazitäten beim kerntechnischen Rückbau abbilden (bspw. im Kontrollbereich oder Reaktorgebäude). Zudem können auch begrenzte Kapazitäten der Stoffbehandlungsschritte über das implementierte Konzept der erneuerbaren Ressourcen modelliert werden. Zusätzlich entwickelte Programmierschnittstellen (AP4) ermöglichen nun die Eingabe beliebiger Verzweigungen und Zyklen in Stoffstrompfaden. Das Planungswerkzeug berechnet nun einen optimierten Projektablaufplan, der zusätzlich zu bereits betrachteten Restriktionen (wie z.B. Vorrangbeziehungen, fixierte Vorgänge) die begrenzten Puffer- und Behandlungskapazitäten im Stoffstrombereich berücksichtigt. Das Planungswerkzeug und die Programmierschnittstellen wurden ausgiebig getestet und umfangreich in einem Handbuch dokumentiert. Zudem wurde der Multi-Mode-Fall (AP7.1) bearbeitet und für erneuerbare und nichterneuerbare Ressourcen implementiert.

Darüber hinaus hat das KIT parallel an Konzepten für AP6 (Weiterentwicklung: Logistik) gearbeitet, nachdem der assoziierte Projektpartner VPC GmbH entsprechende Anforderungen und Praxisdaten zur Verfügung stellte. Betrachtet wurden Problemstellungen bei der Einlagerung,

Auslagerung, Befüllung/Verguss sowie Umschichtung von Containern in Pufferlagern (tw. mit sehr starken Restriktionen) eines laufenden Rückbauprojekts. Dabei wurde das Ziel verfolgt, erstens die Lösbarkeit des Problems unter den gegebenen Rahmenbedingungen zu prüfen und zweitens die Containerbewegungen und den logistischen Aufwand zu minimieren. Die Erkenntnisse werden im kommenden Berichtszeitraum in AP6 aufgegriffen und vertieft.

Im vergangenen Berichtszeitraum wurden fünf Seminararbeiten und eine Bachelorarbeit zu verschiedenen aktuellen Themen des kerntechnischen Rückbaus sowie zu methodischen Problemstellungen des Operations Research betreut. Die studentischen Arbeiten trugen zum besseren Verständnis der Stoffströme im kerntechnischen Rückbau sowie zur Weiterentwicklung des Planungswerkzeugs bei.

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

Das KIT sieht entsprechend der Projektplanung eine Weiterarbeit an AP5 vor. Dazu werden zusätzliche Tests des Planungsalgorithmus für die Stoffstromplanung durchgeführt und basierend darauf Verbesserungen vorgenommen. Darüber hinaus ist eine Erweiterung des Modellumfangs geplant, sodass möglichst viele praktische Problemstellungen in Bezug auf die Stoffströme untersucht werden können (bspw. alternative Stoffströme). Daneben werden in den kommenden Monaten zusätzliche Programmierschnittstellen geschaffen, die während eines Optimierungsdurchlaufs Informationen zu aufgetretenen Schwierigkeiten strukturiert ausgeben. Dies erhöht die Benutzerfreundlichkeit bzgl. der Eingabedaten und der zu erwartenden Optimierungsergebnisse und Einstellungsmöglichkeiten im Lösungsalgorithmus.

Nach Abschluss des AP5 wird eine Fortführung der im Berichtszeitraum bereits aufgenommenen Arbeiten zu AP6 angestrebt. Im Rahmen eines Projekttreffens im zweiten Quartal 2021 sollen Anforderungen und Prioritäten für die einzelnen Weiterentwicklungen zur logistischen Planung ausgearbeitet werden. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern und ggf. weiteren Industrieunternehmen sollen auf diesem Gebiet weitere Expertenmeinungen eingeholt werden, die eine Auswahl der relevanten Problemstellungen unterstützen und ggf. auch weitere Praxisdaten zum Testen liefern können.

