

## Fortschrittsbericht

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

Berichtszeitraum  
1. Januar - 30. Juni 2025

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

## Fortschrittsbericht

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

Berichtszeitraum  
1. Januar - 30. Juni 2025

Gefördert durch:



## **Vorwort**

*„Mit der Abschaltung der letzten drei deutschen Kernkraftwerke am 15. April 2023 ist der Ausstieg Deutschlands aus der Stromerzeugung durch Kernenergie vollzogen. Die außer Dienst gestellten Anlagen müssen nun sicher, verantwortungsvoll und umweltverträglich stillgelegt, rückgebaut und die dabei anfallenden Abfälle entsorgt werden.“*

(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 Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) durch die Entwicklung und Optimierung technologischer Lösungen und durch die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses die Bewältigung der anstehenden Aufgaben.

Im Auftrag des BMFTR 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 (<https://www.grs.de/de/projekttraeger/rueckbau>) öffentlich verfügbar. Auf Fortschrittsberichte aus früheren Jahren kann über die Webseite des Projektträgers Karlsruhe (<http://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/wte/287.php>) zugegriffen werden.

Die inhaltliche Gliederung der Berichtssammlung orientiert sich an den fachlichen Schwerpunkten des Förderkonzeptes FORKA (Bekanntmachung der Förderrichtlinie zum Förderkonzept FORKA von 2023). Die Anordnung der Berichte innerhalb der fachlichen Schwerpunkte erfolgt nach aufsteigenden Förderkennzeichen

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

Förderkennzeichen	Themenbereich	Seite
01.	<b>Zerlege- und Dekontaminationsverfahren</b>	
15S9435A	VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe) TP: Entwicklung eines innovativen Verfahrens für die Erstellung eines BIM-Modells für die zu bearbeitenden Räumlichkeiten einschließlich der Integration von Störstellen	8
15S9435B	VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe) TP: Praxisversuche und praxisorientierte Beratung bei Anwendung des BIM-Modells für Planung und Durchführung der Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessung	11
15S9439A	VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Prototypbau einer autonomen Anlage zur Dekontamination und radiologischen Messung	14
15S9439B	VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Autonome Laserablation und radiologische Vormessung	18
15S9440A	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	23
15S9440B	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Durchführung experimenteller Versuche und Auswertung der Versuchsmuster	26
15S9440C	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Detaillierung und Ausgestaltung der Versuchsmuster samt Einhausung mit Absaugung	29
15S9440D	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Praxisversuche und Verifizierung	32
15S9449A	VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Prozessautomatisierung"	36
15S9449B	VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Prozessoptimierung	39
15S9449C	VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Inverterstromquelle"	42
15S9450A	VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung eines Laserablationsprozesses zur effektiven Zerstörung von Oberflächenschichten	46
15S9450B	VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung eines Demonstrators zur Laserablation	48

<b>02.</b>	<b>Freigabeverfahren und konventionelle Entsorgungswege</b>	
15S9444A	VP: Entwicklung eines Beprobungssystems inklusive qualitätsgesichertem Beprobungsverfahren für nicht zugängliche Bereiche (BERO) TP: Aufbau eines Versuchstandes und Untersuchungen zu möglichen Beprobungs- und Ausbauoptionen von Rohrleitungen inkl. Entwicklung eines qualitätsgesichertem Beprobungsverfahrens	50
15S9444B	VP: Entwicklung eines Beprobungssystems inklusive qualitätsgesichertem Beprobungsverfahren für nicht zugängliche Bereich (BERO) TP: Konstruktion und Herstellung eines innovativen Trägersystems inkl. Beprobungs- und Ausbaukopf für Rohrleitungen in nicht zugänglichen Bereichen	52
15S9447A	VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE) TP: Berechnungen Aktivitätsverteilung in reaktorfernen Räumen auf Basis von der Neutronenfluenzrechnungen und Experimenten	56
15S9447B	VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE) TP: Experimentelle Aktivierung und Benchmarkexperimente zur Validierung von Aktivierungsberechnungen und Untersuchung zur Aktivierbarkeit von Kernkraftwerksstrukturen	59
15S9447C	VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE) TP: Probenahme und Bewertung	62
15S9451A	VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Systemkonzept, Test, Optimierung, Validierung und Transfer (ZfP-Rückbau)	64
15S9451B	VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Innovative bildgebende Verfahren für die Ultraschalltomographie	67
15S9451C	VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Innovatives Prüfsystem für die Ultraschalltomographie an massiven Betonbauwerken	70
<b>03.</b>	<b>Behandlung radioaktiver Abfälle</b>	
15S9433A	VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling) TP: Weiterentwicklung u. Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Fraktionierung des Anodengases	73
15S9433B	VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling) TP: Weiterentwicklung des Verfahrens zur totzeitarmen C-14 Bestimmung mittels Flüssigszintillation und Untersuchungen zur Freimessung von C-14-Rückständen n. elektrochemischer Behandlung	75
15S9433C	VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling) TP: Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Isotopentrennung zur Rückgewinnung von C14	77
15S9441	Konditionierung von mittelaktiven (ILW) Ionentauscherabfällen aus der Chemischen System Dekontamination (SRT Ionentauscherabfälle)	79
15S9442	Charakterisierung und Dekontamination von i-Grafiten (i-GraDe)	81

<b>04</b>	<b>Abfalldeklaration und Zwischenlagerung</b>	
15S9436A	VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO) TP: Koordination und Erstellung der BIM Modelle	85
15S9436B	VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO) TP: BIM, Game-Engine, optimierte Verpackungsplanung und FLUKA Simulation	88
15S9436C	VP Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO) TP: Datenbank	91
15S9443	Aus- und Weiterbildung sowie Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen und Abfallprodukten aus Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen (EducTUM)	94
15S9446A	VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Konzeption, Bau des Demonstrators und Durchführung von Test- und Praxisphase	97
15S9446B	VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Untersuchung und Bewertung der Eignung verschiedener ZfP-Verfahren, sowie Hard- und softwaremäßige Unterstützung bei der Integration von ZfP-Verfahren in den Demonstrator	100
15S9446C	VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Planung und Projektberatung, sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	103
<b>05.</b>	<b>Umwelt- und Strahlenschutz</b>	
15S9437A	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadose Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Einfluss von natürlichen nanopartikulären Phasen auf die Radionuklidverteilung im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze	106
15S9437B	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadose Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Remobilisierung von Radionukliden [...], Charakterisierung mikrobieller Diversität im Boden und die Beeinflussung durch Radionuklide und Wurzelexsudate	109
15S9437C	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadose Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den RN-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen	113
15S9437D	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadose Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Radioökologische Modellierung	117
15S9437E	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadose Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Geochemische Modellierung der in den Teilprojekten A und B untersuchten Systeme	121
15S9445A	VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Dendroanalyse, Bildung organische Bodensubstanz, Mykorrhizosphärenprozesse, (kolloidaler) Schwermetall/Radionuklid-Austrag & Drohnenbefliegungen	123
15S9445B	VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Entwicklung von Verfahren zur gezielten Vitalisierung des Wismut-Sanierungswaldes mittels Bodenmikroorganismen und Prüfung minimalinvasiver Biomonitoring-Methoden	126

15S9445C	VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Wirtschaftliche Begleitung und Bewertung	129
<b>06.</b>	<b>Mensch und Organisation</b>	
15S9448A	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Innovation in der Kerntechnik: Stärkung der nuklearen Sicherheit durch digitalisierte und bildungsorientierte Ansätze	131
15S9448B	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Plattformen zum Lernen, Genehmigungsverfahren, Strahlenschutz und K1-gestützter Prozessführung im behördlichen Umfeld	135
15S9448C	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Plattform inkl. K1-gestützter Prozessführung und Schulungsinhalte für sicherheitssensitive Genehmigungsverfahren	138
15S9448D	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Safeguards sowie Partitioning	142
15S9448E	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Kapazitätsaufbau durch virtuell erweitertes Training und Entwicklung einer Wissensgemeinschaft	144
15S9448F	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Modernste Lernkonzepte und Didaktiken für nachhaltigen Kompetenzerhalt und Aufbau mit dem Competence.hub	149
15S9448G	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Transformation im Strahlenschutz: Effizienzsteigerung durch int. Softwarelösungen	152
15S9452A	VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: KI-Entwicklung und Modellierung	156
15S9452B	VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Datenqualität und Community-Management	161
15S9452C	VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Intelligentes Tutoring und Human Performances	164
15S9453A	VP: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung einer KI-gestützten Applikation für automatisierte Lizensierungprozesse	166
15S9453B	VP: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung von KI-Sicherheitskomponenten für auditierbare KI-Modelle	171

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9435A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)	
<b>Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe) TP: Entwicklung eines innovativen Verfahrens für die Erstellung eines BIM-Modells für die zu bearbeitenden Räumlichkeiten einschließlich der Integration von Störstellen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 448.297,58 € (inkl. Projektpauschale)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing Sascha Gentes	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> sascha.gentes@kit.edu

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

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

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

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

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

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

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

**AP6 (Visualisierung und Datenübergabe):** Validierung der Visualisierung von Störstellen im Modell und geeignete Datenübergabe

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

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

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

Die bisher durchgeführten Arbeiten verliefen in enger Kooperation mit **RWE**. In dem angegebenen Berichtszeitraum fanden regelmäßige Online-Projekttreffen statt. Aktuell arbeitet **KIT** an **AP6**. Daneben wird im Rahmen erster Abstimmungen zwischen **KIT** und **RWE** sowie der Planung einer Messkampagne in der Anlage Mülheim-Kärlich das **AP8** vorbereitet.

#### AP4: Software-Entwicklung

##### 3.1 Störstellenextraktion

Für die Extraktion der sichtbaren Störstellen aus der Punktfolge wurde eine KI mit entsprechenden Trainingsdaten auf Grundlage der Datenerfassungen im **AP2** trainiert. Die zu extrahierenden Objektklassen wurden in Abstimmung mit **RWE** festgelegt (siehe Abbildung 1). Basierend auf Tests und Genauigkeitsuntersuchungen der Objekterkennung wurde eine Erweiterung des Trainingsdatensatzes durchgeführt, um die Erkennungsraten zu verbessern.

Normalisierte Konfusionsmatrix					
Vorhergesagte Klassen	Stahlträger	0.84	0.03	0	0.05
	Öffnungen	0.02	0.87	0.01	0
	Rohröffnungen	0	0	0.91	0
	Ankerplatten	0	0.03	0	0.53
	Hintergrund	0.13	0.07	0.08	0.42
		Stahlträger	Öffnungen	Rohröffnungen	Ankerplatten
Wahre Klassen					

Abbildung 1: Spaltenweise normalisierte Konfusionsmatrix der Störstellenerkennung

Abbildung 1 zeigt die Konfusionsmatrix der Störstellenerkennung. Mit dieser Matrix kann die Güte eines Modells bewertet werden. Entlang der Diagonalen werden die korrekten Vorhersagen des Modells repräsentiert. Werte entlang der Zeile „Hintergrund“ geben die nicht erkannten Anteile der jeweiligen Klasse wieder. In dieser Matrix zeigt sich, dass die (Rohr-)Öffnungen sowie Stahlträger von dem System sehr gut detektiert werden. Die geringen Werte außerhalb der Diagonalen beschreiben eine geringe Verwechslung der Objekte untereinander. Die Schwächen des Modells und der Daten werden bei der Klasse der Ankerplatten sichtbar. Etwa die Hälfte der Ankerplatten wird vom Modell erkannt. Die andere Hälfte der Ankerplatten wird nicht detektiert bzw. als Hintergrund klassifiziert. Die Ergebnisse bestätigen somit, dass zur zuverlässigen Erfassung der Ankerplatten die Informationen der Wärmebilder hinzugezogen werden müssen.

Für die Extraktion der Ankerplatten aus den Wärmebildern wurden sowohl klassische Bildverarbeitungsalgorithmen als auch ein neuronales Netz kombiniert, um die Ankerplatten zuverlässig in den Wärmebildern zu detektieren. Die Detektion zeigt hervorragende Ergebnisse auch bei schwankenden Helligkeitsverhältnissen und geringen Kontrasten.

Die Fertigstellung der Technologien zur Extraktion der Störstellen aus den erfassten Daten entsprach dem 2. Meilenstein des Projekts und wurde im März 2025 erreicht.

#### AP5: Modellintegration der Störstellen

### **3.2 Untersuchungen zur automatisierten Integration der Störstellen in das BIM-Modell**

Im **AP5** wurden bereits im letzten Jahr erste Untersuchungen zur automatisierten Integration von mit klassischer Bildverarbeitung detektierten sichtbaren Störstellen in das im AP3 manuell erstellte BIM-Modell mittels Programmierung in Dynamo durchgeführt. In den letzten Monaten wurden die Ergebnisse der Objekterkennung in Punktwolke und Wärmebildern aufbereitet und deren automatisierte Integration in das BIM-Modell untersucht.

#### AP6: Visualisierung und Datenübergabe

### **3.3 Aufbereitung der Daten zur Visualisierung und Datenübergabe**

Im Rahmen des **AP6** werden die Ergebnisse der Objekterkennung aufbereitet, so dass die detektierten Objekte mit allen Informationen in die bei **RWE** bestehende Datenbankstruktur eingegliedert und entsprechend visualisiert werden können. In Abstimmungsterminen mit **RWE** im Dezember 2024 sowie im Januar und März 2025 wurden die Anforderungen konkretisiert und offene Fragen besprochen. Wichtige Punkte der Übergabe waren:

- Tabellarische Auflistung der Gebäudeflächen inklusive aller extrahierten Störstellen im Format der Software PUG<sup>3</sup> von Brenk Systemplanung, auf deren Grundlage aktuell durch RWE die Planung der Freimeßungen erfolgt.
- Nummerierung der Räume/Flächen/Störstellen in dem mit RWE festgelegten Schema
- Berechnung zusätzlich erforderlicher Informationen und Parameter aus den Daten
- Visualisierung der Gebäudeflächen durch zweidimensionale Schnittbilder aus dem BIM-Modell im CAD-Format

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

In der verbleibenden Projektlaufzeit erfolgt die Fertigstellung von **AP6** sowie die Arbeiten zu **AP8**. Hierfür ist Anfang Juli eine Messkampagne zur unabhängigen Datenerfassung und Auswertung von Räumlichkeiten in der Anlage Mülheim-Kärlich geplant.

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

Keine

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

Kurzvorstellung auf TMB-Homepage: [www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte\\_7280.php](http://www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte_7280.php)  
Angenommenes Abstract für einen Kurzvortrag bei der KONTEC, Dresden, 2025

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9435B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWE Nuclear GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Visualisierung von Störstellen für Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen mit Hilfe von BIM (ViSDeMe) TP: Praxisversuche und praxisorientierte Beratung bei Anwendung des BIM-Modells für Planung und Durchführung der Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 77.852,40 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Stephan Schilp	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> stephan.schilp@rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

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

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

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

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

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

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

**AP6 (Visualisierung und Datenübergabe):** Validierung der Visualisierung von Störstellen im Modell und geeignete Datenübergabe

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

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

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

#### **3.1 Abschluss der Arbeiten zur Datenübergabe (AP6)**

Es wurde in Abstimmung ein Konzept erarbeitet, wie alle relevanten Informationen in das BIM-Modell integriert werden können. Ziel ist die Übernahme von benötigten Daten für die Arbeitsplanung zur Dekontamination oder Messplanung. Hierzu sollten die Daten je Objekt (z. B. je Wand) übernommen werden können. In der Folge der Abstimmung der Datenübergabe im Rahmen des AP6 wurde die Aufbereitung der Daten und Visualisierungen für die Übergabe von KIT an RWE getestet. Dafür wurden mehrere Abstimmungstermine mit KIT durchgeführt, in der die Anforderungen an die zu übergebenden Daten geklärt wurden.

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

Für Arbeitspaket 7 (AP7) ist die Entwicklung eines Konzepts zur Planung der Dekontaminationsarbeiten und Entscheidungsmessungen auf Basis des integrierten BIM-Modells erarbeitet worden, da dadurch mehrere wesentliche Vorteile erzielt werden. Ein solches Konzept ermöglicht eine strukturierte und präzise Planung, bei der alle relevanten Daten aus der Raumdatenerfassung, wie z. B. die Lokalisierung von Störstellen (z. B. Ankerplatten) oder geometrische Informationen, im BIM-Modell integriert und visualisiert werden. Dies verbessert die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Prozesse, und hilft, Zeit und Ressourcen zu sparen. Es reduziert potenziell die Strahlenbelastung des Personals durch gezielten Einsatz modernster Technologien und Werkzeuge. Zudem schafft es eine Grundlage für effizientere Entscheidungsfindungen während der Rückbauarbeiten und eine bessere Dokumentation für Genehmigungsbehörden.

#### **3.3 Erstellung des Konzepts für die Arbeiten im Berichtszeitraum (AP7)**

Die Konzeptvorlage stellt eine systematische Raumdatenerfassung als entscheidenden Schritt im Rückbau kerntechnischer Anlagen vor. Sie basiert auf Erkenntnissen zahlreicher Forschungsprojekte, insbesondere des ViSDeMe-Projekts zur Visualisierung von Störstellen mithilfe von BIM (Building Information Modeling). Moderne Technologien wie Laserscanning, Thermografie, Ultraschallmessungen und Radarsensoren werden eingesetzt, um präzise räumliche Daten zu erheben und problematische Strukturen, z. B. Ankerplatten, sichtbar zu machen. Die Integration dieser Daten in BIM-Modelle verbessert die Effizienz und Sicherheit der Rückbauprozesse. Aktive Thermografie hat sich dabei als favorisierte Methode zur Detektion verdeckter Strukturen erwiesen. Ergänzend fördern KI und Robotik eine automatisierte Analyse und die Minimierung von Gefahren für das Personal. Die Vorlage bietet einen innovativen Ausgangspunkt, der flexibel auf projektspezifische Anforderungen anpassbar ist.

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

Die **RWE** hat die Arbeiten an **AP7** nahezu abgeschlossen. Die Thermografieaufnahmen wurden unter verschiedenen Bedingungen getestet, um die optimalen Parameter für die Detektion der Ankerplatten zu bestimmen. Dabei wurden unterschiedliche Kamerawinkel, Entfernung und Erwärmungszeiten getestet.

Diese Erkenntnisse werden bei Bedarf in das AP7 und das erstellte Konzept zur Entwicklung einer Planung für Dekontamination und Entscheidungsmessungen einfließen. Hierzu werden die Erfahrungen und Lessons Learned aus früheren Arbeiten um die neuen Erkenntnisse aus ViSDeMe angereichert.

Der Fokus der Arbeiten liegt nun auf dem **AP8** mit den abschließenden Tests, der Evaluation und der Auswertung der Daten aus den bisherigen Arbeiten. Sollte sich daraus Anpassungsbedarf für die Konzepte oder andere Arbeitsergebnisse ergeben, werden diese entsprechend noch berücksichtigt.

Die Ergebnisse des Projekts werden nun umfangreich ausgewertet und parallel entsprechend aufbereitet, um der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht zu werden. Ergänzend werden alle notwendigen Arbeiten zum Projektabschluss durchgeführt.

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

Keine

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

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9439A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> RWE Nuclear GmbH, RWE Platz 2, 45141 Essen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Prototypbau einer autonomen Anlage zur Dekontamination und radiologischen Messung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2023 bis 31.12.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 361.573,90€
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. Thomas Schubert	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.Schuber@rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts ist, eine automatisierte und autonome robotergestützte Dekontamination von Bauteiloberflächen und die radiologische Messung von vorher unbekannten individuellen Bauteilen unterschiedlichster Geometrie, Größe und Oberflächenbeschaffenheit mit variablen Mess- und Bearbeitungsverfahren durchzuführen. Dabei werden die im Vorprojekt ROBBE gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt. Als Dekontaminationsverfahren wird ein robotergestütztes Laserablationsverfahren zur Anwendung kommen, während das Messverfahren radiologische Messungen mit einem oder mehreren unterschiedlichen Zählrohren durchführt, die eine qualitative und quantitative Aussage über radioaktive Verunreinigungen der gemessenen Oberflächen ermöglicht. Beide Verfahren erfordern eine besonders hohe Genauigkeit bei der Bauteilerkennung und bei der Anwendung der Wirkparameter der eingesetzten Bearbeitungs- und Messwerkzeuge. Die Bahnplanung verlangt eine bei beiden Verfahren unterschiedliche Bewegungsstrategie. Die roboterseits zu handhabenden Werkzeuge stellen zudem höhere Anforderungen an die kinematische Steuerung: die eindimensionale Wirkzone des Laserwerkzeugs am Endeffektor ist aus Effizienzgründen in der Orientierung quer zur Verfahrerichtung zu halten und sollte allenfalls in Schritten von 180° gedreht werden. Damit geht bei der Werkzeugführung während der Bearbeitung ein entscheidender kinematischer Freiheitsgrad verloren. Bei der radiologischen Messung erfordert die Handhabung der zweidimensionalen Zählrohrflächen je nach eingesetzter Bauteilgeometrie eine Optimierungsstrategie bei der Aufteilung der Bauteiloberflächen in passende Messraster unter Berücksichtigung der kinematischen Erreichbarkeit dieser Flächen.