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

Das Verbundvorhaben baut auf dem abgeschlossenen Projekt „Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR; BMBF-gefördert; Förderkennzeichen: 02S9113A; 15S9113A)“ auf. Ähnliche Vorhaben, deren Ergebnisse genutzt werden könnten, sind dem Projektteam nicht bekannt. Teilweise könnten Ergebnisse des FORKA-Projekts „Automatisierte, rechnergestützte Verpackungsplanung zur Reduzierung der Massen und Volumina der Abfallgebinde für das Endlager Konrad“ (Förderkennzeichen: 15S9400) der Brenk Systemplanung GmbH genutzt werden.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Das aus dem im Verbundvorhaben entwickelten Planungswerkzeug hervorgegangene Softwareprodukt „openZELOS“ wurde vom Projektpartner RODIAS auf der anwendernahen Fachkonferenz ICOND 2020, vom 24. bis 26. November 2020, organisiert vom Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT), vorgestellt. Das Werkzeug wurde zwar für den kerntechnischen Rückbau entwickelt, kann aber für jede Art von Projektplanung eingesetzt werden. Eine weitere Vorstellung des Projektfortschritts an der KONTEC 2021 ist anvisiert. Eine wissenschaftliche Publikation ist in Vorbereitung bzw. wurde bereits beim European Journal of Operational Research eingereicht und befindet sich dort im Review-Prozess.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9414B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RODIAS GmbH (ehem. GiS Gesellschaft für integrierte Systemplanung mbH)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbund: Entwicklung eines benutzerfreundlichen kostenoptimierenden Planungswerkzeugs für kerntechnische Rückbauprojekte unter Berücksichtigung von Stoffströmen zur Ressourcenplanung (NukPlaRStoR) – Teilvorhaben: Benutzeroberfläche und Schnittstellen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> von 01.07.2019 bis 30.06.2022	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 205.681,04 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Oliver Wagner	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Oliver.wagner@rodias.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen rückt sowohl national als auch international in den Fokus der Energie- und Rückbauwirtschaft. Bereits abgeschlossene und noch laufende kerntechnische Rückbauprojekte weisen auch aufgrund von unzureichender Planung teilweise extreme Zeit- und Kostenabweichungen von der ursprünglichen Planung auf. Daher ist es das Ziel des Verbundvorhabens NukPlaRStoR, ein Planungswerkzeug zu entwickeln, das speziell auf die Bedürfnisse kerntechnischer Rückbauprojekte abgestimmt ist und die Planung wesentlich vereinfacht. Hierbei sollen alle wesentlichen Anforderungen zur kerntechnischen Rückbauplanung berücksichtigt und mit Hilfe mathematischer Methoden ein optimierender Planungsansatz entwickelt und implementiert werden.

Durch das zu entwickelnde Planungswerkzeug wird ein möglichst optimaler Plan (hinsichtlich der Kosten und unter Einhaltung der Sicherheitsbestimmungen) berechnet, der alle auszuführenden Arbeiten sowie alle während des Rückbaus anfallenden Stoffströme enthält. Ausgehend von den Stoffströmen wird mit Hilfe des Planungswerkzeugs eine logistische Planung (z.B. Transport und Bearbeitung innerhalb der Anlage, inkl. Konditionierung) sowie eine Behälterplanung inkl. Endlagerdokumentation ermöglicht. Des Weiteren soll das zu entwickelnde Planungswerkzeug mit anderen Programmen (bspw. zur Reststoffverfolgung) gekoppelt werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten im Verbundvorhaben besteht in der Entwicklung einer benutzerfreundlichen Oberfläche des Planungswerkzeugs.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt untergliedert sich in sieben Arbeitspakete (AP): Zunächst werden Daten aus bereits durchgeführten kerntechnischen und konventionellen Rückbauprojekten gesammelt und aufbereitet (AP 1). Mit Hilfe dieser Daten wird das Planungswerkzeug des abgeschlossenen Verbundvorhabens MogaMaR (Förderkennzeichen: 02S9113A und 15S9113A) getestet, um dessen Praxistauglichkeit nachzuweisen (AP 2). Nachdem der Nachweis erbracht wurde, werden Weiterentwicklungen dieses Planungswerkzeugs vorgenommen, die jeweils mit den Daten getestet und validiert werden. Hierzu wird zunächst eine benutzerfreundliche Nutzeroberfläche erstellt (AP 3), welche die Bedienung des Planungswerkzeugs ohne große Vorkenntnisse ermöglicht und Fehler bei der Verwendung verhindert. Das Planungswerkzeug wird mit Software gekoppelt, welche typischerweise beim Rückbau kerntechnischer Anlagen eingesetzt wird, allerdings den Plan nicht optimiert (AP 4). Dazu werden Schnittstellen zwischen dem Planungswerkzeug und solcher Software geschaffen. Je Vorgang wird bestimmt, welche und wie