Teilprojekt RWE:

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

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

AP3 – Dekontamination

AP4 – Vormessung

AP5 – Integration und Evaluation

AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP7 – Projektmanagement

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

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

Das Systemdesign wurde endgültig festgelegt. Es werden zwei Roboterzellen für die Bauteildekontamination und die radiologische Messtechnik aufgebaut, die mit einer automatischen Bauteilförder- und Bestückungseinrichtung verbunden werden. Das System wird modular aufgebaut, sodass sich die Roboterzellen auch getrennt an unterschiedlichen Standorten betreiben lassen. Die Sicherheitssysteme und Arbeitsschutzmaßnahmen sind spezifiziert und werden im Test- und Entwicklungsbetrieb validiert.

AP2 – Ansätze zur Geometrieerfassung, Lageerfassung von Bauteilen, Entwicklung der Grundstruktur der Bahnplanung für die Dekontamination/Vormessung

RWE Nuclear GmbH war an der Entwicklung des Laserscanner-Prototyps beteiligt, vor allem hinsichtlich der Spezifikation für die Hochgeschwindigkeitskameras, der erforderlichen Schnittstellen zum Prozessrechner und der Übertragungskabel. Letztere müssen noch ausgiebig im Hinblick auf ihre Robotertauglichkeit und Schleppketten-tauglichkeit geprüft werden. Ferner wurde eine Vorrichtung zur Adaptierung des Laserscanners an den beiden Roboterarmen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Bearbeitungswerkzeuge geplant.

AP3 – Laserdekontamination

Der Schwerpunkt der Tätigkeit lag auf der Umsetzung technischer Lösungen, um die Energiekette mit den erforderlichen Kabeln und Schläuchen spannungsfrei und entsprechend den Herstellerspezifikation auf den Roboterarm und die Schleppkette aufzulegen. Hierzu wurde auch ein Adapter für die Aufnahme des Laserbearbeitungskopfes am Roboterarm unter Berücksichtigung der Schlauchführung geplant und gefertigt. Der Adapter kann auch am Messroboter AP4 das dort zu verbauende Tragewerkzeug für die Messsensorik halten und Messwerkzeuge von AP4 aufnehmen. Die Schlauchführung wird mit den Haltesystemen einer Fachfirma und ergänzenden eigengefertigten Bauteilen aufgebaut, sie wird aktuell am Laser-Roboter montiert. Von der einwandfreien Funktion der Energiekette hängt die erzielbare Qualität der Roboterkinematik und damit ein Teil des Projekterfolgs ab.

Die Absaugtechnik für die Laserdekontamination wurde in Zusammenarbeit mit der zuständigen Fachabteilung des Standorts ausgelegt und entspricht dem erforderlichen zugelassenen Schutzstufenkonzept für Nuklearanlagen. Es wurde eine Schlauchführung am Roboter und weiter bis zur Absauganlage erarbeitet, die sich aktuell in der Fertigung befindet. Die Laseranlage wurde einer Wartung, Kalibrierung und verschiedenen Tests unterzogen als vorbereitende Maßnahme für die Anlagen-Prototypphase.

AP4 – Vormessung (Orientierungsmessung)

Ziel der radiologischen Messung ist zunächst eine Statusmessung im Sinne der Prüfung der zuvor erfolgten Laserdekontamination. Hierzu wurden digitale Messsonden beschafft und auf das Leitnuklid Co-60 kalibriert. Die Sonden werden gegenwärtig einer Eingangsprüfung unterzogen. Im nächsten Schritt wird mit Prüfpräparaten getestet, um

ein Mess- und Auswertekonzept zu entwickeln. Die Halterung für die Messsonden wird derzeit geplant.

**AP5 – Integration und Evaluation**

Die Hauptkomponenten der Roboterzellen wurden gefertigt und sind steuerungstechnisch integriert:

Mess-Roboter mit Laserscanner, Linearachse, Drehtisch und Umzäunung

Laser-Roboter mit Laserscanner, Linearachse, Drehtisch und kompletter normgerechter Laser-Schutzeinhäusung, Schaltschränke, Laseranlage mit Kühler und Absauganlage.

Die Anlagen-Sicherheitstechnik für die Roboterzellen und den Laserbetrieb wurde mit der örtlichen Arbeitssicherheit abgestimmt und eine Dokumentation zur Vorlage bei der BG erstellt. Die Laser-Einhäusung wurde hinsichtlich der Einwirkung von Laserstrahlung durch Schussversuche im Labor getestet.

**AP6 – Industrieller Anlagenprototyp**

Am Aufstellort für die mehrmonatige Test- und Entwicklungsphase im Maschinenhaus Block A wurden vorbereitende Maßnahmen durchgeführt:

Rückbau einer Lagerfläche, Baumaßnahme: Abriss einer KSM, Demontage von Türen

Bereitstellung der Medienversorgung: Beleuchtung, 230V-Elektroinstallation, Ertüchtigung der Kraftstrom-UV, Druckluft, Internet.

Die Verankerung der Haupt-Anlagenkomponenten im Maschinenhaus wurde über eine Statik nachgewiesen, an deren Berechnungen und Vorgaben für den dynamischen Lastnachweis RWE einen größeren Anteil hatte. Letztlich wurde ein speziell für den Standort gut geeignetes Konzept gefunden, dem Bodenaufbau mit Beton und stärkerer Estrichschicht und demzufolge längerer Hebelwege bei der Dübelverankerung, zu entsprechen.

Derzeit werden die Anlagen-Komponenten am Standort aufgebaut, die Sicherheitssysteme werden installiert und die Steuerungen und Bedienelemente in Betrieb genommen.

Die Anlage ist modular aufgebaut, beide Roboterzellen können unabhängig voneinander betrieben werden. Die Roboterzelle und die Messzelle sind gegenwärtig zu ca. 80 % mechanisch aufgebaut.

Das Bauteil-Transportsystem befindet sich in der finalen Planungsphase und wird in wenigen Wochen angeliefert. Beim wissensch. Partner, dem Fraunhofer Institut IGD in Darmstadt, wurde ein Laborprototyp der Roboterzelle mit den gleichen Hauptkomponenten aufgebaut. Dies erforderte eine besonders intensive Abstimmung mit dem Anlagenhersteller und IGD.

**AP7 – Projektmanagement**

Im Fokus standen klassische Tätigkeiten des Projektmanagements und Koordinierungstätigkeiten mit den Projektpartnern IGD und TSE.

Es wurden die örtlichen Fachabteilungen und insbesondere der Arbeitsschutz und die BG eingebunden. Zwei Ingenieure wurden in der Fachkunde zum Laserschutzbeauftragten ausgebildet. AP5 und AP6 erfordern intensive Abstimmungen der Projektpartner, die teils virtuell und teils in persönlichen Meetings vor allem beim Systemintegrator erfolgten.

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

Inbetriebnahme beider Roboterzellen, zunächst separat ohne Bauteilfördersystem (AP5&6). Test der Geometrieerkennung, Test der Laserablation, Absaugung etc. Abnahme der Roboterzellen mit CE-Konformitätserklärung. Sukzessive Implementierung der Softwarepakete für die Prozesssteuerung.

Finalisierung der Planung des automatischen Bauteiltransportsystems, Beginn der Fertigung nach Freigabe, Fertigung der Bauteilträgerplatten und der Fixiersysteme. Aufbau des Transportsystems und Integration in den Betrieb der Roboterzellen. Optimierung der Bauteil-Spanntechnik

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

Keine

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

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9439B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200733, 800007 München, für ihr Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Fraunhoferstraße 5, 64283 Darmstadt	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Autonome Laserablation und radiologische Vormessung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2023 bis 31.12.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.601.161,45€
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. Thomas Schubert	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.Schubert@rwe.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Projekts ist, eine automatisierte und autonome robotergestützte Dekontamination von Bauteiloberflächen und die radiologische Messung von vorher unbekannten individuellen Bauteilen unterschiedlichster Geometrie, Größe und Oberflächenbeschaffenheit mit variablen Mess- und Bearbeitungsverfahren durchzuführen. Dabei werden die im Vorprojekt ROBBE gewonnenen Erkenntnisse weiterentwickelt. Als Dekontaminationsverfahren wird ein robotergestütztes Laserablationsverfahren zur Anwendung kommen, während das Messverfahren radiologische Messungen mit einem oder mehreren unterschiedlichen Zählrohren durchführt, die eine qualitative und quantitative Aussage über radioaktive Verunreinigungen der gemessenen Oberflächen ermöglicht. Beide Verfahren erfordern eine besonders hohe Genauigkeit bei der Bauteilerkennung und bei der Anwendung der Wirkparameter der eingesetzten Bearbeitungs- und Messwerkzeuge. Die Bahnplanung verlangt eine bei beiden Verfahren unterschiedliche Bewegungsstrategie. Die roboterseits zu handhabenden Werkzeuge stellen zudem höhere Anforderungen an die kinematische Steuerung: die eindimensionale Wirkzone des Laserwerkzeugs am Endeffektor ist aus Effizienzgründen in der Orientierung quer zur Verfahrerichtung zu halten und sollte allenfalls in Schritten von 180° gedreht werden. Damit geht bei der Werkzeugführung während der Bearbeitung ein entscheidender kinematischer Freiheitsgrad verloren. Bei der radiologischen Messung erfordert die Handhabung der zweidimensionalen Zählrohrflächen je nach eingesetzter Bauteilgeometrie eine Optimierungsstrategie bei der Aufteilung der Bauteiloberflächen in passende Messraster unter Berücksichtigung der kinematischen Erreichbarkeit dieser Flächen.

### Teilprojekt Fraunhofer IGD:

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert:

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

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

AP3 – Dekontamination

AP4 – Vormessung

AP5 – Integration und Evaluation

AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

Prototyp1: Funktional im Laborbereich zum Testen und Evaluieren

Prototyp2: Funktional mit Industriekomponenten, Werksgelände KWB

AP7 – Projektmanagement

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

### AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

Das Systemdesign wurde endgültig festgelegt. Es werden zwei Roboterzellen für die Bauteildekontamination und die radiologische Messtechnik aufgebaut, die mit einer automatischen Bauteilförder- und Bestückungseinrichtung verbunden werden. Das System wird modular aufgebaut, sodass sich die Roboterzellen auch getrennt an unterschiedlichen Standorten betreiben lassen. Die Sicherheitssysteme und Arbeitsschutzmaßnahmen sind spezifiziert und werden im Test- und Entwicklungsbetrieb validiert.

Am Fraunhofer IGD wurde ebenfalls eine Roboterzelle aufgebaut, die bis auf den Ablationslaser und die Absaugeinrichtung identisch ist zur Roboterzelle in Biblis für die Bauteildekontamination. Gleichzeitig ist sie ebenfalls nahezu identisch zur Roboterzelle in Biblis für die radiologische Messtechnik. Sie stellt eine Entwicklungs- und Testplattform dar am Standort des Fraunhofer IGD, an dem alle Entwicklungen vorab getestet werden können, bevor sie in Biblis in der jeweiligen Zelle zum Einsatz kommen. Statt des Ablationslaserkopfes kommt ein 3D-gedruckter Simulationskopf zum Einsatz, der geometrisch identisch ist, und zur optischen Kontrolle der Reinigungsbahnen eine Niederintensitäts-Laserlinie hat. In Kürze werden zudem verschiedene Messköpfe am Roboterarm am Standort Fraunhofer IGD getestet, und die optimale Befestigung und Ausrichtung am Roboter-Endeffektor im Messprozess evaluiert. Es sind diverse Verzögerungen seitens des Integrators aufgetreten (s. Abschnitt 7), die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Roboterzelle steht aber mit einiger Verzögerung jetzt kurz bevor, parallel wurde aber ohne Verzögerung die Entwicklung des 3D-Laserscanners vorangetrieben.

### AP2 – Ansätze zur Geometrieerfassung, Lageerfassung von Bauteilen, Entwicklung der Grundstruktur der Bahnplanung für die Dekontamination/Vormessung

Die Erarbeitung der neuen Anforderungen an die Spezifikation der 3D-Sensorik durch das Fraunhofer IGD zusammen mit RWE Biblis und TSE ist abgeschlossen, das eingesetzte System zur 3D-Erfassung wird im Gegensatz zu den Anforderungen bei ROBBE mit einem schmaleren Toleranzbereich und deutlich höherer Genauigkeit arbeiten. War bei ROBBE eine Toleranz im Zentimeterbereich akzeptabel ohne größeren Einfluss auf die Reinigungswirkung, so befindet sich die akzeptable Positionierungstoleranz bei ARRIVE im Millimeterbereich.



Abb. 1: Scankopf-Prototyp im Aufbau.

Der Fokus im ersten Halbjahr lag auf der Entwicklung des physischen Prototypen, basierend auf den virtuellen Simulationen (s. Abb. 1). Dieser ist jetzt soweit, dass wir erste Scanversuche mit dem frisch kalibrierten Scansystem durchführen.

Der von uns verfolgte Kalibrierungsansatz erlaubt es, das gesamte Robotiksystem in einem Zug zu kalibrieren, wobei die drei Kameras als ungleiche Stereopaare verwendet werden, und somit das Problem der Triangulationslaser-Kalibrierung also auf eine Stereokamerapaar-Kalibrierung reduziert werden kann.

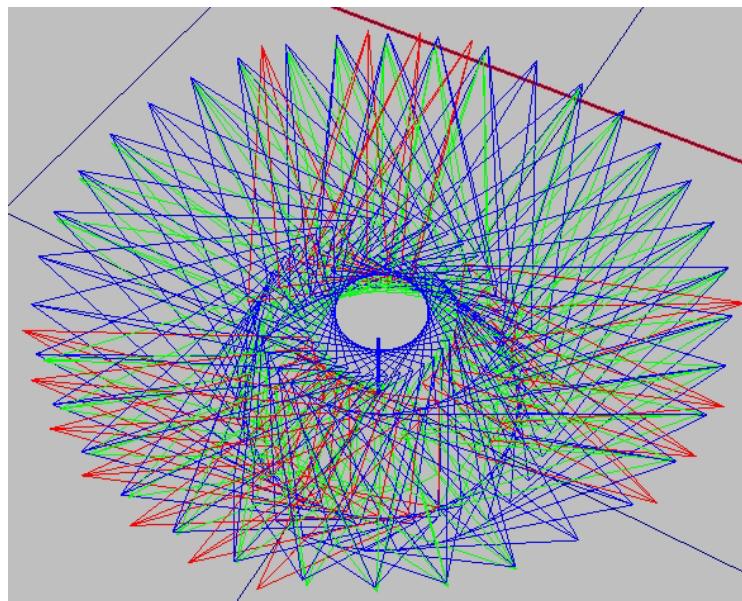


Abb. 2: Kameraposen-Schätzung der Kalibrierung unter Drehtischdrehung mit 10°-Schritten.

Abb. 2 zeigt diese direkte Posenschätzung in Aktion. Vorteil des Kalibrierungsansatzes ist, dass die Kalibrierung aus der Arbeitsposition des Robotiksystems heraus erfolgen kann, im Gegensatz zu klassischen Kalibrierungsansätzen, bei denen Spezielle Kalibrierungsposen angefahren werden und dann Arbeitsposen extrapoliert werden müssen.

Im Bild ist ersichtlich, dass die Geometriekameras des 3D-Laserscanners nicht alle Positionen erfassen können (rot und grün, fehlende Linien), die Farbkamera hier aber einen größeren Blickwinkel hat und alles erfasst (blaue Linien), und damit für die Stabilität des Verfahrens sorgt. Die im letzten Bericht erwähnte ausstehende Entscheidung für eine Laserlinie mit höherer Leistung war rückblickend richtig – aktuell erlaubt der Scanner eine Erfassungsgeschwindigkeit von bis zu 1000 Linien pro Sekunde.

Die nächsten Schritte, die zum Abschluss der Entwicklung des 3D-Laserscanners führen, bestehen einerseits darin, die Kabelführungsproblematik entlang des Robotik-Systems zu lösen, da Koaxialkabel nicht auf Torsion ausgelegt sind, was aber bei Kabelführung an Roboterarmen erforderlich ist. Der Lösungsansatz hier besteht in der Verlegung von Entlastungsschläufen. Andererseits steht als nächstes die Entwicklung des eigentlichen Scanvorgangs, basierend auf dem beschriebenen Kalibrierungsansatz, an.

### AP3 – Laserdekontamination

Der Schwerpunkt der Tätigkeit lag auf der Umsetzung technischer Lösungen, um die Energiekette mit den erforderlichen Kabeln und Schläuchen spannungsfrei und entsprechend den Herstellerspezifikation auf den Roboterarm und die Schleppkette aufzulegen. Hierzu wurde auch ein Adapter für die Aufnahme des Laserbearbeitungskopfes am Roboterarm unter Berücksichtigung der Schlauchführung geplant und gefertigt. Der Adapter kann auch am Messroboter AP4 das dort zu verbauende Tragwerkzeug für die Messsensorik halten und Messwerkzeuge von AP4 aufnehmen. Die Schlauchführung wird mit den Haltesystemen einer Fachfirma und ergänzenden eigengefertigten Bauteilen aufgebaut, sie wird aktuell am Laser-Roboter montiert. Von der einwandfreien Funktion der Energiekette hängt die erzielbare Qualität der Roboterkinematik und damit ein Teil des Projekterfolgs ab.

Die Absaugtechnik für die Laserdekontamination wurde in Zusammenarbeit mit der zuständigen Fachabteilung des Standorts ausgelegt und entspricht dem erforderlichen zugelassenen Schutzstufenkonzept für Nuklearanlagen. Es wurde eine Schlauchführung am Roboter und weiter bis zur Absauganlage erarbeitet, die sich aktuell in der Fertigung befindet. Die Laseranlage wurde einer Wartung, Kalibrierung und verschiedenen Tests unterzogen als vorbereitende Maßnahme für die Anlagen-Prototypphase.

### AP4 – Vormessung (Orientierungsmessung)

Ziel der radiologischen Messung ist zunächst eine Statusmessung im Sinne der Prüfung der zuvor erfolgten Laserdekontamination. Hierzu wurden digitale Messsonden beschafft und auf das Leitnuklid Co-60 kalibriert. Die Sonden werden gegenwärtig einer Eingangsprüfung unterzogen. Im nächsten Schritt wird mit Prüfpräparaten getestet, um ein Mess- und Auswertekonzept zu entwickeln. Die Halterung für die Messsonden wird derzeit geplant.

Praktische Tests dazu werden am Fraunhofer IGD durchgeführt, speziell werden verschiedene Messköpfe am Roboterarm des Fraunhofer IGD getestet, und die optimale Befestigung und Ausrichtung am Roboter-Endeffektor im Messprozess evaluiert (s. AP1).

### AP5 – Integration und Evaluation

Die Fertigstellung und Inbetriebnahme der Roboterzelle am Fraunhofer IGD dauert derzeit noch an, die Inbetriebnahme steht kurz bevor.

### AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

In enger Abstimmung mit RWE wurde ein Laborprototyp der Roboterzelle mit den gleichen Hauptkomponenten am Standort des Fraunhofer IGD aufgebaut, Details s. AP1.

Aktuell werden durch den Integrator noch letzte aufgetretene Probleme bei der Ansteuerung der Komponenten behoben. Die Herausforderung der in ARRIVE eingesetzten Roboterzelle, gegenüber der bei ROBBE, ist es, dass der 6 DOF-Roboterarm bei ARRIVE auf einer Linearachse sitzt, und das gesamte System wie ein 7 DOF-Roboter system synchron verfahren werden kann. Eine Anforderung wie „Bewege Endeffektor an Position  $<X, Y, Z>$  mit Orientierung  $<RX, RY, RZ>$ “ wird von der inversen Kinematik des Roboters bzw. der Software, die zur Bahnplanung des Robotiksystems vom Fraunhofer IGD entwickelt wird, umgesetzt in Gelenkwinkel  $<J1, J2, J3, J4, J5, J6>$ , und schließt einen Achswinkel der Linearachse  $<A1>$  bei der Lösung mit ein. Dabei ist der

Lösungsraum dieser Auflösung in Achswinkel deutlich größer und redundanter als bei einem Sechs-Achs-Roboter. Diese Redundanz ist wichtig, um Bahnplanungslösungen derart zu berechnen, dass die Trajektorienlänge über die Bauteiloberfläche maximiert wird, da bei der Laserablation einzelne Überfahrten über die Oberfläche mehrfach identisch wiederholt werden müssen, bis der angestrebte Dekontaminationserfolg erzielt wird. Der zeitliche Aufwand ist daher minimal, wenn abzufahrende Trajektorienlängen maximal sind, im Gegensatz zu vielen kleinen stückweisen Trajektorien, dies wird über die Linearachse erreicht als synchroner Teil des Robotersystems.

#### AP7 – Projektmanagement

Im Fokus standen klassische Tätigkeiten des Projektmanagements und Koordinierungstätigkeiten mit den Projektpartnern IGD und TSE.

Es wurden die örtlichen Fachabteilungen und insbesondere der Arbeitsschutz und die BG eingebunden. Zwei Ingenieure wurden in der Fachkunde zum Laserschutzbeauftragten ausgebildet. AP5 und AP6 erfordern intensive Abstimmungen der Projektpartner, die teils virtuell und teils in persönlichen Meetings vor allem beim Systemintegrator erfolgten.

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

Am Fraunhofer IGD steht die Inbetriebnahme der Roboterzelle kurz bevor, parallel laufen die abschließende Entwicklung und Test des 3D-Laserscanners. Zudem finden in Kürze Tests mit verschiedenen Radiologie-Messköpfen am Roboterarm statt.

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

Keine.

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

Keine.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9440A
<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> VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 30.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 248.148,30 €
<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 der Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen über 100.000 m<sup>2</sup> bis 450.000 m<sup>2</sup> Betonoberfläche, welche für eine erfolgreiche Freimessung dekontaminiert werden muss. Üblicherweise erfolgt die Dekontamination durch das Abtragen der Oberfläche, bis zu der Tiefe, ab der keine Kontamination mehr vorliegt.

Die Gespräche mit Rückbaufirmen und Kernkraftwerksbetreibern haben ergeben, dass insbesondere die Ecken- und Innenkantendekontamination bisher mit handgeführten Geräten durchgeführt wird. Werkzeuge wie zum Beispiel Nadelpistolen, Stock- und Schleifgeräte entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte werden ursprünglich für Sanierungsarbeiten eingesetzt und sind demnach nicht speziell für die Dekontamination von Gebäuden entwickelt worden. Neben der geringen Flächenleistung der Geräte, der unebenen Oberfläche die hinterlassen wird und der hohen körperlichen Belastung für die Arbeiter, trägt auch die fehlende Absaugung zur begrenzten Eignung bei. Die fehlende Absaugung wird kompensiert durch die Verwendung von zusätzlichen Industriestaubsaugern, was die ohnehin schon komplexe und langwierige Arbeit zusätzlich aufwändiger macht.

Um diesen Schwierigkeiten und Problemen entgegenzuwirken und eine verbesserte Lösung für die Dekontamination der Ecken und Innenkanten zu liefern, wurde das Projekt „EKont“ mit dem Ziel, die Leistungsparameter der aktuell verwendeten Geräte zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten zu finden, durchgeführt. Hier wurden bereits mehrere Demonstratoren entwickelt und in einem Versuchsaufbau erprobt. Da mögliche Verbesserungen bei diesem Projekt aufgetreten sind, wird aktuell das Forschungsprojekt „EKont-2“ durchgeführt, welches an das bestehende EKont-Projekt anknüpft. Der Kern dieses Folgeprojektes ist die Verbesserung der Handhabbarkeit des Gerätes, der Oberflächenqualität der dekontaminierten Innenkannten, die Möglichkeit einer exakten Tiefenführung sowie die Gewährleistung von Staubfreiheit während der Bearbeitung.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| AP 1: (01.07.2023 – 31.07.2023): | Projektstart   |
| AP 2: (01.08.2023 – 29.02.2024): | Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster   |
| AP 3: (01.03.2024 – 31.07.2024): | Zusammenführung und Inbetriebnahme von Versuchsmustern und Versuchsstand                         |
| AP 4: (01.08.2024 – 31.12.2024): | Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse    |
| AP 5: (01.01.2025 – 31.07.2025): | Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung |
| AP 6: (01.08.2025 – 31.10.2025): | Versuche vor Ort   |
| AP 7: (01.11.2025 – 31.03.2026): | Optimierung der Versuchsmuster   |
| AP 8: (01.04.2026 – 30.06.2026): | Dokumentation und Evaluation   |

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

### AP 5: Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung

Nach erfolgreichem Abschluss des Arbeitspaketes 4, in dem ein geeigneter Schrägstellungswinkel experimentell ermittelt wurde, lag der Fokus im fünften Arbeitspaket auf der konstruktiven Anpassung des Versuchsmusters. Ziel war die Umsetzung einer Schrägstellung von 10° sowie die Integration einer verstellbaren Tiefenführung.

Die Schrägstellung wurde durch Anpassungen der Anlageflächen konstruktiv realisiert. Dabei mussten sämtliche Bauteile überarbeitet werden, um die notwendige Stabilität der Gesamtkonstruktion sicherzustellen. Im weiteren Verlauf wurde die Position der Absaugung optimiert, sodass diese strömungsmechanisch günstiger liegt. Zudem wurde der Anschlussdurchmesser an gängige Absaugvorrichtungen angepasst.

Zur variablen Einstellung der Abtragstiefe wurde das Gehäuse so ausgelegt, dass vier Stufen zwischen 5 mm und 20 mm realisiert werden können. Die Einstellung erfolgt über einen mechanischen Anschlag, der manuell mittels eines Bolzens justierbar ist.

Um zu verhindern, dass die Diamantscheiben vor und nach dem Arbeitsgang frei rotieren, wurde ein federrückgestellter Aufsatz entwickelt. Dieser liegt in zwei Varianten vor: Eine Ausführung arbeitet mit einer außenliegenden Spiralfeder, die geführt ist und den Aufsatz zuverlässig in die Grundstellung zurückführt. Dabei wurde bewusst eine Feder mit geringer Vorspannung gewählt, um dem Anwender einen kraftsparenden Einsatz zu ermöglichen. Die bevorzugte Variante nutzt hingegen eine innenliegende Blattfeder. Für diesen Zweck wurden speziell angefertigte Federn eingesetzt, die den Vorteil haben, dass keine außenliegenden Bauteile erforderlich sind. Dadurch wird das Risiko von Beschädigungen oder einem Hängenbleiben minimiert. Beide Varianten sind vollständig entwickelt und stehen für die bevorstehenden Versuche unabhängig voneinander zur Verfügung.

Während der bauma (7.–13. April) wurde ein vorläufiger, mittels 3D-Druck gefertigter Prototyp am Stand der Firma Contec GmbH ausgestellt. Ergänzend wurde ein entsprechendes Poster zur Präsentation angefertigt.

Im Rahmen des Projekttreffens Ende Juni wurde das aktuelle Versuchsmuster erstmals praktisch erprobt und anschließend an die SPIE SAT GmbH (ehemals SAT Kerntechnik GmbH) übergeben. Der zugehörige Meilenstein wurde damit erreicht.

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

##### AP 6: Versuche vor Ort

Der im Rahmen des Projekttreffens übergebene Prototyp wird derzeit von der SPIE-Gruppe im Zuge aktueller Rückbauarbeiten in einem Kernkraftwerk unter realen Einsatzbedingungen erprobt. Ziel ist es, aussagekräftige Praxistests durchzuführen und eine Bewertung durch das Fachpersonal vor Ort zu erhalten.

Für den weiteren Projektverlauf ist eine umfassende und insbesondere visuell gestützte Dokumentation der Versuche vorgesehen. Darüber hinaus soll ein kontinuierlicher Austausch mit den Anwendern erfolgen, sowohl im Hinblick auf auftretende Probleme als auch auf positive Rückmeldungen und praxisnahe Verbesserungsvorschläge.

Trotz der bereits erzielten erheblichen Gewichtsreduktion ist absehbar, dass das Gerät für einen dauerhaften manuellen Einsatz zu schwer bleibt, sodass künftige Maßnahmen zur ergonomischen Entlastung der Arbeitskräfte in Betracht gezogen werden sollten.

##### AP 7: Optimierung der Versuchsmuster

Basierend auf den Erkenntnissen aus den laufenden Praxistests wird der Prototyp in eine weitere Optimierungsphase überführt. Ziel dieser Phase ist es, notwendige Anpassungen vorzunehmen, um die Arbeitsprozesse unter realen Bedingungen weiter zu erleichtern und die Betriebssicherheit sowie die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen.

Sämtliche konstruktiven Änderungen werden im Vorfeld im Projektteam abgestimmt und gemeinsam bewertet, um eine zielgerichtete und praxisorientierte Weiterentwicklung sicherzustellen.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Ausstellung des Prototyps und Posters auf der bauma (07.-13. April 2025)
- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2<sup>nd</sup>: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.2024, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)
- Kerntechnik Fachtagung 2024, Plenarvortrag „DEVELOPMENT OF A DECONTAMINATION TOOL FOR INNER EDGES AND CORNERS (EKONT-2)“, 11.06. – 13.06.2024, Leipzig
- FORKA Statusseminar, Präsentation „Projektvorstellung EKONT-2, Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 09.04. – 11.04.2024
- KONTEC, Postervortrag: „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 30.08 – 01.09.2023, Dresden
- SafeND Forschungssymposium, Plenarvortrag: „EKONT-2: Advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edge in nuclear facilities“, 13.09. – 15.09.2023, Berlin
- ATW Journal, Magazinbeitrag: “Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination“, 01.11.2023, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9440B
<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> VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkanten-dekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Durchführung experimenteller Versuche und Auswertung der Versuchsmuster	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 30.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 250.518,25 €
<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 der Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen über 100.000 m<sup>2</sup> bis 450.000 m<sup>2</sup> Betonoberfläche, welche für eine erfolgreiche Freimessung dekontaminiert werden muss. Üblicherweise erfolgt die Dekontamination durch das Abtragen der Oberfläche, bis zu der Tiefe, ab der keine Kontamination mehr vorliegt.

Die Gespräche mit Rückbaufirmen und Kernkraftwerksbetreibern haben ergeben, dass insbesondere die Ecken- und Innenkantendekontamination bisher mit handgeführten Geräten durchgeführt wird. Werkzeuge wie zum Beispiel Nadelpistolen, Stock- und Schleifgeräte entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte werden ursprünglich für Sanierungsarbeiten eingesetzt und sind demnach nicht speziell für die Dekontamination von Gebäuden entwickelt worden. Neben der geringen Flächenleistung der Geräte, der unebenen Oberfläche, die hinterlassen wird und der hohen körperlichen Belastung für die Arbeiter, trägt auch die fehlende Absaugung zur begrenzten Eignung bei. Die fehlende Absaugung wird kompensiert durch die Verwendung von zusätzlichen Industriestaubsaugern, was die ohnehin schon komplexe und langwierige Arbeit zusätzlich aufwändiger macht.

Um diesen Schwierigkeiten und Problemen entgegenzuwirken und eine verbesserte Lösung für die Dekontamination der Ecken und Innenkanten zu liefern, wird zum aktuellen Zeitpunkt das Projekt „EKont“ durchgeführt. Ziel dieses Projektes ist es die Leistungsparameter der aktuell verwendeten Geräte zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten zu finden. Hierfür wurden bereits mehrere Demonstratoren entwickelt und in einem Versuchsaufbau erprobt. Da mögliche Verbesserungen bei diesem Projekt aufgetreten sind, soll ein weiteres Forschungsprojekt angestoßen werden, welches an das bestehende EKont-Projekt anknüpft.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.07.2023 – 31.07.2023): Projektstart
- AP 2: (01.08.2023 – 29.02.2024): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster
- AP 3: (01.03.2024 – 31.07.2024): Zusammenführung und Inbetriebnahme von Versuchsmustern und Versuchsstand
- AP 4: (01.08.2024 – 31.12.2024): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse
- AP 5: (01.01.2025 – 31.07.2025): Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung
- AP 6: (01.08.2025 – 31.10.2025): Versuche vor Ort
- AP 7: (01.11.2025 – 31.03.2026): Optimierung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.04.2026 – 30.06.2026): Dokumentation und Evaluation

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

### AP 5: Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung

Ab Januar 2025 wurde Arbeitspaket 5 „Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung“ durchgeführt. Hierbei konnten die Diamantscheiben weiter optimiert werden sowie die neue Konstruktion der Einhausung inklusive Schrägstellung zur Verbesserung der Oberflächenqualität angefertigt werden. Auf Grundlage der bereits durchgeführten Versuche konnte ein geeigneter Winkel zur Schrägstellung definiert werden, der sowohl eine gute Oberflächenqualität als auch gute Abtragsleistungen ermöglicht. Die verschiedenen neuen Bauteile wurden zu einem Prototyp-Werkzeug zusammengeführt. Der Prototyp wurde nachfolgend an die SAT SPIE (ehemals SAT. Kerntechnik) zur Durchführung der Praxisversuche im Kernkraftwerk Obrigheim und/oder im Kernkraftwerk Isar 2 übergeben. Damit wurde der Meilenstein im Projektzeitenplan fristgerecht erreicht.

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

AP 6: Im zweiten Halbjahr 2025 sollen Praxisversuche mit dem Demonstratorwerkzeug in einem Kernkraftwerk durchgeführt werden. Momentan stehen das Kernkraftwerk Obrigheim oder das Kernkraftwerk Isar 2 in der Auswahl. Die Versuche vor Ort wird federführend die SAT SPIE durchführen, da diese als Praxispartner den direktesten Bezug zu Rückbau-Baustellen aufweisen.

AP 7: Anschließend an AP 6 soll die Optimierung des Versuchsmusters beginnen. Hierbei sollen die Erkenntnisse der Praxisversuche direkt in den Optimierungsprozess einfließen, um das Werkzeug direkter auf den Praxisanwendungsfall auszurichten.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

- BAUMA 2025, Poster & Vorstellung des Forschungsprojektes, 07.04.2025 – 13.05.2025, München, CONTEC Messestand, Tyrolit Group
- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2<sup>nd</sup>: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.2024, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)
- Kerntechnik Fachtagung 2024, Plenarvortrag „DEVELOPMENT OF A DECONTAMINATION TOOL FOR INNER EDGES AND CORNERS (EKONT-2)“, 11.06. – 13.06.2024, Leipzig
- FORKA Statusseminar, Präsentation „Projektvorstellung EKONT-2, Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 09.04. – 11.04.2024
- KONTEC, Postervortrag: „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 30.08 – 01.09.2023, Dresden
- SafeND Forschungssymposium, Plenarvortrag: „EKONT-2: Advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edge in nuclear facilities“, 13.09. – 15.09.2023, Berlin
- ATW Journal, Magazinbeitrag: “Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination“, 01.11.2023, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9440C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Contec GmbH, Hauptstraße 146, 57518 Alsdorf	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Detaillierung und Ausgestaltung der Versuchsmuster samt Einhausung mit Absaugung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 30.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 118.107,87 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Johannes Greb	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> greb@contecgmbh.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss, zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur, eine Oberflächendekontamination der Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen über 100.000 m<sup>2</sup> bis 450.000 m<sup>2</sup> Betonoberfläche, welche für eine erfolgreiche Freimessung dekontaminiert werden muss. Üblicherweise erfolgt die Dekontamination durch das Abtragen der Oberfläche, bis zu der Tiefe, ab der keine Kontamination mehr vorliegt.

Die Gespräche mit Rückbaufirmen und Kernkraftwerksbetreibern haben ergeben, dass insbesondere die Ecken- und Innenkantendekontamination bisher mit handgeführten Geräten durchgeführt wird. Werkzeuge wie zum Beispiel Nadelpistolen, Stock- und Schleifgeräte entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte werden ursprünglich für Sanierungsarbeiten eingesetzt und sind demnach nicht speziell für die Dekontamination von Gebäuden entwickelt worden. Neben der geringen Flächenleistung der Geräte, der unebenen Oberfläche die hinterlassen wird und der hohen körperlichen Belastung für die Arbeiter, trägt auch die fehlende Absaugung zur begrenzten Eignung bei. Die fehlende Absaugung wird kompensiert durch die Verwendung von zusätzlichen Industriestaubsaugern, was die ohnehin schon komplexe und langwierige Arbeit zusätzlich aufwändiger macht.

Um diesen Schwierigkeiten und Problemen entgegenzuwirken und eine verbesserte Lösung für die Dekontamination der Ecken und Innenkanten zu liefern, wird zum aktuellen Zeitpunkt das Projekt „EKont“ durchgeführt. Ziel dieses Projektes ist es die Leistungsparameter der aktuell verwendeten Geräte zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten zu finden. Hierfür wurden bereits mehrere Demonstratoren entwickelt und in einem Versuchsaufbau erprobt. Da mögliche Verbesserungen bei diesem Projekt aufgetreten sind, soll ein weiteres Forschungsprojekt angestoßen werden, welches an das bestehende EKont-Projekt anknüpft.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.07.2023 – 31.07.2023): Projektstart
- AP 2: (01.08.2023 – 29.02.2024): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster
- AP 3: (01.03.2024 – 31.07.2024): Zusammenführung und Inbetriebnahme von Versuchsmustern und Versuchsstand
- AP 4: (01.08.2024 – 31.12.2024): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse
- AP 5: (01.01.2025 – 31.07.2025): Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung
- AP 6: (01.08.2025 – 31.10.2025): Versuche vor Ort
- AP 7: (01.11.2025 – 31.03.2026): Optimierung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.04.2026 – 30.06.2026): Dokumentation und Evaluation

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

### AP 5: Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung

Ab Januar 2025 wurde Arbeitspaket 5 „Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung“ durchgeführt. Hierbei konnten die Diamantscheiben weiter optimiert werden sowie die neue Konstruktion der Einhausung inklusive Schrägstellung zur Verbesserung der Oberflächenqualität angefertigt werden. Auf Grundlage der bereits durchgeführten Versuche konnte ein geeigneter Winkel zur Schrägstellung definiert werden, der sowohl eine gute Oberflächenqualität als auch gute Abtragsleistungen ermöglicht.

Die verschiedenen neuen Bauteile werden zu einem Prototyp-Werkzeug zusammengeführt. Der Prototyp wird nachfolgend im Sinne des zu erreichenden Meilensteins im Projektzeitenplan an die SAT SPIE (ehemals SAT. Kerntechnik) übergeben zur Durchführung der Praxisversuche im Kernkraftwerk Obrigheim und/oder im Kernkraftwerk Isar 2.

Die CONTEC GmbH war maßgeblich an der Gestaltung und Beschaffung der optimierten Diamantscheiben als auch an der konzeptionellen Ausarbeitung der Schrägstellung zur Schnittrichtung über das Gehäuse beteiligt.

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

AP6: Im zweiten Halbjahr 2025 soll zu Beginn der Meilenstein erreicht werden und ein Demonstratorwerkzeug an die SAT SIE übergeben werden. Mit diesem sollen Praxisversuche im Kernkraftwerk durchgeführt werden. Momentan stehen das Kernkraftwerk Obrigheim oder das Kernkraftwerk Isar 2 in der Auswahl. Die Versuche vor Ort wird federführend die SAT SPIE durchführen, da diese als Praxispartner den direktesten Bezug zu Rückbau-Baustellen aufweisen.