viele Stoffe zeitlich definiert bei dessen Ausführung anfallen (AP 5). Hierzu werden die Stoffe in einer zuvor recherchierten und aufgestellten Klassifikation eingeordnet. Im Zuge der Abbildung von Stoffströmen im Planungswerkzeug wird eine logistische Planung zum Umgang mit den Stoffströmen entwickelt und implementiert. Dies umfasst eine Reststoff- und Abfallplanung und die dafür benötigten Produktkontrollmaßnahmen (AP 6.1), die Planung von Logistik und Transport, Behandlung und Konditionierung (AP 6.2), eine Behälterplanung (AP 6.3) und die Erstellung einer Endlagerdokumentation (AP 6.4). Außerdem wird das Planungswerkzeug um weitere Funktionen, wie zu berücksichtigende alternative Ausführungsmöglichkeiten (sog. Multi-Mode-Fall) (AP 7.1), die Orte der Vorgangsausführung (AP 7.2) sowie die Berücksichtigung von Verbrauchsressourcen (AP 7.3) und Pufferlagern (AP 7.4) erweitert.

### **3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zum Arbeitsprogramm)**

Die RODIAS hat das AP3 mit Abschluss der Implementierung einer Bedieneroberfläche, Testautomatisierung sowie der umfangreichen Testdurchführungen abgeschlossen.

Im Rahmen des AP4 hat die RODIAS die Entwicklung und Implementierung eines Adaptermodells zur Abbildung konkreter Schnittstellen zu bereits vorhandenen Planungssystemen erfolgreich abgeschlossen. Weiterhin wurde ein „Standard“-Adapter zum Datenaustausch mit der gängigen, nicht-optimierenden Projektplanungssoftware MS-Project implementiert.

Damit eine automatisierte Nutzung des Planungsalgorithmus zu definierten Zeitpunkten ohne Anwenderinteraktion möglich ist, wurde zusätzlich zu den vorgenannten, über die Bedieneroberfläche zugänglichen Schnittstellen eine entsprechende serverseitige Programmierschnittstelle (API) implementiert. Die im Rahmen des AP3 durchgeführten Tests haben im Ergebnis gezeigt, dass es zudem erforderlich ist, die Adapter für sehr große Datenmengen zu optimieren. Ein entsprechendes Konzept wurde ausgearbeitet und weitgehend fertiggestellt.

Zur Vorstellung des aus dem im Verbundvorhaben entwickelten Planungswerkzeug hervorgegangene Softwareprodukt „openZELOS“ auf der anwendernahen Fachkonferenz ICOND 2020 in Aachen (vgl. Kap. 6) wurde eine Produktversion 1 fertiggestellt.

Im Rahmen der Zuarbeit zu AP5 „Integration von Stoffströmen“ bemüht sich die RODIAS aktuell um Kontakt zu den Energieversorgern bzgl. der Durchführung von Expertengesprächen und der Bereitstellung von Praxisdaten zur Validierung der vom KIT entwickelten Modelle.