AP7: Anschließend an AP 6 soll die Optimierung des Versuchsmusters beginnen. Hierbei sollen die Erkenntnisse der Praxisversuche direkt in den Optimierungsprozess einfließen, um das Werkzeug direkter auf den Praxisanwendungsfall auszurichten.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

- BAUMA 2025, Poster & Vorstellung des Forschungsprojektes, 07.04.2025 – 13.05.2025, München, CONTEC Messestand, Tyrolit Group
- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2<sup>nd</sup>: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.2024, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)
- Kerntechnik Fachtagung 2024, Plenarvortrag „DEVELOPMENT OF A DECONTAMINATION TOOL FOR INNER EDGES AND CORNERS (EKONT-2)“, 11.06. – 13.06.2024, Leipzig
- FORKA Statusseminar, Präsentation „Projektvorstellung EKONT-2, Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 09.04. – 11.04.2024
- KONTEC, Postervortrag: „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 30.08 – 01.09.2023, Dresden
- SafeND Forschungssymposium, Plenarvortrag: „EKONT-2: Advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edge in nuclear facilities“, 13.09. – 15.09.2023, Berlin
- ATW Journal, Magazinbeitrag: “Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination“, 01.11.2023, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9440D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> SPIE SAT GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Praxisversuche und Verifizierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 30.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 54.059,05
<b>Projektleiter/-in:</b> Stefan Stemmle	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> stefan.stemmle@spie-isw.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Beim Rückbau kerntechnischer Anlagen muss, zur Sicherstellung der Kontaminationsfreiheit der bestehenden Gebäudestruktur, eine Oberflächendekontamination der Räumlichkeiten durchgeführt werden. Typische Kernkraftwerke in Deutschland verfügen über 100.000 m<sup>2</sup> bis 450.000 m<sup>2</sup> Betonoberfläche, welche für eine erfolgreiche Freimessung dekontaminiert werden muss. Üblicherweise erfolgt die Dekontamination durch das Abtragen der Oberfläche, bis zu der Tiefe, ab der keine Kontamination mehr vorliegt.

Die Gespräche mit Rückbaufirmen und Kernkraftwerksbetreibern haben ergeben, dass insbesondere die Ecken- und Innenkantendekontamination bisher mit handgeführten Geräten durchgeführt wird. Werkzeuge wie zum Beispiel Nadelpistolen, Stock- und Schleifgeräte entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Diese Geräte werden ursprünglich für Sanierungsarbeiten eingesetzt und sind demnach nicht speziell für die Dekontamination von Gebäuden entwickelt worden. Neben der geringen Flächenleistung der Geräte, der unebenen Oberfläche die hinterlassen wird und der hohen körperlichen Belastung für die Arbeiter, trägt auch die fehlende Absaugung zur begrenzten Eignung bei. Die fehlende Absaugung wird kompensiert durch die Verwendung von zusätzlichen Industriestaubsaugern, was die ohnehin schon komplexe und langwierige Arbeit zusätzlich aufwändiger macht.

Um diesen Schwierigkeiten und Problemen entgegenzuwirken und eine verbesserte Lösung für die Dekontamination der Ecken und Innenkanten zu liefern, wird zum aktuellen Zeitpunkt das Projekt „EKONT“ durchgeführt. Ziel dieses Projektes ist es die Leistungsparameter der aktuell verwendeten Geräte zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten zu finden. Hierfür wurden bereits mehrere Demonstratoren entwickelt und in einem Versuchsaufbau erprobt. Da mögliche Verbesserungen bei diesem Projekt aufgetreten sind, soll ein weiteres Forschungsprojekt angestoßen werden, welches an das bestehende EKONT-Projekt anknüpft.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1: (01.07.2023 – 31.07.2023): Projektstart
- AP 2: (01.08.2023 – 29.02.2024): Entwicklung und Anfertigung der Versuchsmuster
- AP 3: (01.03.2024 – 31.07.2024): Zusammenführung und Inbetriebnahme von Versuchsmustern und Versuchsstand
- AP 4: (01.08.2024 – 31.12.2024): Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse
- AP 5: (01.01.2025 – 31.07.2025): Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung
- AP 6: (01.08.2025 – 31.10.2025): Versuche vor Ort
- AP 7: (01.11.2025 – 31.03.2026): Optimierung der Versuchsmuster
- AP 8: (01.04.2026 – 30.06.2026): Dokumentation und Evaluation

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

### AP 1-3: siehe oben

Die AP1-3 wurden bereits im Vorjahr abgeschlossen. Seitens SAT erfolgte Zuarbeit und Beratung aus der Anwendersicht.

### AP 4: Durchführung der experimentellen Versuchsreihen sowie Auswertung und Vergleich der Ergebnisse

Auch das AP4 ist inzwischen abgeschlossen.

Bei den experimentellen Versuchsreihen lag der Fokus auf der Schrägstellung der Diamantscheiben zur Verringerung der Restbetonstegbildung und damit Erhöhung der Oberflächenqualität bei der Dekontamination zur erleichterten Freimessung.

Seitens SAT war während der Durchführung von AP4 recht wenig Zuarbeit erforderlich. Ein Thema war die Tiefeneinstellung an der Abdeckung (Abstufungen und max. Tiefe), was im AP5 konstruktiv und praktisch umgesetzt wird. Ansonsten erfolgte der regelmäßige, bilaterale Austausch mit den Projektpartnern.

### AP 5: Optimierung der Versuchsmuster und Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung

Das Arbeitspaket 5 war der Schwerpunkt im ersten Halbjahr 2025.

Insbesondere die Optimierung der Versuchsmuster und die Konstruktion einer Einhausung mit Absaugung und Tiefenführung sowie entsprechende CAD-Konstruktionszeichnungen.

Die Anschlussstelle für die Absaugung des entstehenden Betonstaubs wurde an einer neuen bzw. günstigeren Position angebracht. Die Schrägstellung zur Minimierung der Restbetonstegbildung wurde konstruktionstechnisch gelöst, als Basis für das reale Testwerkzeug.

SAT war hier regelmäßig eingebunden und im Austausch mit den Projektpartnern. Am 15.01.25 fand das Projekttreffen im KIT statt, inkl. Besuch des Versuchsstandes.

Weitere Projekttreffen per Teams fanden statt am 19.02.25, 05.03.25 und 03.06.2025.

Parallel zu AP 5 wurden bereits die Praxisversuche (AP6) vorbereitet. Die Prototypmaschine für Praxisversuche im Kernkraftwerk Obrigheim (KWO) wurde am 26.06.25 an die SAT übergeben. Seitens SAT wurde die elektrische Prüfung durchgeführt, sowie die Gefährdungsbeurteilung aktualisiert. Mit dem Betreiber des KWO wurde der geplante Versuchsablauf besprochen.

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

##### **AP 6: Versuche vor Ort**

Ab August 2025 sollen dann die „Versuche vor Ort“ stattfinden. Diese Praxisversuche unter echten Anwendungsbedingungen sind aus Sicht der SAT der Schwerpunkt. Die Durchführung der Praxisversuche war im Kernkraftwerk Obrigheim (KWO) geplant, wo SAT seit 2021 mit einem Team von durchschnittlich 10 Mitarbeitern vor Ort ist und alle Aufgaben der Gebäude- und Betonoberflächen, was perfekt zum Zeitplan unseres Projektes EKONT2 gepasst hätte.

Inzwischen musste die SAT das Projekt im KWO (aus Budgetgründen) vorzeitig abbrechen und das Personal und die Werkzeuge abziehen. Damit waren die bisherigen Planungen für die Praxisversuche im KWO leider gegenstandslos.

Alternative:

Ab dem 01.09.2025 startet die SAT ein neues Projekt im Kernkraftwerk Isar (KKI1). Neben diversen Demontagearbeiten ist auch Betonabtrag im BELB (Brennelementbecken) geplant. Wir sind bereits mit dem Betreiber PEL (PreussenElektra) in Kontakt und setzen alles daran, die Praxisversuche im geplanten Zeitfenster, bis 31.10.2025, abzuschließen und alles entsprechend zu dokumentieren.

Die SAT wird auf der KONTEC 2025 (17.-20.09.2025) erneut als Aussteller vertreten sein und das Thema Gebäude- und Betonoberflächen thematisieren, gerade auch mit Bezug auf EKONT. Das Abstract liegt vor und wurde inhaltlich von der SAT überprüft. Die SAT wird als Co-Präsentator auftreten.

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

Keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2<sup>nd</sup>: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.2024, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)
- Kerntechnik Fachtagung 2024, Plenarvortrag „DEVELOPMENT OF A DECONTAMINATION TOOL FOR INNER EDGES AND CORNERS (EKONT-2)“, 11.06. – 13.06.2024, Leipzig
- FORKA Statusseminar, Präsentation „Projektvorstellung EKONT-2, Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 09.04. – 11.04.2024
- KONTEC, Postervortrag: „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 30.08 – 01.09.2023, Dresden
- SafeND Forschungssymposium, Plenarvortrag: „EKONT-2: Advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edge in nuclear facilities“, 13.09. – 15.09.2023, Berlin
- ATW Journal, Magazinbeitrag: “Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination“, 01.11.2023, [www.kernd.de](http://www.kernd.de)
- Veröffentlichungen auf der BAUMA 2025 in München
- Präsentation auf der KONTEC 2025 in Dresden (17.09.2025).

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9449A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover – Institut für Werkstoffkunde	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Prozessautomatisierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2024 bis 30.09.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.323.877,02 €
<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

Eine Herausforderung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen besteht darin, metallische Strukturen wie den Reaktordruckbehälter mit Wandstärken von mehr als 100 mm zu trennen. Dabei können Konstellationen auftreten, bei denen mehrere Materialien schichtweise aneinander liegen, beispielsweise aufgrund von inneren Plattierungen. Vor diesem Hintergrund werden für die anstehenden Rückbauprojekte in Deutschland und langfristig auch international sichere und robuste Technologien zum Trennen benötigt. In diesem Kontext sind thermische Trennverfahren äußerst vielversprechend, da sie mit geringen Rückstellkräften arbeiten und die geforderten Wandstärken sicher und schnell durchtrennen können. Das Ziel dieses Projekts ist die Automatisierung des Vorschubprozesses der lichtbogenbasierten Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser in den Verfahrensvarianten Contact Arc Metal Grinding (CAMG) und Contact Arc Metal Cutting (CAMC). Ein Mitarbeiter bewegt dabei das Werkzeug manuell am Beckenrand mithilfe einer Halterung, die in solchen Anwendungsfällen üblicherweise bis zu 15 m tief ins Wasser ragt. Die Position, Kinematik und der Vorschub im Prozess hängen daher von der Qualifikation, Geschicklichkeit und Erfahrung des Bedieners sowie von den Möglichkeiten einer visuellen Prozessbeobachtung ab. Diese Vorgehensweise birgt große Risiken, insbesondere wenn der Lichtbogenbereich schlecht einsehbar ist, die Einschätzung des Bedieners nicht korrekt erfolgt ist oder andere unvorhergesehene Umstände (Kurzschlusskontakt, Klemmen der Elektrode etc.) auftreten. Eine zentrale Maßnahme zur Minimierung solcher Risiken besteht in der *in situ* Prozessüberwachung mittels geeigneter Prozesssignale und einer entsprechenden Reaktion auf die jeweilige Prozesssituation. In diesem Zusammenhang können bei lichtbogenbasierten Fertigungsverfahren die Strom- und Spannungssignale im Prozess aufgezeichnet und analysiert werden. Dies ist für die zu untersuchenden Verfahren CAMG und CAMC ebenfalls möglich. Dieses Projekt zielt darauf ab, diese relevanten Daten zu generieren, zu interpretieren, nutzbar zu machen und im letzten Schritt vor dem Hintergrund der lichtbogenphysikalischen Zusammenhänge in ein Regelsignal für den automatisierten Vorschub beider Prozesse zu überführen. Dabei gibt es zwei Schwerpunkte. Zum einen die hochfrequenten Veränderungen der Signale, die Rückschlüsse auf die Ausbildung der Lichtbögen und damit auf die Prozessstabilität zulassen. Zum anderen kann bei einer langfristigen Betrachtung der Strom- und Spannungsverläufe eine Aussage über den Grad des Elektrodenverschleißes getroffen werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Durchführung des Projekts ist in vier Komplexe unterteilt. Komplex A fokussiert sich auf zentrale Aufgaben, die in enger Zusammenarbeit der beteiligten Partner bearbeitet werden. Dazu gehört unter anderem die Anlagentechnik, insbesondere bestehend aus Wasserbecken, Führungsmaschine und Stromquelle. Zusätzlich werden weitere Mock-ups entwickelt, die reale Anwendungsfälle simulieren. Der zweite Abschnitt von Komplex A behandelt die Erfassung und Verarbeitung von Prozessdaten, wobei der Schwerpunkt auf dem Algorithmus und der Steuerung liegt. Die Bereiche B und C widmen sich der verfahrensspezifischen Auslegung und Untersuchung der Schneidprozesse CAMG und CAMC. Hierbei stehen die unterschiedlichen Prozessmerkmale im Vordergrund. Der abschließende Bereich D bündelt alle zuvor bearbeiteten Aufgaben, um die Ergebnisse für die Dokumentation aufzubereiten. Dieser Bereich stellt entscheidende Informationen zur Sicherstellung der Genehmigungsfähigkeit der Anlagentechnik und der damit verbundenen intelligenten Regelung bereit.

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

- Im ersten Halbjahr wurde die Planung der Anlagenkomponenten im Arbeitspaket A/1 maßgeblich vorangetrieben. Schwerpunkt war das Wasserbecken, das konstruktiv und funktional das zentrale Element der Anlage bildet. Die Planung erfolgte in enger Abstimmung mit den beteiligten Fachbereichen, um Schnittstellen zu definieren und eine reibungslose Integration der weiteren Systemkomponenten sicherzustellen. Zur Auslegung der Führungsmaschine wurden die mechanischen Anforderungen detailliert erfasst, insbesondere die auftretenden Kräfte, die künftig in die Dimensionierung einfließen. Die Umsetzung regelmäßiger fachübergreifender Abstimmungen und offener Kommunikationswege hat sich dabei bewährt: Sie förderte den Austausch von Perspektiven und ermöglichte es, technische Herausforderungen frühzeitig zu adressieren. So konnte ein solides Fundament für die weitere Entwicklung einer effizienten und nachhaltigen Anlagentechnik gelegt werden.
- Innerhalb des Arbeitspaketes A/5 konnte aufgrund der noch ausstehenden Lieferung zentraler Komponenten bisher keine reale Datenerfassung erfolgen. Dennoch wurde eine Datenstruktur zur späteren Signalverarbeitung entworfen. Zudem wurde ein erstes Python-Skript entwickelt, welches grundlegende Funktionen zur Einlesung, Vorverarbeitung und Filterung von Strom- und Spannungsdaten beinhaltet.
- Im Rahmen des Arbeitspaketes A/6 (Erstellung des Algorithmus) wurde der Fokus auf die theoretische Ausarbeitung des Algorithmus gelegt. Ein erstes Flussdiagramm sowie ein Pseudocode zur Strukturierung der Steuerlogik wurden erstellt. Darauf aufbauend wurden erste Code-Module in Python implementiert. Erste Funktionstests des Algorithmus erfolgten ausschließlich mit synthetisch generierten Testdaten durchgeführt. Zudem wurde die spätere Erweiterbarkeit des Algorithmus, insbesondere in Verbindung mit einer PID-basierten Steuerung, konzeptionell vorbereitet.
- Gemeinsam mit der Planung aus Arbeitspaket A/1 wird die Planung in den Arbeitspaketen B/1 und C/1 vorangetrieben, um eine Integration der Prozesstechnik einwandfrei zu ermöglichen. Dazu zählen insbesondere Befestigungsmöglichkeiten für das Gerät, Betriebsmittel oder Sensoren.
- Während eines Projekttreffens in Lubmin konnte die im Bau befindliche Zerlegehalle der EWN besichtigt werden. Zwar befindet sich das Gebäude aktuell im Rohbau jedoch konnten erste Eindrücke für den späteren Einsatzort gesammelt werden. Diese Erfahrungen waren insbesondere in den Diskussionen für Arbeitspaket D/3 von Relevanz.

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

- Im kommenden Halbjahr liegt der Schwerpunkt in Arbeitspaket A/1 auf der finalen konstruktiven Ausarbeitung der Anlagenkomponenten sowie der technischen Detailplanung zur Vorbereitung der Beschaffung. Insbesondere sollen die Schnittstellen rund um das Wasserbecken weiter konkretisiert und in vollständige Planungsunterlagen überführt werden. Die Auslegung der Führungsmaschine wird abgeschlossen und mit den angrenzenden Systemen abgestimmt. Darauf aufbauend ist die Erstellung von Ausschreibungsunterlagen sowie die Beauftragung erster Komponenten vorgesehen. Ziel ist es, bis zum Ende des Jahres belastbare Bestellungen auszulösen und so den Übergang von der Planungs- in die Umsetzungsphase einzuleiten. Die enge Abstimmung zwischen allen beteiligten Fachbereichen bleibt dabei weiterhin zentral.
- In Arbeitspaket A/5 wird die Aufzeichnung der Daten vorbereitet, damit diese beginnen kann, sobald die Anlagenkomponenten betriebsbereit sind.
- Die Aktivitäten in Arbeitspaket A/6 fokussieren sich auf die schrittweise Fertigstellung der Algorithmusentwicklung. Es erfolgt eine systematische Erweiterung der bestehenden Codebasis. Die Anstrengungen konzentrieren sich hierbei auf die strukturelle Anpassung an die Anforderungen der späteren Echtzeitverarbeitung. Insbesondere wird die Funktionalität der bisher entwickelten Module zur Signalfilterung und Entscheidungslogik intensiv überprüft.
- Ein weiterer wesentlicher Bestandteil unserer Planungen in Arbeitspaket A/6 ist die Initiierung vorbereitender Maßnahmen zur Integration eines geeigneten Logging-Mechanismus. Dieser Mechanismus ist von zentraler Bedeutung, da er die Grundlage für eine fundierte Bewertung des Algorithmusverhaltens schafft. Durch eine detaillierte Aufzeichnung der Algorithmenprozesse gewinnen wir wertvolle Erkenntnisse, die nicht nur der Performance-Analyse dienen, sondern auch eine gezielte Weiterentwicklung und Fehlerminimierung ermöglichen.
- Die Gespräche über den Manipulator werden kontinuierlich fortgeführt, um sicherzustellen, dass alle wesentlichen Anforderungen umfassend erfasst werden. In diesen Meetings werden Fortschritte und neue Erkenntnisse regelmäßig überprüft und integriert. Der kontinuierliche Austausch ermöglicht es, auftretende Fragen schnell zu klären, verschiedene Sichtweisen einzubeziehen und kreative Lösungsansätze zu erarbeiten. Das Ziel besteht darin, ein detailliertes und präzises Lastenheft zu entwickeln, das den komplexen Anforderungen der Zerlegehalle entspricht.

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

Es kann zurzeit kein Bezug zu anderen Vorhaben hergestellt werden.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9449B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Prozessoptimierung für die Zerlegung von Großkomponenten	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2024 bis 30.09.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 130.627,52 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Ing. (FH) Torsten Wollermann	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> torsten.wollermann@ewn-gmbh.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Eine Herausforderung beim Rückbau kerntechnischer Anlagen besteht darin, metallische Strukturen wie den Reaktordruckbehälter mit Wandstärken von mehr als 100 mm zu trennen. Dabei können Konstellationen auftreten, bei denen mehrere Materialien schichtweise aneinander liegen, beispielsweise aufgrund von inneren Plattierungen. Vor diesem Hintergrund werden für die anstehenden Rückbauprojekte in Deutschland und langfristig auch international sichere und robuste Technologien zum Trennen benötigt. In diesem Kontext sind thermische Trennverfahren äußerst vielversprechend, da sie mit geringen Rückstellkräften arbeiten und die geforderten Wandstärken sicher und schnell durchtrennen können. Das Ziel dieses Projekts ist die Automatisierung des Vorschubprozesses der lichtbogenbasierten Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser in den Verfahrensvarianten Contact Arc Metal Grinding (CAMG) und Contact Arc Metal Cutting (CAMC). Ein Mitarbeiter bewegt dabei das Werkzeug manuell am Beckenrand mithilfe einer Halterung, die in solchen Anwendungsfällen üblicherweise bis zu 15 m tief ins Wasser ragt. Die Position, Kinematik und der Vorschub im Prozess hängen daher von der Qualifikation, Geschicklichkeit und Erfahrung des Bedieners sowie von den Möglichkeiten einer visuellen Prozessbeobachtung ab. Diese Vorgehensweise birgt große Risiken, insbesondere wenn der Lichtbogenbereich schlecht einsehbar ist, die Einschätzung des Bedieners nicht korrekt erfolgt ist oder andere unvorhergesehene Umstände (Kurzschlusskontakt, Klemmen der Elektrode etc.) auftreten. Eine zentrale Maßnahme zur Minimierung solcher Risiken besteht in der Prozessüberwachung mittels geeigneter Prozesssignale und einer entsprechenden Reaktion auf die jeweilige Prozesssituation. In diesem Zusammenhang können bei lichtbogenbasierten Fertigungsverfahren die Strom- und Spannungssignale im Prozess aufgezeichnet und analysiert werden. Dies ist für die zu untersuchenden Verfahren CAMG und CAMC ebenfalls möglich. Dieses Projekt zielt darauf ab, diese relevanten Daten zu generieren, zu interpretieren, nutzbar zu machen und im letzten Schritt vor dem Hintergrund der lichtbogenphysikalischen Zusammenhänge in ein Regelsignal für den automatisierten Vorschub beider Prozesse zu überführen. Dabei gibt es zwei Schwerpunkte. Zum einen die hochfrequenten Veränderungen der Signale, die Rückschlüsse auf die Ausbildung der Lichtbögen und damit auf die Prozessstabilität zulassen. Zum anderen kann bei einer langfristigen Betrachtung der Strom- und Spannungsverläufe eine Aussage über den Grad des Elektrodenverschleißes getroffen werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Die Durchführung des Projekts ist in vier Komplexe unterteilt. Komplex A fokussiert sich auf zentrale Aufgaben, die in enger Zusammenarbeit der beteiligten Partner bearbeitet werden. Dazu gehört unter anderem die Anlagentechnik, insbesondere bestehend aus Wasserbecken, Führungsmaschine und Stromquelle. Zusätzlich werden weitere Mock-ups entwickelt, die reale Anwendungsfälle simulieren. Der zweite Abschnitt von Komplex A behandelt die Erfassung und Verarbeitung von Prozessdaten, wobei der Schwerpunkt auf dem Algorithmus und der Steuerung liegt.

Die Bereiche B und C widmen sich der verfahrensspezifischen Auslegung und Untersuchung der Schneidprozesse CAMG und CAMC. Hierbei stehen die unterschiedlichen Prozessmerkmale im Vordergrund. Der abschließende Bereich D bündelt alle zuvor bearbeiteten Aufgaben, um die Ergebnisse für die Dokumentation aufzubereiten. Dieser Bereich stellt entscheidende Informationen zur Sicherstellung der Genehmigungsfähigkeit der Anlagentechnik und der damit verbundenen intelligenten Regelung bereit.

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

- Im Rahmen des Arbeitspakets A/1 wurden die Planungsansätze in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner dem Unterwassertechnikum Hannover (UWTH) für die Auslegung bzw. Ausführung des Wasserbeckens und der Manipulatoreinheit vertiefend bewertet, um den räumlichen Platzbedarf für die entsprechenden Mock-ups der Konstruktionsausschnitte von geplanten Reaktorkomponenten sicherzustellen. Dazu wurde die Zuarbeit der notwendigen Randbedingungen für die Erstellung des Pflichten- und Lastenheftes zur notwendigen Auslegung bzw. Darstellung der Konstruktionsdetails erarbeitet, um den beteiligten Unternehmen und Zulieferern grundlegende Anforderungen zu definieren bzw. in Absprache wichtige technische Aspekte festzulegen. Hierzu sind wichtige Schnittstellen bzw. Vorgaben hinsichtlich der verwendeten Netzwerktechnik, der notwendigen Auslegung geplanter Schalt- und Steuerungsequipment oder zu verbindende Konstruktionselemente zu berücksichtigen.
- In projektbezogener Zusammenarbeit zur Erstellung des Lastenheftes des geplanten Manipulators in der Zerlegehalle wurden notwendige Einsatzkriterien bewertet, spezifiziert und in einem Planungsansatz zur Detailbewertung implementiert. In dieser weiterführenden Bewertungsphase werden die grundlegenden Anforderungen und Spezifikationen zur Auslegungsgröße und Einsatzsicherung des Manipulators modelltechnisch dargestellt. Dabei wurden die spezifischen sowie operationalen Bedürfnisse der Zerlegehalle berücksichtigt, um sicherzustellen, dass der Manipulator optimal in den bestehenden Zerlegeprozessen integriert werden kann. Diese ersten Detailbewertungen sind essenziell, um die Erwartungen aller Stakeholder zu klären und eine klare Grundlage für die weitere Entwicklung des Lastenheftes zu schaffen. Durch die frühzeitige Identifikation von Schlüsselanforderungen und möglichen Herausforderungen wird der Weg für eine effiziente und zielgerichtete Planung und Umsetzung des Projektes weiterhin gesichert.
- Besichtigung der im Bau befindlichen Zerlegehalle zur Schnittstellenerörterung, Vorstellung der örtlichen Planungsansätze und anschließender Grundlagenvermittlung für das Arbeitspaket D/3.
- Begleitende Planungsaufgaben in den Arbeitspaketen B/1 und C/1, zur Implementierung der zu realisierenden Prozesstechnik (z. B. Befestigungsmöglichkeiten des Gesamtequipments, der erforderlichen Geräte- und Einrichtungen sowie der Betriebsmittel und Medienversorgung).
- Weiterführende Vorbetrachtungen und Vorplanungen zur Initialisierung von Mock-ups anlagenspezifischer Reaktorkomponenten (wie z. B. Reaktoreinbauten OKG, UKG usw.)

werden zur Simulation mit realen Konstruktionen im fernbedienten/fernhanterten Einsatzfall (unter Berücksichtigung der vorgeplanten Arbeitsbereiche, der Aufstellungsplanung, Schnittstellen- bzw. Kollisionsbetrachtung) projektbegleitend erarbeitet.

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

- Kontinuierliche Fortführung aller relevanten Projektthemen im Rahmen des Arbeitspaket A/1 zwischen allen beteiligten Akteuren (Projektpartnern) kontinuierlich fortgeführt, um ein fundiertes und umfassendes Konzept für die Anlagentechnik zu entwickeln. Dies erfordert die intensive und regelmäßige Projektabstimmung auf Grundlage technischer Entwicklungen und Neuerungen, um den Projektfortschritt zu festigen, Fortschritte zu koordinieren und eventuelle Herausforderungen frühzeitig zu adressieren. Durch die Förderung eines kollaborativen Umfelds und das Einbeziehen von Feedback aus den verschiedenen Fachbereichen können unterschiedliche Perspektiven berücksichtigt und innovative Lösungen erarbeitet werden. Ziel ist es, eine nahtlose Integration aller Systemkomponenten zu gewährleisten und ein effizientes, nachhaltiges und zukunftssicheres Anlagenkonzept zu etablieren, das den Anforderungen und Erwartungen aller Beteiligten gerecht wird.
- Die Diskussionen über den Manipulator werden kontinuierlich fortgesetzt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Anforderungen und technischen Spezifikationen im Detail erfasst werden. Im Rahmen dieser Gespräche werden sowohl Fortschritte als auch neue Erkenntnisse regelmäßig geprüft und integriert. Der fortlaufende Dialog ermöglicht es, auftretende Fragen zeitnah zu klären, unterschiedliche Perspektiven zu berücksichtigen und innovative Lösungsansätze zu entwickeln. Ziel ist es, ein umfassendes und präzises Lastenheft zu erstellen, dass den komplexen Anforderungen der Zerlegehalle gerecht wird und eine erfolgreiche Implementierung des Manipulators gewährleistet.

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

Es kann zurzeit kein Bezug zu anderen Vorhaben hergestellt werden.

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

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9449C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Kjellberg Finsterwalde Schweißtechnik und Verschleißschutzsysteme GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels K1-Methoden (AutArc) TP: Inverterstromquelle	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2024 bis 30.09.2028	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 168.648,02 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Michael Schnick	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> m.schnick@kjellberg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Als eines der führenden Unternehmen im Bereich der thermischen Materialbearbeitung verfügen wir über das erforderliche Know-how für lichtbogenbasierte Schweiß- und Schneidverfahren sowie deren Anlagentechnik. Eine unserer Kompetenzen ist dabei die Entwicklung und Herstellung von kundenspezifischen Stromquellen zur Energieversorgung der Prozesse. Wir entwickeln begleitend zu den Arbeiten des Instituts für Werkstoffkunde diesen Teil der CAMG- und CAMC-Prozesse weiter. Im Gegensatz zu einem Schweißverfahren, bei dem im Idealfall ein möglichst konstanter Lichtbogen über eine gewisse Zeit aufrechterhalten wird, entstehen bei den hier genutzten thermischen Trennverfahren eine hohe Anzahl an Lichtbögen sowie Lichtbogenabrisse und Kurzschlüsse durch die Bewegung der Schneideelektroden. Dies erhöht die Belastung der Stromquelle durch ein vermehrtes Auftreten von Kurzschläßen und ein häufiges Neuzünden des Lichtbogens. Die Entwicklung

erfolgt vor dem Hintergrund der Neuentwicklung von Inverter-Stromquellen für das UP-Schweißen, um aktuellen Marktentwicklungen Rechnung zu tragen. Um die zukünftige Verfügbarkeit von Stromquellen auch für die Elektrokontaktbearbeitung sicherzustellen, wird nun das Modifizierungspotenzial in den Fokus gerückt, um eine prozessangepasste Variante entwickeln zu können. Die Weiterentwicklung kann unter Beachtung aller Randbedingungen der Prozesse und vor dem Hintergrund möglicher technischer oder regulatorischer Randbedingungen durch den Anwendungsfall im kerntechnischen Rückbau erfüllt werden.

Zur Erfüllung der Aufgaben werden ein Entwicklungsingenieur zur technischen Entwicklung der Anlagentechnik und zeitweise ein Projektleiter zur Koordinierung der Modifikation der Invertertechnik eingesetzt. Diese arbeiten eng mit den anwendungstechnischen Experten von EWN und den prozesstechnischen Experten des IWs zusammen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

In Kooperation mit dem Institut für Werkstoffkunde erfolgt die Entwicklung und der Aufbau einer automatisierbaren Schneidanlage für die CAMG- und CAMC-Technologie. Die Begleitung dieses Prozesses erfolgt aus der lichtbogenphysikalischen Perspektive, wobei die Entwicklung der notwendigen Stromquelle erfolgt. Diese kann perspektivisch im kerntechnischen Rückbau eingesetzt werden. Dafür ist eine Mitarbeit in einem Komplex des Projektes vorgesehen. In diesem Rahmen erfolgt die Mitarbeit an zwei Arbeitspaketen:

A/2 Auslegung der Stromquelle: Erstellung eines Lastenheftes sowie Entwicklung der benötigten Komponenten unter Berücksichtigung aller Randbedingungen für den CAMG- und den CAMC-Prozess

A/3 Herstellung und Überprüfung der Stromquelle: Fertigung, Qualitätssicherung und Testen der Stromquelle auch unter Prozessbedingungen, inklusive der vom IW entworfenen Prozesstechnik

### 3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten A/2 und A/3)

Im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten zur Auslegung der Stromquelle (A/2) planmäßig fortgesetzt und in mehreren zentralen Teilbereichen erfolgreich abgeschlossen. Bereits im vierten Quartal 2024 konnte die grundlegende Konzeptionierung der Stromquelle abgeschlossen und ein entsprechendes Lastenheft erstellt werden. Parallel hierzu erfolgte die Auslegung des Inverter-Moduls sowie die strukturelle Planung des Gehäuses der Stromquelle – beides wurde technisch und funktional spezifiziert und erfolgreich abgeschlossen.

Im ersten Quartal 2025 lag der Fokus auf der Validierung und Weiterentwicklung der initial ausgelegten Komponenten. So wurde das Inverter-Modul erfolgreich getestet und anhand der Ergebnisse optimiert. Zudem erfolgte die Entwicklung erster Musterteile für das Stromquellen-Gehäuse, womit die mechanische Machbarkeit und Integrationsfähigkeit überprüft wurde. Parallel dazu wurde mit der Auslegung der Stromquellenkomponenten (SQK) – insbesondere Drosseln, Netzteile, Schütze und Relais – ein wesentlicher Schritt zur funktionalen Differenzierung der Baugruppen abgeschlossen.

Im zweiten Quartal 2025 wurde aufbauend auf den vorliegenden Ergebnissen die Hauptsteuerleiterkarte ausgelegt, womit die zentrale Steuerungseinheit der Stromquelle in die Entwicklungsphase überführt werden konnte. Zeitgleich erfolgte der mechanische Aufbau des Stromquellen-Gehäuses unter Berücksichtigung der zuvor entwickelten Musterteile sowie der thermischen, elektrischen und mechanischen Anforderungen. Abschließend wurde die Entwicklung und der prototypische Aufbau der SQK-Komponenten erfolgreich abgeschlossen, was eine solide Grundlage für die anstehenden Funktionstests schafft.



Stromquellengehäuse



Invertermodul



Schweißdrossel



24 V DC Versorgung



44 V AC Versorgung



Eingangsglättungsdrösseln



Klemmleiste

#### 4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten A/2 und A/3)

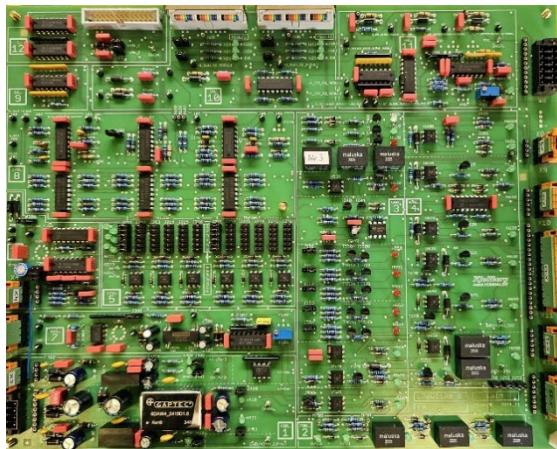
Im dritten Quartal 2025 wird die begonnen Entwicklung der Hauptsteuerleiterkarte weitergeführt; der Aufbau ist derzeit in Bearbeitung. Zudem stehen umfangreiche Tests des Stromquellen-Gehäuses an, bei denen die Robustheit unter Fall-, Wärme- und Feuchtigkeitsbelastung überprüft wird. Parallel dazu sind erste Funktionstests der SQK-Komponenten vorgesehen, insbesondere im Hinblick auf ihr Zusammenspiel in der Systemumgebung (noch offen).

Für das vierte Quartal 2025 sind weitere Integrationstätigkeiten geplant. Neben dem Test der Hauptsteuerleiterkarte wird die Auslegung relevanter Schnittstellen (sowohl konventionelle als auch BUS- und Parallelverbindungen) erfolgen, um eine flexible Systemanbindung sicherzustellen. Zudem wird die Option eines Parallelbetriebs analysiert und ausgelegt, um zukünftige Anforderungen an Skalierbarkeit und Redundanz zu erfüllen.

Ab dem ersten Quartal 2026 wird mit der Umsetzung des Arbeitsschwerpunkts A/3 – Herstellung und Überprüfung der Stromquelle begonnen. Zentrale Aufgaben sind der Aufbau der Gesamteinheit der Stromquelle, gefolgt von einer umfassenden Funktionsüberprüfung aller Module im Zusammenspiel. Abschließend erfolgt die Ausrichtung der Stromquelle auf das CAMC-System, um die Kompatibilität mit der vorgesehenen Einsatzumgebung sicherzustellen.

#### Fazit:

Der Entwicklungsstand der Stromquelle zeigt einen strukturiert umgesetzten Fortschritt entlang der geplanten Arbeitsschritte. Die Auslegung wesentlicher Komponenten ist abgeschlossen, erste Prototypen wurden gefertigt und getestet. Die begonnene Validierung der Systembausteine stellt sicher, dass die folgenden Arbeitsschritte – insbesondere die Systemintegration und Inbetriebnahme – auf einer tragfähigen technischen Grundlage aufbauen.



**Hauptsteuerleiterkarte**

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

Einen Bezug zu anderen Vorhaben gibt es derzeitig nicht.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Es sind weder Berichte noch Veröffentlichung seitens Kjellberg geplant.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9450A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung einer Laserablationsprozesses zur effektiven Zerstörung von Oberflächenschichten	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2024 bis 31.10.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.053.573,45 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> hartmut.krause@iwtt.tu-freiberg.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Projekt Emilia soll die thermische Zersetzung der Beschichtungen im Laser-Plasma eines Hochleistungs-Impuls-Lasers untersucht und der gesamte Ablationsprozess hinsichtlich der Reaktionsbedingungen im Plasma zur Senkung der Emissionen optimiert werden. Es werden die Kriterien zur Sicherstellung der Abtragsqualität festgelegt und ein Inline-Analysenverfahren zur Vollständigkeit Abtrages in den Arbeitskopf integriert.

Die Schwerpunkte liegen dabei auf der

- 1) Optimierung des Laser-Ablationsprozesses hin zur effektiven Zerstörung der Gefahrstoffe mit einem Lasersystem, dass sowohl für Beton- als auch Metallsubstrate geeignet ist,
- 2) Vermeidung der unkontrollierten Freisetzung von belasteten Gasen, Aerosolen und Partikeln,
- 3) Implementierung einer Automatisierungslösung zur Reduzierung der Strahlungsbelastung des Bedienpersonals,
- 4) Miniaturisierung, Weiterentwicklung und Integration eines infrarotbasierten Lackdetektionsverfahrens zur Sicherstellung des vollständigen Lackabtrages.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP1: Detaillierte Analyse der Randbedingungen an Kraftwerksstandorten
- AP2: Untersuchung der Reaktionen im Plasma eines Hochleistungs-Impuls-Lasers
- AP3: Simulation der Strömungsverhältnisse und Reaktionen im Laser-Plasma
- AP4: Detektion des Ablationserfolges und Bestimmung der Restschichtdicke
- AP5: Entwicklung und Bau eines Demonstrators für die Laser-Ablation
- AP6: Erprobung und Nachweis der Funktion an ausgewählten Proben im Labormaßstab
- AP7: Nachweis der Praxistauglichkeit der Laser-Ablation im Feldversuch in einer kerntechnischen Anlage
- AP8: Evaluierung und Aufbereitung der Ergebnisse für die Projektdokumentation

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

- AP1: Im Rahmen des Kick-Off-Meetings wurden die allgemeinen Rahmenbedingungen abgestimmt. Die Abstimmung wurde in regelmäßigen Videokonferenzen fortgeführt und darauf aufbauend werden die Anforderungen im Pflichtenheft kontinuierlich weiterentwickelt.

AP2: Die Beschaffung des Ablationslasers wurde abgeschlossen und das System getestet. Mit dem Umbau des Versuchsstandes wurde begonnen. Im Rahmen der Literaturrecherche wurde geeignete Messtechnik für die Untersuchungen von Abgasen und Laser-Plasma identifiziert und in der Planung des Versuchsstandes berücksichtigt.

AP3: Für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse im Arbeitskopf werden unterschiedliche Konzepte diskutiert und Daten zu bisherigen Ausführungen der Arbeitsköpfe ausgewertet. Hierfür wurden Simulationen zum Partikeltransport und der Strömungsverhältnisse in mehreren Arbeitskopfvarianten erstellt. Gegenwärtig läuft die Auswertung und Optimierung.

AP4: Im Rahmen der fortlaufenden Literaturrecherche wurde der aktuelle Stand der Technik bei der aktiven Thermografie identifiziert und ein Konzept für die Integration in den Versuchsstand entwickelt. Mit der Planung der Versuche wurde begonnen.

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

AP2: Der Bau des Versuchsstandes für die Laserablation soll im kommenden Berichtszeitraum weitestgehend abgeschlossen werden. Die Inbetriebnahme des Versuchsstandes ist geplant. Mit den ersten Versuchen soll begonnen werden.

AP3: Die gesammelten Erkenntnisse über die Strömungszustände und das Verhalten des Partikeltransports in den simulierten Arbeitsköpfen, sollen anschließend in ein geschlossenes Konzept für ein neues Design überführt werden. Dieses wird dann über dieselben Methoden auf seine Wirksamkeit überprüft. Es sind mehrere Iterationsschritte in der Entwicklung vorgesehen.