In AP6 ist auf Basis der Stoffströme (AP 4 und AP 5) eine Erstellung von Algorithmen zur Ablaufplanung (logistische Planung) geplant. In diesem Kontext ist die Anbindung von Abfall- bzw. Reststoffverfolgungssystemen (ReVK) sinnvoll, da diese i.d.R. über die notwendigen Basisinformationen (Standort-/Transportinformationen bzw. Behältnisinformationen) verfügen. Die RODIAS hat im Modell des RODIAS-eigenen ReVK Optimierungen vorgenommen, damit dieses in der Lage ist, die insbesondere für AP6.2/6.3 notwendigen Datenstrukturen, zur späteren Übertragung zum Planungsalgorithmus bereitzustellen.

Die im Rahmen des AP7 geplanten Tätigkeiten wurden begonnen; hier wurden insbesondere der Multi-Mode-Fall (7.1) sowie die Berücksichtigung nicht-erneuerbarer Ressourcen (7.3) implementiert und im Planungswerkzeug abgebildet.

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

Als Erweiterung des AP4 wird die RODIAS bis Ende Q1/2021 einen weiteren „Standard“-Adapter zum Datenaustausch mit der insbesondere im Rückbaumanagement gängigen, nicht-optimierenden Projektplanungssoftware Oracle Primavera P6 implementieren und das AP4 somit abschließen. Des Weiteren wird eine Fortführung der im Berichtszeitraum bereits

aufgenommenen Arbeiten zu AP5, AP6 und AP7 angestrebt. Konkret werden im Rahmen des AP5 die notwendigen Implementierungen zur Integration von Stoffströmen in den Planungsalgorithmus durchgeführt. Im Rahmen des AP6 werden die durch das KIT entwickelten Konzepte durch RODIAS als Software umgesetzt; dies steht für das kommende Projektjahr an. Die Auswertung von Expertengesprächen mit den Anwendern hat ergeben, dass die Erarbeitung eines Simulationsmodelles bzw. die Berechnung unterschiedlicher Szenarien eine sinnvolle Ergänzung der Planungssoftware darstellt und deren Benutzung weiter vereinfacht. Dieses soll als Erweiterung des AP7 untersucht und umgesetzt werden. Bzgl. der aktuellen grafischen Benutzeroberfläche sind zudem Optimierungen und Erweiterungen geplant.

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

Das Verbundvorhaben baut auf den Ergebnissen des bereits abgeschlossenen Forschungsprojekts „Modellentwicklung eines ganzheitlichen Projektmanagementsystems für kerntechnische Rückbauprojekte (MogaMaR; BMBF-gefördert; Förderkennzeichen: 02S9113A und 15S9113A; Laufzeit: 01/2014 bis 06/2022)“ auf. Ähnliche Vorhaben, deren Ergebnisse genutzt werden könnten, sind dem Projektteam nicht bekannt.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Die RODIAS hat das aus dem im Verbundvorhaben entwickelten Planungswerkzeug hervorgegangene Softwareprodukt „openZELOS“ auf der anwendernahen Fachkonferenz ICOND 2020, vom 24. bis 26. November 2020, organisiert vom Aachen Institute for Nuclear Training GmbH (AiNT), vorgestellt. Dort waren zahlreiche Vertreter der Branche zugegen. In einem aufgezeichneten halbstündigen Beitrag zu dem neuen Softwareprodukt sowie in einem Live-Forum wurden die wesentlichen Funktionsweisen des Planungswerkzeugs vorgestellt und Fragen beantwortet. Das Werkzeug wurde zwar für den kerntechnischen Rückbau entwickelt, kann aber für jede Art von Projektplanung eingesetzt werden. Eine weitere Vorstellung des Projektfortschritts an der KONTEC 2021 ist anvisiert. Eine wissenschaftliche Publikation durch den Projektpartner KIT ist in Vorbereitung bzw. wurde bereits beim European Journal of Operational Research eingereicht und befindet sich dort im Review-Prozess.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.07.2020 bis 31.01.2021	<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 28.02.2023	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.535.406,00 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Ralf Lanwehr	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> lanwehr.ralf@fh-swf.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