AP4: Aufbau des Versuchsstandes und des Detektionsverfahrens wird fortgesetzt. Im Rahmen von umfangreichen Versuchen sollen das Verfahren an eine kleinformatige IR-Kamera, welche in den Laser-Arbeitskopf integriert werden kann, angepasst werden.

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

Im Rahmen des Kick-off-Meetings (09.01.2025) fand eine ausführliche Diskussion zu den Schnittstellen und Synergieeffekten mit Projekt ARRIVE statt. Im Pflichtenheft wird auf diese Schnittstellen Bezug genommen. In den regelmäßigen Videokonferenzen ist der Informationsaustausch mit dem Projekt ARRIVE fester Agendapunkt.

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

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9450B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> WSM Weber Schweißmaschinen GmbH, Zeppelinstr. 4, 35418 Buseck	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP WSM: Entwicklung eines Demonstrators zur Laserablation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2024 bis 31.10.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 119.362,80 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl. Ing. Karl Martin Weber	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> m.weber@weber-schweissmaschinen.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Projekt Emilia soll die thermische Zersetzung der Beschichtungen im Laser-Plasma eines Hochleistungs-Impuls-Lasers untersucht und der gesamte Ablationsprozess hinsichtlich der Reaktionsbedingungen im Plasma zur Senkung der Emissionen optimiert werden. Es werden die Kriterien zur Sicherstellung der Abtragsqualität festgelegt und ein Inline-Analysenverfahren zur Vollständigkeit Abtrages in den Arbeitskopf integriert.

Die Schwerpunkte liegen dabei auf der

- 1) Optimierung des Laser-Ablationsprozesses hin zur effektiven Zerstörung der Gefahrstoffe mit einem Lasersystem, dass sowohl für Beton- als auch Metallsubstrate geeignet ist,
- 2) Vermeidung der unkontrollierten Freisetzung von belasteten Gasen, Aerosolen und Partikeln,
- 3) Implementierung einer Automatisierungslösung zur Reduzierung der Strahlungsbelastung des Bedienpersonals,
- 4) Miniaturisierung, Weiterentwicklung und Integration eines infrarotbasierten Lackdetektionsverfahrens zur Sicherstellung des vollständigen Lackabtrages.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP1: Detaillierte Analyse der Randbedingungen an Kraftwerksstandorten  
 AP2: Untersuchung der Reaktionen im Plasma eines Hochleistungs-Impuls-Lasers  
 AP3: Simulation der Strömungsverhältnisse und Reaktionen im Laser-Plasma  
 AP4: Detektion des Ablationserfolges und Bestimmung der Restschichtdicke  
 AP5: Entwicklung und Bau eines Demonstrators für die Laser-Ablation  
 Das Teilprojekt von WSM zielt auf die Entwicklung eines Arbeitskopfes mit einer integrierten bildgebenden Überwachungslösung zur Kontrolle des Ablationserfolges sowie eine arbeitskopfnahe Filtertechnologie. Das System wird so kompakt aufgebaut, dass eine Implementierung in eine autonome Roboterplattform möglich ist. Das System wird in einem Demonstrator umgesetzt. WSM wird zusätzlich den Einsatz für sekundärabfallfreie Reinigungsverfahren in Fertigungsstraßen untersuchen und Scale-up-Optionen entwickeln.  
 AP6: Erprobung und Nachweis der Funktion an ausgewählten Proben im Labormaßstab  
 AP7: Nachweis der Praxistauglichkeit der Laser-Ablation im Feldversuch in einer kerntechnischen Anlage  
 AP8: Evaluierung und Aufbereitung der Ergebnisse für die Projektdokumentation

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

AP1: Im Rahmen des Kick-Off-Meetings wurden die allgemeinen Rahmenbedingungen abgestimmt. Die Abstimmung wurde in regelmäßigen Videokonferenzen fortgeführt und darauf aufbauend wurden und werden die Anforderungen im Pflichtenheft kontinuierlich weiterentwickelt.

AP2: Die Beschaffung des Lasers in Freiberg wurde durch WSM verfolgt und die Vorbereitung für die Aufgaben mit dem Konti Laser geplant.

AP3: In Freiberg wurden für die Strömungsverhältnisse im Arbeitskopf unterschiedliche Konzepte diskutiert und Daten zu bisherigen Ausführungen der Arbeitsköpfe ausgewertet. Da der Konti Laser einen wesentlich höheren Fokussierabstand hat, wurde durch WSM untersucht, wie hier eine Absaugung aussehen könnte.

AP5: In diesem Arbeitsprogramm fanden in den ersten Projektmonaten des Jahres 2025 keine Maßnahmen statt.

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

AP3: Die gesammelten Erkenntnisse über die Strömungszustände und das Verhalten des Partikeltransports in den simulierten Arbeitsköpfen, sollen anschließend in ein geschlossenes Konzept für ein Design überführt werden. Dieses wird dann über dieselben Methoden auf seine Wirksamkeit überprüft. Möglicherweise werden mehrere Iterationen in der Entwicklung notwendig.

AP5: WSM hat die Laboruntersuchungen, die Anforderungen an den Demonstrator und die Automatisierungslösung in der Phase 1 ab Anfang 2025 technisch begleitet. Der Schwerpunkt der Arbeiten von WSM liegt aber in Phase 2 ab dem 4. Quartal 2025, aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen aus AP 1 bis AP 4.

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

keine

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

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9444A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung eines Beprobungssystems inklusive qualitätsgesichertem Beprobungsverfahren für nicht zugängliche Bereiche (BERO) TP: Aufbau eines Versuchstandes und Untersuchungen zu möglichen Beprobungs- und Ausbauoptionen von Rohrleitungen inkl. Entwicklung eines qualitätsgesichertem Beprobungsverfahrens	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2023 bis 30.09.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 739.596,87 (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 Beprobungssystems inklusive qualitätsgesichertem Beprobungsverfahren für nicht zugängliche Bereiche (Bero)“ in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der IBASS GmbH ist die Entwicklung eines Systems, welches die bis zu 1,2 m tief im Stahlbeton liegenden Kunststoffrohre (8-15 cm Durchmesser; Polypropylen) der Leitungssysteme der Gebäudeentwässerung von Leistungsreaktoren beproben kann. Das primäre Ziel ist die Freigabe dieser Rohre in Einbaulage, damit die Bodenplatte als Gesamtsystem zurückgebaut werden kann. Um eine solche Beprobung durchführen zu können ist es von wesentlicher Bedeutung, dass das zu entwickelnde System einen definierten Abtrag an einer genauen Position erzielen und das gesamte Material einsammeln und unverfälscht zur Messung transportieren kann. Des Weiteren soll in diesem Vorhaben untersucht werden, wie und ob ein effizienter Ausbau der betroffenen Rohre, ohne die umgebende Betonstruktur abbauen zu müssen, möglich wäre, falls eine Freigabe in Einbaulage nicht erteilt werden kann.

Damit diese Ziele des Verbundvorhabens erreicht werden können, müssen Versuchsstände aufgebaut und Untersuchungen zu Beprobungs- sowie Ausbauoptionen durchgeführt und analysiert werden. Ebenso muss ein qualitätsgesichertes Beprobungsverfahren entwickelt sowie ein innovatives Trägersystem inklusive Beprobungs- und Ausbaukopf für diese nicht zugänglichen Bereiche konstruiert und hergestellt werden. Das entwickelte System wird dabei so konzipiert, dass es fernhantiert die Rohrleitungen befahren kann, die exakten Daten für die Beprobung (Position, Abtragsdicke, Materialmenge, Abtraggeometrie, etc.) einzustellen sind und das abgetragene Material vollständig abtransportiert werden kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP0: Projektbegleitende Beratung
- AP1: Grundlagenanalyse und Recherche geeignetes Abtragsverfahren
- AP2: Prozessanalyse und Lastenheft
- AP3: Aufbau Versuchstand inklusive Analysesensorik
- AP4: Entwicklung und Konstruktion Trägersystem inklusive Befestigungssystem

- AP5: Experimentelle Versuchsreihen 1
- AP6: Herstellung Trägersystem und Vorplanung Beprobungs- und Ausbaukopf
- AP7: Experimentelle Versuchsreihen 2
- AP8: Konstruktion finaler Beprobungs- und Ausbaukopf inklusive Herstellung und Zusammenführung aller Komponenten
- AP9: Umbau Versuchstand TMB
- AP10: Praktische Versuchsreihe mit Prototyp
- AP11: Dokumentation

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

Der entwickelte Versuchsstand wurde fertiggestellt, die zugehörige Sensorik (für Kräfte- und Hitzeentwicklung, elektrostatische Aufladung, Laserscans) wurde verbaut und kalibriert, sowie die Programmierung für die Datenaufnahme und Datenverarbeitung erfolgreich in Betrieb genommen. Somit wurde AP3 abgeschlossen. Es wurden verschiedene Versuchsreihen mit unterschiedlichen Werkzeugen (wie Hobeln, Meißeln, Fräsen, Hohlklingen, etc.), sowie unterschiedlichen Ausführungen (Schneidwinkel, Schneidmaterial) durchgeführt (AP5). Die Ergebnisse sind in die Konstruktion eines Beprobungswerkzeugs eingeflossen, welches als 3D-Druck bereits analysiert und getestet wurde und so über mehrere Iterationsschritte Stück für Stück verbessert wurde (AP5 und AP6). Die Optimierungsschritte lagen größtenteils im Bereich der Klingenpositionierung und Halterung, der Planung der Spanaufnahme bzw. Abfuhr, das Einbringen von Heizpatronen, um den Abtrag zu verbessern, sowie der Stabilitätsverbesserung der Führungselemente der Klinge.

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

Das aktuelle Beprobungswerkzeug soll weiter optimiert werden (AP5 und AP6). Zudem werden weiterhin kommerzielle Werkzeuge verschiedener Art (Sägeblätter, Fräser, Hohlklingen, etc.) getestet (AP7). Ein funktionsfähiger Prototyp des Beprobungswerkzeuges soll angefertigt werden und ersten Tests unterzogen werden (AP7 und AP8).

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

Keine

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

Das Projekt sowie die ersten Ergebnisse werden im September auf der KONTEC 2025 präsentiert.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 31.07.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9444B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> IBASS GmbH & Co.KG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Entwicklung eines Beprobungssystems inklusive qualitätsgesichertem Beprobungsverfahren für nicht zugängliche Bereiche (BERO) TP: Konstruktion und Herstellung eines innovativen Trägersystems inkl. Beprobungs- und Ausbaukopf für Rohrleitungen in nicht zugänglichen Bereichen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2023 bis 30.09.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 148.191,00 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-HTL-Ing. Michael Strasser	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> mstrasser@ibass.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel im Verbundvorhaben „Entwicklung eines Beprobungssystems inklusive qualitätsgesichertem Beprobungsverfahren für nicht zugängliche Bereiche (Bero)“ in Kooperation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und der IBASS GmbH & Co.KG ist die Entwicklung eines Systems, welche die bis zu 1,2 m tief im Stahlbeton liegenden Kunststoffrohre (8-15 cm Durchmesser) aus Polypropylen der Leitungssysteme der Gebäudeentwässerung von Leistungsreaktoren beproben kann. Das primäre Ziel ist die Freigabe dieser Rohre in Einbaulage, damit die Bodenplatte als Gesamtsystem zurückgebaut werden kann. Um eine solche Beprobung durchführen zu können ist es von wesentlicher Bedeutung, dass das zu entwickelnde System einen definierten Abtrag an einer genauen Position erzielen und das gesamte Material einsammeln und unverfälscht zur Messung transportieren kann. Des Weiteren soll in diesem Vorhaben untersucht werden, wie und ob ein effizienter Ausbau der betroffenen Rohre, ohne die umgebende Betonstruktur abbauen zu müssen, möglich wäre, falls eine Freigabe in Einbaulage nicht erteilt werden kann.

Damit diese Ziele des Verbundvorhabens erreicht werden können, müssen Versuchsstände aufgebaut und Untersuchungen zu Beprobungs- sowie Ausbauoptionen durchgeführt und analysiert werden. Ebenso muss ein qualitätsgesichertes Beprobungsverfahren entwickelt werden. Zudem muss ein innovatives Trägersystem inklusive Beprobungs- und Ausbaukopf für diese nicht zugänglichen Bereiche konstruiert und hergestellt werden. Das entwickelte System wird dabei so konzipiert, dass es fernhantiert die Rohrleitungen befahren kann, die exakten Daten für die Beprobung (Position, Abtragsdicke, Materialmenge, Abtraggeometrie, etc.) einzustellen sind und das abgetragene Material vollständig abtransportiert werden kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP0: Projektbegleitende Beratung
- AP1: Grundlagenanalyse und Recherche geeignetes Abtragsverfahren
- AP2: Prozessanalyse und Lastenheft
- AP3: Aufbau Versuchstand inklusive Analysesensorik
- AP4: Entwicklung und Konstruktion Trägersystem inklusive Befestigungssystem
- AP5: Experimentelle Versuchsreihen 1
- AP6: Herstellung Trägersystem und Vorplanung Beprobungs- und Ausbaukopf
- AP7: Experimentelle Versuchsreihen 2
- AP8: Konstruktion finaler Beprobungs- und Ausbaukopf inklusive Herstellung und Zusammenführung aller Komponenten
- AP9: Umbau Versuchstand TMB
- AP10: Praktische Versuchsreihe mit Prototyp
- AP11: Dokumentation

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

### 3.1 Auswahl des Werkzeuges

Nachdem die Konstruktion des Fahrwagens und des Absaugmoduls abgeschlossen wurde (AP4) wurde schnell klar, dass hier kein Werkzeug zum Einsatz kommen kann, dass sehr hohe Kräfte entwickelt, die dann vom Roboter System aufgenommen werden müssen, wie z.B. ein Drehmeißel.

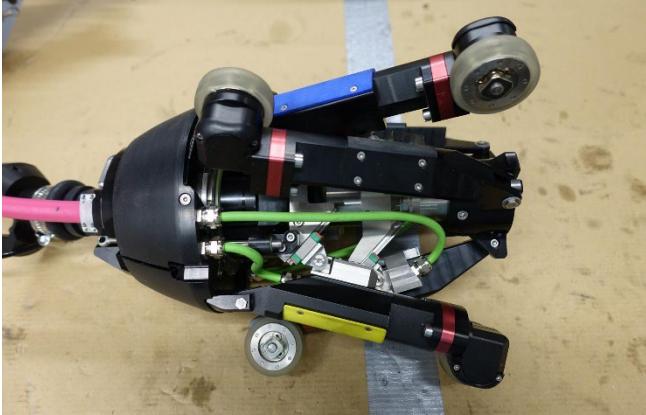
In der Besprechung vom 05.03.2025 mit dem KIT hat IBASS den Vorschlag gemacht ein Werkzeug zu entwickeln, dass mit Temperatur und einem Schneidwerkzeug funktioniert, um einen definierten Abtrag zu erreichen. Dies ermöglicht eine kleine Bauweise des Roboters und es fallen keine elektrostatisch aufgeladenen Kunststoffspäne an. Ein weiterer Vorteil ist, dass man sich wahrscheinlich die Absaugeinheit sparen kann und man auch immer eine definierte und qualifizierte Probeentnahme durchführen kann.

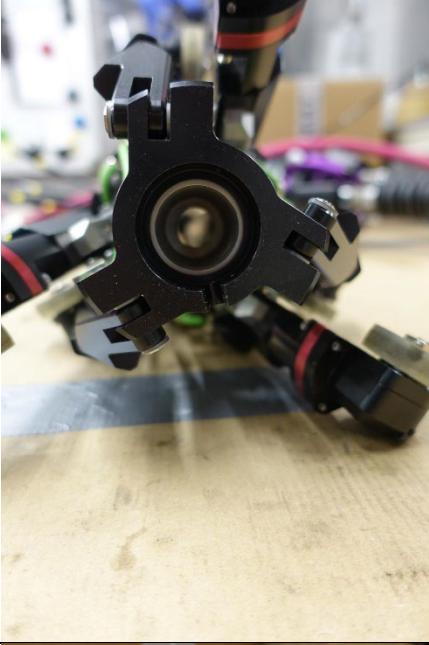
Das KIT arbeitet derzeit an dieser Lösung, bitte lesen Sie dazu deren Bericht des ersten Halbjahres 2025.

### 3.2 Montage des 150er Roboters mit Absaugeinheit

IBASS hat wie beschrieben den entwickelten Fahrwagen mit Absaugeinheit von Januar bis Juni montiert und getestet (AP4 und AP5).

Siehe hierzu die Bilder unten.

	Fahrwagen für die Abmessung von 150 bis 230mm
---	---

	Ansicht der Hohlwelle und des Anschlussflansches
	Absaugwagen
	Absaugarm mit Bürsteneinheit

### 3.3 Erfahrungen mit der 150er Roboter Konstruktion

Die Konstruktion ist sehr gut gelungen, jedoch mit einem sehr großen Aufwand in der Fertigung der Bauteile. Man kann feststellen, dass die Zugkräfte des Fahrwagens mit 700N ausreichend sind, um alle Bauteile Axial im Rohr zu bewegen, sowie auch den Absaugwagen hinterherzuziehen.

Jedoch macht die Absaugung mit den vielen Schläuche und zusätzlichen Kabeln eine Verkleinerung auf die Zielabmessung von 80 bis 150mm unmöglich. Das ist auch der Grund,

wieso IBASS die neue Art des Werkzeuges vorgeschlagen hat. Es vereinfacht vieles und macht es zudem für die spätere Vermarktung viel günstiger.

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

IBASS wird an der Miniaturisierung des Roboters weiterarbeiten (AP4) und anhand der parallel am KIT durchgeführten Versuchsreihen und Ergebnisse (siehe hierzu HJB 2025 I KIT), die Getriebe und Motoren hierauf auslegen, sowie ein geeignetes Fahrwerk konstruieren. Derzeit geht IBASS davon aus, dass es ein selbstfahrendes Probenahmewerkzeug geben wird, und ein Fahrwagen, der den axialen Vortrieb für das Werkzeug definiert sicherstellt. Am 30.07.2025 wird Hr. Strasser von IBASS zum KIT fahren und vor Ort das gefertigte Werkzeug begutachten und testen, um in der eigenen Konstruktion weiterzuarbeiten.

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

Keine

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

Derzeit stehen dazu von Seiten IBASS keine Aktivitäten an.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9447A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE) TP: Berechnungen der Aktivitätsverteilung in reaktorfernen Räumen auf Basis von Neutronenfluenzrechnungen und Experimenten	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2024 bis 30.09.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.355.099,91 €
<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 Verbundprojektes EBENE ist es, mit Hilfe von experimentell gestützten Neutronenfluenzrechnungen die zu erwartenden Aktivitäten durch Aktivierungsreaktionen, die im Leistungsbetrieb aufgetreten sein können, in den Räumen außerhalb des Tragschildes zu bestimmen. Das heißt, dass die Fluenzrechnung auf Basis experimenteller Werte, die aus dem abgeschlossenen FORKA-Projekt EMPRADO zur Verfügung stehen, neu skaliert wird und mit den angepassten Werten die Aktivierung in den umgebenden Wänden und Komponenten des ersten Kreislaufes neu bestimmt wird. Für die Berechnungen werden international anerkannte Codes genutzt. Die Modelle werden durch gezielte Aktivierungsversuche an Referenzquellen validiert.

Zur Validierung der Ergebnisse werden Beton- und Stahlproben aus einem abgeschalteten deutschen Referenzkraftwerk entnommen und deren exakte Zusammensetzung und Aktivität experimentell bestimmt. Sollte es sich zeigen, dass Rechnung und Messung gut übereinstimmen, könnte dieser Ansatz komplementär zur bisherigen Strategie einer engen Beprobung der Anlagenräume sein und eine enorme Reduktion von Zeit und Kosten bedeuten.

Für eine zusätzliche Validierung sollen vergleichbare nicht aktivierte Betonproben aus dem Referenzkraftwerk mit Neutronen aus einer definierten Quelle bestrahlt und die entstandenen Aktivitäten experimentell bestimmt werden. Durch den Vergleich kann auf den Neutronenfluss in den aktiven Proben geschlossen werden, und es können mögliche spektrale Einflüsse quantifiziert werden.

Außerdem wird untersucht, wie sich die Beton- und Metallzusammensetzung der einzelnen KKW und damit die Aktivierung unterscheidet. Für Vergleiche stehen experimentelle Werte aus den FORKA-Projekten WERREBA und KOBEKA zur Verfügung.