KernTrafo konzentriert sich auf drei Kern-Herausforderungen des Rückbaus von Kernkraftwerken: Die geringe Motivation der Mitarbeiter:innen, grundlegende Veränderungen der Anforderungen und ein gleichbleibender Personalstamm. KernTrafo adressiert diese Themen in der Projektkomponente 1 (PK1) durch einen innovativen Abgleich der vorhandenen Fähigkeiten der Mitarbeiter:innen mit neu auftretenden Anforderungen, in PK2 durch Führungskräfteentwicklung zur Bewältigung der Demotivation und in PK3 durch eine die Belegschaft einbindende Neuzusammenstellung von Aufgaben in den verschiedenen Phasen des Rückbaus. In PK1 wird Machine Learning verwendet, um Kompetenzcluster aus unstrukturierten Daten (interne Datenbanken) zu identifizieren, die beschreiben, welche Kompetenzen derzeit im Demontageprozess notwendig sind. So kann in verschiedenen Projektphasen festgestellt werden, welche Kompetenzen entscheidend zum Rückbau beitragen und gegebenenfalls erweitert werden müssen. In PK2 werden Führungskräfte in einem innovativen Führungsstil geschult – Paradoxe Führung. Der Kern paradoxer Führung ist der Umgang mit Spannungen zwischen gegensätzlichen, aber ebenso erstrebenswerten Zielen wie Innovation versus Effizienz. Im Mittelpunkt steht dabei der sinnvolle Umgang mit Spannungen: Der Rückbau von Kernkraftwerken erfordert die Erkundung neuer Welten, ohne sicherheitsrelevante Aspekte der alten zu vernachlässigen. In PK3 werden Mitarbeiter:innen und Führungskräfte in Job Crafting trainiert. Die Mitarbeiter:innen re-designen ihre Arbeit, um die Anpassung an ihre Bedürfnisse, Präferenzen und Fähigkeiten zu erhöhen. Dieser mitarbeitergetriebene Veränderungsansatz erhöht die Veränderungsbereitschaft und die Motivation für den Rückbau der Kernkraftwerke. Der Einsatz dieser innovativen und dynamischen Personalführungsinstrumente wird erprobt und die Anwendbarkeit für den besonderen Kontext des sicherheitssensiblen, neuartigen und sich ändernden Rückbaus von Kernkraftwerken getestet.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### PK1 besteht aus drei 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

### PK2 besteht aus drei Hauptphasen:

1. Evaluation der aktuellen Führungskultur und Leistungsbereitschaft Organisation
2. Entwicklung und Pilotierung eines Trainingskonzeptes für paradoxe Führung und Schulung der Führungskräfte in paradoxer Führung

3. Evaluation der Trainingsergebnisse und Vergleich zum in Phase 1 erhobenen Status Quo  
PK3 besteht aus drei Hauptphasen:

1. Evaluation von Work Engagement, Stress sowie Arbeitszufriedenheit
2. Entwicklung und Durchführung eines Job Crafting-Konzepts für Mitarbeiter:innen
3. Evaluation der Trainingsergebnisse sowie Vergleich des aktuellen Work Engagements, Stresses und Arbeitszufriedenheit mit dem erhobenen Status Quo aus Phase 1

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

#### Meilensteinplanung: Administration

Die zweite Jahreshälfte 2020 war geprägt von der Initiierung der Zusammenarbeit mit dem neuen Projektpartner RWE Nuclear GmbH. Die Zusammenarbeit mit dem ursprünglichen Projektpartner Vattenfall wurde am 25. September 2020 einvernehmlich beendet, da sich deren Kraftwerke derzeit schon mitten im Rückbauprozess befinden und somit das Projekt KernTrafo als nicht mehr geeignet erachtet wurde. Wie im letzten Zwischenbericht erläutert, wurde das Projekt KernTrafo am 24. Juni 2020 erstmals bei der RWE Nuclear GmbH vorgestellt und folglich die Zusammenarbeit am 3. August 2020 offiziell beschlossen. Direkt im Anschluss ist ein Projektteam zusammengestellt worden, welches sowohl aus Mitarbeitenden der FH Südwestfalen als auch der RWE Nuclear bestand. Gemeinsam wurden eine Geheimhaltungsvereinbarung, ein Zusammenarbeitsvertrag und ein Datenschutzkonzept erarbeitet, um so die Grundlagen für die gemeinsame Arbeit zu schaffen.

Das Projekt KernTrafo ist am 8. Oktober 2020 dem gesamten Leitungsteam der RWE Nuclear vorgestellt worden, um die Auswahl des beteiligten Kraftwerks zu ermöglichen. Daraufhin wurden vorbereitende Tätigkeiten mit Biblis und Gundremmingen aufgenommen. Der Fokus des KernTrafo Projekts wird jedoch in Biblis liegen. Gundremmingen und die weiteren Kraftwerke der RWE Nuclear werden in sämtliche Konzeptionsprozesse miteingebunden, um einen späteren, eigenständigen Roll-out des Projekts an allen Standorten zu erleichtern. Zur Initiierung des Projektes sind die Personalabteilungen aus Essen, Biblis und Gundremmingen inklusive der Kraftwerksleiter und der Geschäftsführung in die weitere Ausgestaltung miteinbezogen worden. Momentan laufen die letzten Arbeiten an den Verträgen, die kurz vor dem Abschluss stehen. Weiter wurde ein vorläufiger Zeitplan erarbeitet.

#### Komponente 1: KI-basierte Kompetenzmodellierung

Die Zusammenarbeit zwischen dem Data-Science Team und der RWE Nuclear wurde erfolgreich etabliert. In erster Instanz stehen die Lokalisierung und die Zugänglichmachung bestehender Datenbasen im Vordergrund. Dieses umfasst die Erarbeitung eines umfassenden Datenschutzkonzeptes und die Konzeptionierung des Umgangs mit hochsensiblen Daten. Hierzu steht das Data Science Team mit den Datenschutz- und IT Sicherheitsbeauftragten im Austausch. Ein erster Datenworkshop wurde am 22.09.2020 durchgeführt. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Lokalisierung bestehender Datenbasen (unternehmensübergreifend)
- Identifikation isolierter Datenquellen: Kernkraftwerke unterliegen einer autarken Führungshierarchie und entwickeln somit standortabhängig bedarfsgerechte IT-Lösungen
- Erste Bewertung der Datenquellen hinsichtlich folgender Aspekte:
  - Vollständigkeit
  - Integrität
  - Struktur
  - Standardisierung

- Verfügbarkeit
- Extraktionsaufwand
- Konzeption zur Datenchiffrierung und Datenanonymisierung

Seitens der FH Südwestfalen wurden Module programmiert, welche die bereits absehbare Schiefe in der Verteilung der Datenmengen (hinsichtlich Geschlecht, Kenntnisse etc.) abfedern und ausgleichen sollen. Darüber hinaus erfolgten erste Konzeptionierungen und Implementierungen zur Aufnahme von Daten über Abfragemasken. Um der RWE Nuclear die Möglichkeit zu bieten, nicht nur Skills innerhalb der eigenen Organisation zu matchen, sondern auch individuelle Weiterbildungspläne mit Hilfe der Software entwickeln zu können, wurde der Zugriff auf die Ontologie-Datenbank der People Forecast GmbH ermöglicht. Darüber hinaus erfolgte eine Datensammlung aus externen Quellen zur Identifikation von derzeit gesuchten Skills und zur Analyse von Trends.