Wichtiges Ziel ist der Erhalt nuklearer Kompetenz und die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Deshalb werden im Projekt neben den geplanten Dissertationen auch mehrere studentische Abschlussarbeiten angefertigt. Ebenso fließen Inhalte des Projektes in die universitäre Lehre ein.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

## AP 1: Rekursive Berechnung von Neutronenfeldern

Aufbauend auf dem Modell aus dem Projekt EMPRADO wird dieses auf die jetzige Aufgabenstellung zugeschnitten, geometrisch erweitert und mit inneren Messwerten validiert. Auf Basis der äußeren Messungen wird das Modell weiter modifiziert und optimiert.

## AP 3: Experimentelle (radio-)chemische und strukturelle Charakterisierung der Materialproben

Die genommenen Proben werden umfassend analysiert. So wird die Zusammensetzung und Aktivität der Proben qualitativ und quantitativ bestimmt. Außerdem erfolgt eine strukturelle Charakterisierung der Materialien.

## AP 4: Validierung der Fluenzrechnungen auf Basis experimentell bestimmter Aktivitäten

Mit dem modifizierten Modell werden Neutronenfluenzen und die daraus resultierenden Aktivitäten an den Probenpositionen berechnet und mit den experimentellen Werten verglichen. Entsprechende Sensitivitätsanalysen und Untersuchungen zur Übertragbarkeit auf andere Konvoi-KKW werden durchgeführt.

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

AP 1: Im Rahmen eines gastwissenschaftlichen Aufenthaltes bei der NAGRA (Schweiz) wurde die dort seit 20 Jahren entwickelte und erprobte Methodik zur Berechnung der Aktivierung von KKW-Strukturen erlernt und angewandt, so ist bspw. eine Quelle für die Simulation entwickelt worden, die eine Brennelement (BE)-weise homogenisierte Quellverteilung abbildet und als Basis für eine schrittweise detailweise Annäherung an die reale Quelle zur Reduktion des Berechnungsaufwandes für folgende Simulationen dient.

Für die Erweiterung des bestehenden Modells des (Vor-)Konvoi-Reaktors um die Strukturen in den Räumen des Primärkreislaufs (PK) wurde bereits ein Konzept erarbeitet und die ersten Betonstrukturen im Modell erstellt.

AP 3: Das im November 2024 begonnene 6-monatige Auslaugungsexperiment an Testproben aus dem KKW Greifswald wurde abgeschlossen und die Daten ausgewertet. Es wurde festgestellt, dass die für den Rückbau in Bezug auf den Strahlenschutz relevanten Elemente Co, Eu und Ba im Beton bis zu 1 % unter dynamischen Bedingungen (Auslaugungslösung wurde ausgewechselt) ausgelaugt wurden.

Für die Abtrennung von  $^{36}\text{Cl}$  und  $^{41}\text{Ca}$  aus der Betonmatrix wurde ein Schema für die Aufbereitung der Proben entwickelt und anschließend optimiert. Während des dreimonatigen Forschungsaufenthalts an der Technical University of Denmark (DTU) wurde die Abtrennung von  $^{36}\text{Cl}$  von isobaren und anderen Interferenzen weiter optimiert. Das Verfahren wurde so angepasst, dass es auch im Kontrollbereich vom HZDR ausgeführt werden kann.

Es wurden inaktive Beton- und Metallproben aus dem deutschen Referenz-KKW entnommen, aufbereitet und ihre elementare und mineralische Zusammensetzung bestimmt.

AP 4: Anhand eines vereinfachten Modells eines WWER-1000-Reaktors wurden bereits erste Vergleiche zwischen zwei etablierten Simulationscodes (MCNP6.3 und SERPENT2.2.1), inkl. der Effizienz der inkludierten varianzreduzierenden Methodiken, durchgeführt. Dies diente der Ermittlung des bestgeeigneten Codes für die weiterführenden Untersuchungen und Simulationen zur Ermittlung der Fluenzverteilungen und Aktivierungsrechnungen mit dem bestehenden Modell eines (Vor-)Konvoi.

Das SERPENT-Modell wurde weiterentwickelt, so dass erste Testberechnungen durchgeführt werden konnten, um die Aktivität von Proben in unmittelbarer Nähe des Reaktorkerns zu bestimmen. Die Berechnungen wurden mit verschiedenen Optionen der Quellendarstellung

(Kassetten-weise, detaillierter BEweise als in MCNP, und Hybrid) ausgeführt sowie in SERPENT verfügbare Optionen zur Varianzreduktionsberechnung wurden variiert und getestet.

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

AP1: Erweiterung des bestehenden Modells des (Vor-)Konvoi-Reaktors auf die Strukturen in den Räumen des Primärkreislaufs (PK) und Berechnung einer Oberflächenquelle für die Fluenzrechnungen außerhalb des Tragschildes.

AP3: Die ausgelaugten Proben werden mittels Pulverröntgendiffraktometrie (XRD), Mikrotomographie und Quecksilber-Intrusionsporosimetrie vollständig charakterisiert, um die strukturellen Veränderungen zu erfassen und zu quantifizieren.

Die Probenaufbereitung für die Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS) zur Messung von  $^{36}\text{Cl}$  wird abgeschlossen. Außerdem wird ein radiochemisches Trennungsverfahren für die Messung von  $^{41}\text{Ca}$  mit AMS entwickelt und optimiert und an Testproben aus dem KKW Greifswald untersucht.

AP4: Nutzung des vereinfachten WWER-1000-Modells zur Untersuchung der optimalen Definition von Oberflächenquellen zur späteren Anwendung am (Vor-)Konvoi-Modell. Fertigstellung der Erweiterungen des Modells um die Strukturen der Räume des PK.

Das SERPENT Modell wird als Kopie des MCNP Modells in Bezug auf alle Strukturelemente innerhalb des Reaktorbehälters, wie z. B. die Bodenplatte, die Kassettenköpfe usw., weiterentwickelt, die genaue Berechnungen der Fluenzen im Fuß- und Kopfbereich der BE ermöglichen. Damit können dann weitere Proben für einen Vergleich herangezogen werden.

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

Keine

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

Zilberman, M. E.; Barkleit, A.; Pönitz, E.; Stumpf, T.; Konheiser, J.: „Investigating the activation of a NPP concrete bioshield“ – 28. Seminar Aktivierungsanalyse und Gammaspektroskopie (SAAGAS 28), 26.-28.02.2025, Wien, Österreich – Vortrag

Zilberman, M. E.; Barkleit, A.; Pönitz, E.; Stumpf, T.; Konheiser, J.: „Radiochemical and structural investigations of activated concrete from decommissioned nuclear power plants“ – NUWCEM 2025 International Symposium on Cementation of Nuclear Wastes, 20.-22.05.2025, Avignon, Frankreich – Vortrag

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9447B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	
VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE)	
TP: Experimentelle Aktivierung und Benchmarkexperimente zur Validierung von Aktivierungsberechnungen und Untersuchung zur Aktivierbarkeit von Kernkraftwerksstrukturen	
<b>Laufzeit des Vorhabens</b> 01.04.2024 bis 30.09.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 265.774,84 €
<b>Projektleiter/-in:</b> T. Kormoll	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.kormoll@tu-dresden.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Eine frühe Kenntnis der spezifischen Aktivitäten der verschiedenen Bauteile eines Kernkraftwerks (KKW) ist ausschlaggebend für die Bestimmung der anfallenden radioaktiven Abfälle und damit entscheidend für die optimale Planung des KKW-Rückbaus. Für den Bereich innerhalb der biologischen Abschirmung ist anzunehmen, dass sowohl wegen der räumlichen Nähe zum Reaktorkern als auch der guten Modellierbarkeit der geometrischen Strukturen (gut bekannte und dokumentierte Abmaße und Materialzusammensetzungen) genaue Neutronenfluenzwerte berechnet werden können. Dies ermöglicht präzise Aktivitätsabschätzungen. In den Räumen außerhalb der biologischen Abschirmung bzw. des Tragschildes sind größere Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Aktivierungen zu erwarten. Die Ursachen dafür sind zum Beispiel der zunehmende Abstand zum Reaktorkern und die damit um Größenordnungen reduzierte Neutronenfluenz. Für die reaktorfernen Bereiche in den Kraftwerken sind deshalb neue Lösungsansätze erforderlich, auch um genauer zwischen Aktivierung und Kontamination durch Primärkreislaufwasser unterscheiden zu können. Das Ziel des Verbundprojektes EBENE ist es, die oben genannten Probleme zu lösen und die zu erwartenden Aktivitäten in den Räumen außerhalb des Tragschildes zu bestimmen.

Parallel zu den oben genannten Arbeiten werden an ausgewählten Stellen Materialproben (z. B. Beton, Stahl) aus dem Ende 2021 abgeschalteten KKW Grohnde entnommen und Messungen zur Bestimmung der exakten Materialzusammensetzung und Aktivierung durchgeführt. Auf Basis dieser Messungen werden sowohl die neue Skalierung bzw. Normierung als auch die darauf basierenden berechneten Ergebnisse überprüft.

Für eine komplementäre, simultane Validierung der Methode sollen nicht aktivierte Betonproben aus dem KKW Grohnde mit vergleichbarer Materialzusammensetzung wie die aktivierte Proben mit Neutronen aus einer definierten Neutronenquelle bestrahlt werden. Nach der Bestrahlung werden die entstandenen Aktivierungen experimentell bestimmt. Diese Studien sind essentiell für die Validierung der Simulationen einerseits und der für die im Beton anzutreffenden Elemente hinterlegter Wirkungsquerschnittsdaten andererseits. Da der Leistungsbetrieb schon mehrere Jahre zurückliegt, können nur so experimentelle Verifikationsdaten für die Simulationsrechnungen gewonnen werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das gesamte Verbundvorhaben ist in 5 aufeinander abgestimmte Arbeitspakete (AP) gegliedert:

- AP 1: Rekursive Berechnung von Neutronenfeldern
- AP 2: Extraktion von Proben aus der Betonabschirmung (Tragschild) und (metallischen) Einbauten (Rohrleitungen, Befestigungen)
- AP 3: Experimentelle (radio-)chemische und strukturelle Charakterisierung der Materialproben
- AP 4: Validierung der Fluenzrechnungen auf Basis experimentell bestimmter Aktivitäten
- AP 5: Experimentelle Aktivierungsuntersuchungen von Kernkraftwerksbeton

Die TUD ist für die Durchführung des Arbeitspakets 5 verantwortlich. Dieses gliedert sich in folgende Unterpunkte:

- 5.1 Charakterisierung der Neutronenquellen
- 5.2 Erstellung Quellsimulation
- 5.3 Aktivierung von Betonproben
- 5.4 Simulation der Aktivierungen und Vergleich

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

Im AP 5.1 wird die Flussdichte der Neutronen der am Institut für Kern- und Teilchenphysik vorhandenen Neutronenquellen mittels Aktivierungsexperimenten bestimmt. Die mittlere thermische Flussdichte von etwa  $2 \cdot 10^5$  n/s/cm<sup>2</sup> konnte bestätigt werden.

Die aktuellen Arbeiten konzentrieren sich auf die Verringerung der Unsicherheiten in der Messung der Neutronenflussdichte. Eine der Hauptquellen für Unsicherheiten ist die Abschwächung des Neutronenfeldes in den Proben selbst. Durch die Interaktion der Neutronen mit den Probenmaterialien kann das Neutronenfeld innerhalb der Proben abgeschwächt werden, was zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Neutronenflussdichte führen kann. Um diese Unsicherheiten zu reduzieren, werden die Abschwächungseffekte in den Proben berücksichtigt und in die Messung einbezogen. Weiterhin wird die Homogenität und Symmetrie des Neutronenfeldes experimentell überprüft. Dazu wird die Aktivierungssonde einseitig abgeschirmt und unterschiedlich positioniert.

Eine Simulation der Neutronenquelle (AP 5.2) wird weiter verfeinert. Derzeitiger Schwerpunkt ist der Feldgradient, insbesondere im intermediären und schnellen Bereich. Der Wert der thermischen Flussdichte stimmt gut mit den experimentellen Ergebnissen überein, wenn die tabellierten Quellstärken verwendet werden.

Im Arbeitspaket 5.3 sollen Betonproben aktiviert und die resultierende Aktivität experimentell bestimmt werden. Aufgrund des geringen Wirkungsquerschnitts und der Bestandteile des Betons ist die zu erwartende Aktivität jedoch gering. Um diese geringe Aktivität dennoch zuverlässig detektieren zu können, wurde ein spezielles Vorgehen entwickelt, um die Detektionseffektivität zu erhöhen.

Das entwickelte Vorgehen besteht darin, die Aktivierungssonden in einen Szintillator zu gießen. Ein Szintillator ist ein Material, das bei der Interaktion mit ionisierender Strahlung Licht emittiert. Durch das Gießen der Aktivierungssonden in den Szintillator wird die Detektionseffektivität erheblich gesteigert.

Erste Messungen mit eingebettetem Aluminiumblech haben gezeigt, dass Effizienzen von über 60 Prozent bezogen auf die emittierten Elektronen erreicht werden können. Diese hohe Effizienz ermöglicht eine quantitative Messung auch geringer Aktivitäten.

Proben von Betonmehl und auch Armierungsstahl aus nicht-aktiven Bereichen des KKU wurden gewonnen und am IKTP aufbereitet. Diese Proben wurden auch mit den Partnern am HZDR ausgetauscht und die Elementzusammensetzung wird ermittelt (AP 3).

Es wird erwartet, dass die strukturierte Oberflächen von Metall und Beton ebenfalls die Effektivität der Messung erhöht, da aus einer vergrößerten Oberfläche mehr Elektronen austreten können. Dieser Effekt wird mithilfe von Rechnung, Simulation und Experiment quantitativ untersucht. Zur experimentellen Untersuchung des Einflusses von Strukturierung wurden am Laserinstitut Mittweida (LIM) strukturierte Metallproben zur Aktivierung hergestellt. Erste Proben werden derzeit aktiviert und vermessen.

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

Quantitative Aussagen über den Feldgradienten in der Neutronen-Referenzquelle stehen zunächst im Vordergrund, um die Wichtigkeit von Positioniergenauigkeiten zu ermitteln.

Weiterhin wird am HZDR auch an einer Simulation der Quelle mittels SERPENT gearbeitet, um die in AP 5 gewonnenen Erkenntnisse auf die tatsächliche Reaktorsimulation zu übertragen. Die angestrebte Referenz ist die Berechnung der Aktivität von tatsächlichem KKW-Beton mit dem gleichen Werkzeug, welches zur Aktivierungsberechnung am Reaktor eingesetzt wird. Die Validierung erfolgt in AP4 durch Messung der Aktivität der Referenzprobe.

Die Aktivierbarkeit des Betons wird mithilfe des neu entwickelten Vorgehens experimentell bestimmt. Akkurate Elementarzusammensetzungen des Betons werden ermittelt, die Eingang in die o.g. Simulationen finden.

Der Einfluss von Oberflächenstrukturierung auf die Elektronenausbeute wird weiter untersucht. Dazu kommen u.a. die vom LIM hergestellten Proben zum Einsatz.

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

KOBEKA, EMPRADO

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

Die Bachelorarbeit von Sophie Schichtholz zum Thema „Bestimmung der spektralen Flussdichte mittels Aktivierungssonden“ wurde am 17.3.25 eingereicht und erfolgreich verteidigt.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9447C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> PreussenElektra GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE) TP: Probenahme und Bewertung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.04.2024 bis 30.09.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 34376,54 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Marcus Seidl	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> marcus.seidl@preussenelektra.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundprojektes EBENE ist es, mit Hilfe von experimentell gestützten Neutronenfluenzrechnungen die zu erwartenden Aktivitäten durch Aktivierungsreaktionen, die im Leistungsbetrieb aufgetreten sein können, in den Räumen außerhalb des Tragschildes zu bestimmen. Das heißt, dass die Fluenzrechnung auf Basis experimenteller Werte, die aus dem EMPRADO Projekt zur Verfügung stehen, neu skaliert wird und mit den angepassten Werten die Aktivierung in den umgebenden Wänden und Komponenten des Primärkreislaufes neu bestimmt wird. Für die Berechnungen werden international anerkannte Codes genutzt. Die Modelle werden durch gezielte Aktivierungsversuche an Referenzquellen validiert.

Zur Validierung der Ergebnisse werden Beton- und Stahlproben aus einer abgeschalteten Vor-Konvoi Anlage entnommen und deren exakte Zusammensetzung und Aktivität experimentell bestimmt. Sollte es sich zeigen, dass die Rechnung und Messung gut übereinstimmen, könnte dieser Ansatz komplementär zur bisherigen Strategie einer engen Beprobung der Anlagenräume sein und den Zeitaufwand und die Kosten der radiologischen Charakterisierung bedeutend senken.

Für eine zusätzliche Validierung werden vergleichbare, nicht aktivierte Betonproben aus der Vor-Konvoi Anlage mit Neutronen aus einer definierten Quelle bestrahlt, und die entstandenen Aktivitäten experimentell bestimmt. Durch den Vergleich kann auf den Neutronenfluss in den aktiven Proben geschlossen und mögliche spektrale Einflüsse quantifiziert werden.

Außerdem wird untersucht, wie sich die Beton- und Metallzusammensetzung aus verschiedenen Anlagen und damit in der Aktivierung unterscheiden. Für Vergleiche stehen auch experimentelle Werte aus den FORKA Projekten WERREBA und KOBEKA zur Verfügung.

Wichtiges Ziel ist auch der Erhalt nuklearer Kompetenz und die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Deshalb werden im Projekt neben den geplanten Dissertationen auch mehrere studentische Abschlussarbeiten angefertigt. Ebenso fließen Inhalte des Projektes in die universitäre Lehre ein.

## **2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm**

Die Realisierung des Vorhabens erfolgt in mehreren aufeinander abgestimmten Arbeitspaketen (AP). AP 2 wird in diesem und AP 1 und 3 bis 5 in anderen Teilprojekten bearbeitet.

AP 2: Extraktion von Proben aus der Betonabschirmung und metallischen Einbauten (PEL) Aktivierte und inaktive Materialproben werden aus einer abgeschalteten Vor-Konvoi Anlage für eine umfangreiche (radio-)chemische Charakterisierung (AP 3) entnommen, die Tätigkeiten werden vom Kraftwerk durchgeführt. Die Positionen werden in enger Absprache mit dem HZDR geplant. Basis dafür ist, die zu erwartende Aktivität und die technische Umsetzbarkeit

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

AP 2: Die Kernbohrungen an den vorgesehenen Positionen wurden entnommen. Durch Asbestverdacht an den festgelegten Probenahmeorten haben sich die Tätigkeiten verzögert, da eine neue Arbeitssicherheitsplanung notwendig war. Zusätzliche Schutzmaßnahmen während der Probenahme haben den Verfahrensablauf verlängert. Für die Durchführung der Kernbohrungen waren 2 Spezialbaufacharbeiter notwendig, die nicht vom Eigenpersonal gestellt werden konnten. Die Entnahme der Bohrmehlproben bzw. Stockerproben ist vorbereitet und soll bis Ende Q3 abgeschlossen werden. Die Betonproben von nicht aktivierten Orten wurden bereits an die weiteren Projektpartner übergeben

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

AP 2: Entnahme der Bohrmehlproben bzw. Stockerproben bis Ende Q3.