Es wurde beschlossen, die Data-Science Komponente in der Abteilung U (Unterstützung) des Kraftwerks Biblis zu pilotieren. Daher fand am 22. Januar 2021 ein gemeinsamer Konzeptionsworkshop mit dem Leiter der Abteilung statt, in dem die genaue Funktionalität der Software ausgearbeitet wurde. Wir gehen davon aus, dass die Datenerhebung im Februar 2021 beginnen kann. Der Betriebsrat des Kraftwerks Biblis wird aktuell über das Projekt informiert und in die Konzeption miteingebunden. Bisher ist jedoch nicht absehbar, ob der Mitbestimmungsprozess den Kick-off verzögern wird. Zum anderen befasste sich das Data-Science-Team mit dem Thema "Die geschlechtsspezifische Voreingenommenheit". Die deutschen Worteinbettungen, die sogar in Google und Stanford News-Artikeln geschult wurden, zeigen ein beunruhigendes Maß an weiblichen sowie männlichen Geschlechterstereotypen. Geometrisch wird zunächst gezeigt, dass die geschlechtsspezifische Verzerrung durch eine Richtung in der Worteinbettung erfasst wird. Es wurden auch zwei Algorithmen entwickelt, um geschlechtsspezifische Verzerrungen zu identifizieren und zu reduzieren. Das Data Science-Team beabsichtigt, die Algorithmen zu veröffentlichen.

#### Komponente 2: Paradoxe Führungsstile

Auch in der PK2 wurde die Zusammenarbeit erfolgreich gestartet. Um das Projekt an die speziellen Anforderungen der Kraftwerke der RWE Nuclear GmbH anzupassen, wurde am 17. Dezember 2020 ein digitaler Konzeptionsworkshop mit vier RWE Mitarbeiter:innen durchgeführt. Das darin entwickelte Führungskräftetraining wurde den Leitern der Kraftwerke Biblis und Gundremmingen vorgestellt und fand deren Zustimmung. Die Trainingstermine wurden in den Projektplan für den Rückbau des Kraftwerkes Biblis integriert. Das Training wird sich aus drei zweitägigen Modulen zusammensetzen. Zwischen den Präsenzterminen gibt es jeweils eine achtwöchige Transferphase. Das erste Führungskräftetraining startet planmäßig im März 2021.

#### Komponente 3: Job Crafting

Die Projektkomponente 3 wird auf Wunsch der RWE Nuclear zunächst zurückgestellt, da sich der Bedarf erst im späteren Projektverlauf ergeben wird. Es wurde bereits mit der Geschäftsführung, der Kraftwerksleitung und dem Projektteam geklärt, dass diese Komponente trotz der zeitlichen Verzögerung von großer Wichtigkeit für den Erfolg des Rückbauprozesses ist. Sobald PK1 und PK2 weiter vorangeschritten sind, wird der Plan für PK3 entwickelt.

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

Wie oben bereits erwähnt wird im kommenden Halbjahr mit der vorbereiteten Umsetzung der PK1 und PK2 begonnen. Die PK3 wird ab April 2021 neu konzipiert und in den weiteren Zeitplan aufgenommen.

#### Weitere Aktivitäten

Der Antrag zum Gamification-Ansatz wurde zwar genehmigt, dennoch zeigte sich in der Zusammenarbeit mit RWE Nuclear, dass Präsenztrainings den virtuellen Trainings erst einmal vorgezogen werden, solange es die Corona-Vorschriften zulassen. Deshalb wird die Planung von Gamification-Komponenten vorerst zurückgestellt.

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

- Keine

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

- Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9426A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Ruhr Universität Bochum – Fakultät für Psychologie	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Verbundprojekt: Die Kompetenzen von Führungskräften und Mitarbeiter/innen für den Rückbau stärken (Rückbaukompetenzen)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2020 bis 30.09.2032	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 722.252,15 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Lisa Thomaschewski	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Lisa.Thomaschewski@rub.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, der Gesellschaft für Simulatorschulung und PreussenElektra 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 PreussenElektra 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 PreussenElektra, 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 PreussenElektra 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 PreussenElektra, ergänzt durch multimodale Mixed Reality Anwendungen inkl. der Microlearning-Module zur Transfersicherung
  - AP9: Pilotdurchführung der seminar-basierten Trainingsmaßnahmen für die Führungskräfte der PreussenElektra, 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 wurde mit Projektphase 1) Soll-/ Ist-Analyse begonnen, indem vorbereitende Arbeiten in Hinblick auf die avisierten Interviews mit Führungskräften (AP1) sowie Mitarbeiter/innen (AP2) durchgeführt wurden. Dazu gehörten zahlreiche Gespräche mit den Projektpartnern i.S. einer Kontextanalyse und dem Aufbau eines konformen Rollen- und Aufgabenverständnisses aller beteiligten Verbundpartner/innen. Der Steuerungskreis (bestehend aus Vertreter/Innen der Ruhr-Universität Bochum, der Gesellschaft für Simulatorschulung und der PresussenElektra) hat sich im Berichtszeitraum i.S. eines Projekt Kick-Offs einmal persönlich sowie i.S. eines Jour Fixe bereits weitere zwei Male (virtuell) getroffen, zwecks fine tuning und monitoring des laufenden Projektes. Der Jour Fixe findet im Abstand von 4 Wochen wiederkehrend statt. Darüber hinaus wurden bereits sieben „Expertengespräche“ mit rückbauerfahrenen Führungskräften und Mitarbeitern geführt und teilweise transkribiert. Die Ergebnisse dienen der Entwicklung der durchzuführenden Interviews (AP1 & 2). Außerdem wurde parallel mit der Sichtung der auszuwertenden Dokumente begonnen (AP3). Ergebnisse liegen zu diesem Zeitpunkt noch nicht vor. Weiterhin fand im Dezember ein Treffen der Projektleitung und der GfS im Simulatorzentrum Essen statt, in dessen Rahmen der Projektleiterin das dort entwickelte HPO Training vorgestellt wurde.

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

Die geplante Weiterarbeit orientiert sich an oben dargelegtem Arbeitsprogramm. Für den nächsten Berichtszeitraum (01/21 – 06/21) sind die Abschlüsse der AP1 & 2 sowie die Weiterbearbeitung von AP3 avisiert.

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

Keine

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

Am 29.10.2020 wurde das Projekt durch Frau Prof. Dr. Kluge auf der 270. Sitzung des RSK-Ausschuss REAKTORBETRIEB (RB) vorgestellt.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.10.2020 bis 31.12.2020	<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

Es werden Schulungs- und Trainingseinheiten für die beiden Zielgruppen (Führungskräfte und Mitarbeiter/innen) in Form von Microlearning-Lerneinheiten im quelloffenen Kursmanagementsystem Moodle für die geplanten Management Level und betriebsfertige, kompilierte Mixed Reality Lerneinheiten für Mitarbeiter/innen aus dem operativen Umfeld mit verschiedenen Qualifikationen bereitgestellt.

Die im Projekt erarbeiteten Quelldateien dienen im Folgenden als Basis für Customizing wie standortspezifische Anpassungen und Internationalisierung. Dazu passend werden Handlungsempfehlungen für die Einrichtung der Mixed Reality Hard- und Software und das gewünschte Customizing erstellt.

## 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: Seminar-basierte Trainingsmaßnahmen Mitarbeiter PEL, ergänzt d. multimodale Mixed Reality Anwendungen (10x2 Tage) Trainings mit jeweils 12 Teilnehmer/innen) inkl. Microlearning-Module zur Transfersicherung.

AP 9: Pilotdurchführung (4x 2 Tage) Führungskräfte PEL.

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)**

Im Berichtszeitraum wurde mit der Phase 1 begonnen (AP 1 bis AP 3). Im AP 1 wurden Vorbereitungen zu den einzelnen Interviews getätigt. Diese Tätigkeit wurde ausschließlich von den Projektpartnern durchgeführt. Die GfS war nur beratend tätig. So fand im Dezember ein Treffen mit der Projektleitung der Ruhr Universität Bochum statt, in dessen Rahmen das von der GfS entwickelte HPO Training vorgestellt wurde.

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

Die geplante Weiterarbeit umfasst die Fortführung der Phase 1 (AP 1 bis AP 3). Hierbei wird die GfS weiterhin beratend tätig sein und aufgrund des Wissens und der Erfahrung mit der Kernenergiebranche und dem Rückbau der Anlagen die Ergebnisse der Phase 1 evaluieren.

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

Das Projekt hat Bezug zu den bereits vorhandenen Trainings im Bereich Human Factors und des Professionellen Handeln. 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)