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

keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine Veröffentlichungen im Berichtszeitraum

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9451A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Systemkonzept, Test, Optimierung, Validierung und Transfer	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2025 bis 31.12.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 453.537,25 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Ernst Niederleithinger	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> ernst.niederleithinger@bam.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der sichere und effiziente Rückbau kerntechnischer Anlagen erfordert präzises Wissen über die innere Bausubstanz, insbesondere über die Lage von Bewehrung und Leitungsschächten. Da die vorhandenen Baupläne nicht immer vollständig und verlässlich sind, werden zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für Einblicke ins Bauteilinnere benötigt. Diese stoßen jedoch bei stark bewehrten, massiven Betonbauwerken an ihre Grenzen. Daher wird im Projekt ZfP-Rückbau ein neuartiges, tieffrequentes Ultraschallmesssystem entwickelt, kombiniert mit optimierten Sensoranordnungen sowie geophysikalischer Bildgebung. Letztere ermöglicht die Lokalisierung und Materialcharakterisierung (innerer Aufbau, Materialdichte, Ultraschallgeschwindigkeit) selbst komplexer Strukturen in größeren Bauteiltiefen. Zentrales Projektziel ist die zuverlässige Ortung und geometrische Erfassung tiefliegender Kunststoffrohrleitungen in stark bewehrten Bodenplatten, damit diese gezielt freigemessen und falls kontaminiert getrennt vom Beton behandelt werden können. Dies spart Zeit, Kosten und reduziert radioaktiven Abfall. Die im Projekt entwickelten Methoden werden im Labor und an realen Strukturen validiert und bei Bedarf in Kombination mit ergänzenden ZfP-Verfahren wie Radar in Handlungsempfehlungen für die Praxis überführt. Ein interdisziplinäres Konsortium aus Forschung und Industrie bündelt Expertise, baut Fachkompetenz auf und bereitet die wirtschaftliche Nutzung sowie mögliche Standardisierung vor.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**AP1:** Entwicklung und Charakterisierung neuer 25 kHz DPC-Wandler und darauf basierender 2x32-Kanal-Arrays inkl. Full-Matrix-Capture-Elektronik und Softwareplattform. Inbetriebnahme, Test und Optimierung des Gesamtsystems an Referenz- und Realstrukturen. **AP2:** Bau eines Betonprobekörpers mit eingebetteten PVC-Leitungen und der Ermittlung optimaler Messkonfigurationen durch Pilotmessungen & Vergleich mit ergänzenden ZfP-Verfahren. Das in AP1 entwickelte 2x32-Kanal-Ultraschallmesssystem wird an Labor- und Realstrukturen (Anlage Mülheim-Kärlich) erprobt, optimiert und in einer Prüfanweisung für den Praxiseinsatz dokumentiert.

**AP3:** Entwicklung eines digitalen Zwillings des Ultraschallmesssystems (AP1) und der relevanten Betonstruktur (AP2). Darauf basierend werden (a) die Full Waveform Inversion und (b) fokussierende Migrationsmethoden und (c) ihre Kombination auf Simulations-, Labor- und Felddaten angewendet, angepasst und validiert sowie zur Ableitung von Leitungsgeometrien und Materialparametern genutzt und mit herkömmlichen ZfP-Methoden verglichen. Die

resultierende Auswertemethodik mündet in praxisnahen Auswertestrategien und Handlungsempfehlungen für die Zustandsbewertung.

**AP4:** Projektresultate werden in Datenmanagement, Leitfäden, Konferenzbeiträgen, Workshops, Regelwerken der DGZfP und Publikationen eingebracht; IP- und Marktstrategien werden vorbereitet. Die Praxistauglichkeit des ZfP-Systems wird bewertet; daraus folgen Leistungsbeschreibung und Handlungsempfehlungen für die Anwendung im Rückbau kerntechnischer Anlagen.

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

**AP2.1:** Auf Grundlage der von RWE bereitgestellten Baupläne der kerntechnischen Anlage Mülheim-Kärlich wurde mit der Planung des Laborprobekörpers begonnen. Der aktuelle Stand ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Betonprobekörper mit den Maßen  $2500 \times 2500 \times 1500$  mm weist eine Betondeckung von 3 cm auf und ist unterschiedlich stark bewehrt. Auf einer Seite wird die Originalbewehrung aus dem Kernkraftwerk Mülheim-Kärlich simuliert:  $\varnothing 28$  mm, Betonstahlmatten mit Maschenweite  $200 \times 200$  mm, 3 Lagen, Stoßbereiche der vertikalen Bewehrung teilweise als Übergreifungsstoß ausgeführt (Abbildung 1, rechts). An den horizontalen Flächen des Probekörpers (Unter- und Oberseite) ist rissbegrenzende Bewehrung eingeplant ( $\varnothing 20$  mm, Betonstahlmatten mit Maschenweite  $125 \times 125$  mm). Weiterhin werden im Probekörper zwei PVC-Rohre eingebaut mit einem Durchmesser von  $\varnothing 110$  mm gemäß den Originalplänen der Anlage Mülheim-Kärlich. Das Anbringen einer Dekontaminationsbeschichtung ist nach Abschluss der ersten Messkampagne vorgesehen. Aufgrund der gewählten Probekörpergeometrie werden die Ultraschallmessungen primär entlang der Seitenflächen erfolgen. Diese Ausrichtung bietet deutlich mehr Prüf- und Testszenarien, als es bei einer um  $90^\circ$  gedrehten Ausrichtung der Fall wäre, bei der die Rohre parallel zur Oberfläche verlaufen würden.

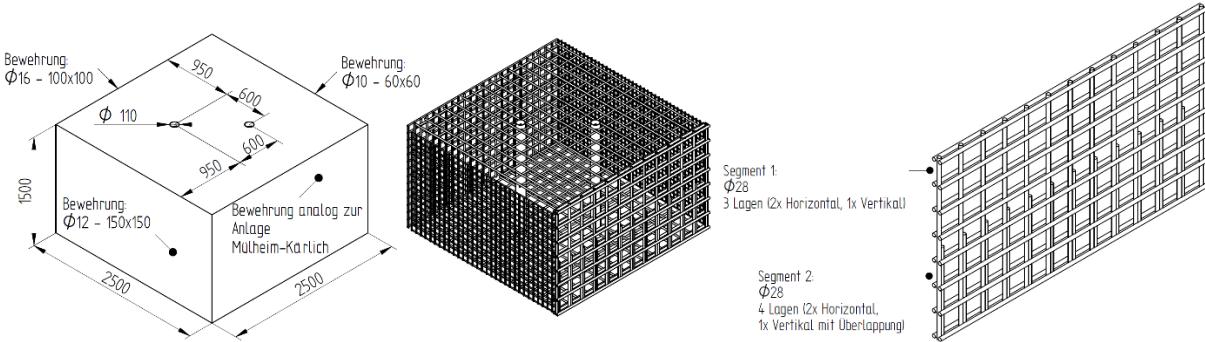


Abbildung 2. 3D-Modell des Laborprobekörpers. Links: Außenansicht; Mitte: Innenansicht mit Bewehrung und eingebetteten PVC-Rohren; Rechts: Bewehrung analog zur Anlage Mülheim-Kärlich.

**AP2.2:** Zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik des Schallfeldes der 32-Kanal-Arrays von ACS (Transversalwelle, Mittenfrequenz 25 kHz) (AP1) werden Halbkugeln aus Polyamid und Beton mit einem Scannersystem vermessen. Die Mess- und Auswertemethodik basiert auf der Dissertation von Stefan Maack [Maack, S. (2012), *Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen, PhD thesis, BAM*]. Vermessen wird die Abstrahlcharakteristik zweier Konfigurationen: (1) Einzelsensor und (2) 4-Kanal-Array (vier Sensoren sind in einer Reihe parallelgeschaltet). Der Prüfstand wurde aufgebaut und die Inbetriebnahme des Messsystems abgeschlossen. Die Ergebnisse werden sowohl in den Sensorbau (AP1) als auch in die Bildgebungsalgorithmen (AP3) einfließen. Darüber hinaus wurde das Quellsignal der in den 32-Kanal-Arrays verbauten Einzelsensoren durch Sensor-auf-Sensor-Messungen sowie Transmissionsmessungen an Polyamid bestimmt. Diese Information ist essenziell für die Bildrekonstruktionsalgorithmen (AP3). Des Weiteren wurde mit der Planung eines Scannersystems begonnen, das die zwei 32-Kanal-Arrays vollautomatisch verfahren und

positionieren kann. Da die Ultraschallmessungen überwiegend an den Seitenflächen des Probekörpers erfolgen werden, muss das System auch vertikale Messungen ermöglichen. Die derzeit an der BAM verfügbaren Scanner sind weder für das Gewicht und die Abmessungen der neuen Arrays noch für vertikale Messungen ausgelegt. Der geplante Scanner soll u.a. einen konstanten Anpressdruck sowie eine Positioniergenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm gewährleisten und die Fehleranfälligkeit manueller Messungen deutlich reduzieren.

**AP4.1:** Noch keine signifikante Tätigkeit. Ein Poster sowie ein Posterpitch zum Projekt wurden auf zwei BAM-internen Veranstaltungen (Themenfeldtag „Energie“ und Rahmenprogramm der Kuratoriumssitzung) vorgestellt und diskutiert.

**Projektkoordination BAM:** Für den regelmäßigen Austausch der Projektbeteiligten werden im Projekt ZfP-Rückbau eine Kollaborationsplattform mit kontrollierten Zugriffsrechten und regelmäßige Projekttreffen genutzt. Im Berichtszeitraum fanden mehrere Projekttreffen in Präsenz und Online zur Koordination von Aufgaben und für die gegenseitige Information statt. Im Rahmen der Projekttreffen wurden und werden in Zukunft kurze Statusberichte zu Aufgaben in den Arbeitspaketen gegeben, Ergebnisse kritisch hinterfragt und Meilensteine überprüft. Zudem werden auftretende Probleme besprochen und Lösungen diskutiert. So bleiben alle Projektpartner fortlaufend über die Aktivitäten der anderen informiert.

Es waren im Berichtszeitraum keine Meilensteine geplant.

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

**AP2.1:** In der nächsten Projektphase ist der Bau des Laborprobekörpers vorgesehen. Vorab führt Mondaic Simulationen zur ggf. notwendigen Optimierung des 3D-Modells durch. Das Modell wird auch mit RWE abgestimmt und bei Bedarf angepasst. Als Planungsgrundlage dient derzeit ein Beton mit Größtkorn 32 mm (GK 32) und der Betongüte Bn 250. Ergänzende Angaben zur Betonzusammensetzung (z. B. Mischungsberechnung, Bohrkernauswertungen) werden aktuell von RWE eingeholt. Die Herstellung soll, abhängig von technischen und logistischen Randbedingungen, entweder an der BAM oder in einem Fertigteilwerk erfolgen. Die Aufstellung des Probekörpers ist auf dem BAM Testgelände in Horstwalde vorgesehen.

**AP2.2:** Die Messungen und Auswertungen zur Abstrahlcharakteristik eines Einzelsensors und 4-Kanal-Arrays werden fortgeführt. Parallel wird das neue Scannersystem fertig geplant und mit der Konstruktion begonnen. Für Ende August/September 2025 sind erste (noch manuelle) Messkampagnen mit den 32-Kanal-Arrays von ACS an der BAM vorgesehen. Diese erfolgen zunächst mit vorläufigen Demoarrays und der BAM-Messelektronik; hierzu werden Messtechnik und Datenaufnahmesoftware vorbereitet. Ergänzend sind Vergleichsmessungen mit vorhandenen Arrays (Transversalwelle, Mittenfrequenz 50 kHz) geplant.

**AP4.1/4.2/4.3:** Ein Datenmanagementplan wird erarbeitet (Strukturierung, Archivierung und Zugriff auf z. B. Simulations-, Mess- und Metadaten). Für den wissenschaftlichen Austausch sind Konferenzbeiträge (u. a. SafeND und NDE NucCon) vorgesehen. Für 2026 ist mindestens eine wissenschaftliche Publikation geplant.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9451B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Mondaic AG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Innovative bildgebende Verfahren für die Ultraschalltomographie	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2025 bis 31.12.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 293.579,11 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Christian Böhm	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> christian.boehm@mondaic.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der sichere und effiziente Rückbau kerntechnischer Anlagen erfordert präzises Wissen über die innere Bausubstanz, insbesondere über die Lage von Bewehrung und Leitungsschächten. Da die vorhandenen Baupläne nicht immer vollständig und verlässlich sind, werden zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für Einblicke ins Bauteilinnere benötigt. Diese stoßen jedoch bei stark bewehrten, massiven Betonbauwerken an ihre Grenzen. Daher wird im Projekt ZfP-Rückbau ein neuartiges, tieffrequentes Ultraschallmesssystem entwickelt, kombiniert mit optimierten Sensoranordnungen sowie geophysikalischer Bildgebung. Letztere ermöglicht die Lokalisierung und Materialcharakterisierung (innerer Aufbau, Materialdichte, Ultraschallgeschwindigkeit) selbst komplexer Strukturen in größeren Bauteiltiefen. Zentrales Projektziel ist die zuverlässige Ortung und geometrische Erfassung tiefliegender Kunststoffrohrleitungen in stark bewehrten Bodenplatten, damit diese gezielt freigemessen und falls kontaminiert getrennt vom Beton behandelt werden können. Dies spart Zeit, Kosten und reduziert radioaktiven Abfall. Die im Projekt entwickelten Methoden werden im Labor und an realen Strukturen validiert und bei Bedarf in Kombination mit ergänzenden ZfP-Verfahren wie Radar in Handlungsempfehlungen für die Praxis überführt. Ein interdisziplinäres Konsortium aus Forschung und Industrie bündelt Expertise, baut Fachkompetenz auf und bereitet die wirtschaftliche Nutzung sowie mögliche Standardisierung vor.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**AP1:** Entwicklung und Charakterisierung neuer 25kHz DPC-Wandler und darauf basierender 2x32-Kanal-Arrays inkl. Full-Matrix-Capture-Elektronik und Softwareplattform. Inbetriebnahme, Test und Optimierung des Gesamtsystems an Referenz- und Realstrukturen.

**AP2:** Bau eines Betonprobekörpers mit eingebetteten PVC-Leitungen und der Ermittlung optimaler Messkonfigurationen durch Pilotmessungen & Vergleich mit ergänzenden ZfP-Verfahren. Das in AP1 entwickelte 2x32-Kanal-Ultraschallmesssystem wird an Labor- und Realstrukturen (Anlage Mülheim-Kärlich) erprobt, optimiert und in einer Prüfanweisung für den Praxiseinsatz dokumentiert.

**AP3:** Entwicklung eines digitalen Zwillings des Ultraschallmesssystems (AP1) und der relevanten Betonstruktur (AP2). Darauf basierend werden (a) die Full Waveform Inversion und (b) fokussierende Migrationsmethoden und (c) ihre Kombination auf Simulations-, Labor- und Felddaten angewendet, angepasst und validiert sowie zur Ableitung von Leitungsgeometrien und Materialparametern genutzt und mit herkömmlichen ZfP-Methoden verglichen. Die

resultierende Auswertemethodik mündet in praxisnahen Auswertestrategien und Handlungsempfehlungen für die Zustandsbewertung.

**AP4:** Projektresultate werden in Datenmanagement, Leitfäden, Konferenzbeiträgen, Workshops, Regelwerken der DGZfP und Publikationen eingebracht; IP- und Marktstrategien werden vorbereitet. Die Praxistauglichkeit des ZfP-Systems wird bewertet; daraus folgen Leistungsbeschreibung und Handlungsempfehlungen für die Anwendung im Rückbau kerntechnischer Anlagen.

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

Im Rahmen des Arbeitspakets „AP3.1 Entwicklung eines digitalen Zwillings der Array-Prüfköpfe und des Ultraschall-Messsystems“ wurde ein digitaler Zwilling des Sensorsystems erstellt. Dies umfasst 32 simultan feuernde oder empfangende Schallköpfe, deren Aktivierungssequenz und Gebersignal frei gewählt werden können. Dabei werden die einzelnen Schallköpfe als Punktempfänger und Punktquellen modelliert. Etwaige Richtcharakteristiken könnten ebenfalls durch räumlich ausgedehnte Schallköpfe simuliert werden. Abbildung 1 zeigt mehrere Snapshots einer Wellenfeldsimulation durch einen Probekörper aus Acryl.

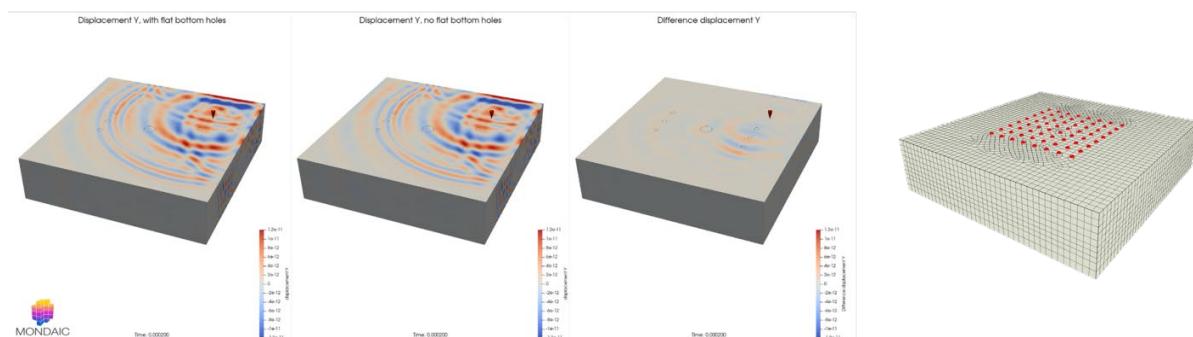


Abbildung 3. Simulation der MIRA 3D Konfiguration (8x8) in einem Testkörper aus Acryl mit unterschiedlichen Flachbodenbohrungen.

Im nächsten Schritt wurde ein sphärisches Beamforming-Verfahren zur Kalibrierung des Startmodells entwickelt. Die innovative Methode operiert auf sphärischen Wellenfronten und kann durch Anwendung des MUSIC Algorithmus unterschiedliche Ausbreitungs-geschwindigkeiten für Longitudinal- und Schwerwellen simultan schätzen. Dadurch lassen sich homogene Materialeigenschaften ohne Vorwissen direkt aus den Daten bestimmen (Abbildung 2). Für die Anwendung auf das geplante Sensor-System ist die Erweiterung auf den Full-Matrix-Capture-Modus geplant.

In Arbeitspaket 3.2 „Methodenentwicklung anhand simulierter Daten: FWI und Migration“ wurden aufbauend auf den Arbeiten von Grohmann et al. (2024) erste Beispiele für 3-D Wellenforminversion und Reverse-Time-Migration aufgesetzt. Für eine Stufenplatte mit 4 Bohrungen (Maack et al., 2023) konnten hier zuverlässig die Einbauten und die Rückwand detektiert und eine gute Übereinstimmung mit der Rekonstruktion von Grohmann et al. (2024) erzielt werden (Abbildung 3). Dabei wurden sowohl Szenarien mit reflektierenden Rändern als auch in einem unbeschränktem Halbraum berücksichtigt.

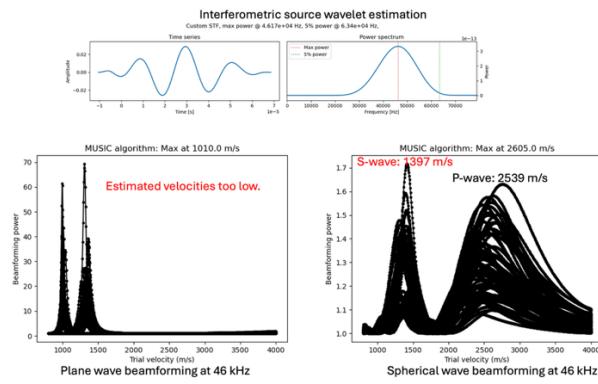


Abbildung 4. Datengetriebene Kalibrierung der Wellengeschwindigkeiten mittels Beamforming.

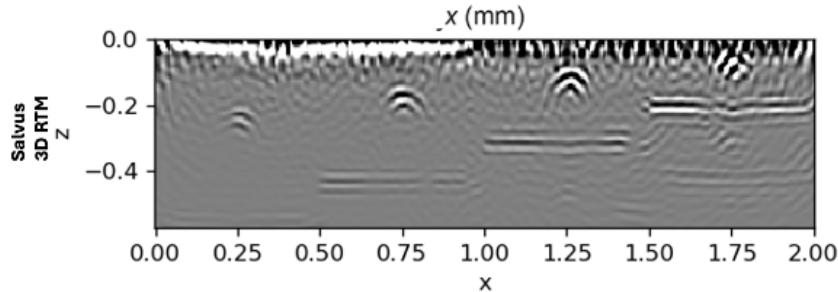


Abbildung 5. 3-D Reverse-Time Migration zur Detektion von Rückwand und Hohlräumen.

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

**AP3.1:** In der nächsten Projektphase sollen die Schallkopfcharakteristik und die elastischen Eigenschaften anhand von Zwischenergebnissen aus AP1.2 und AP2.1 kalibriert werden. Zudem soll die Geometrie des Testkörpers auf Grundlage von AP2.1 in einen digitalen Zwilling überführt werden. Mit Hilfe der entwickelten Methoden zur numerischen Gittergenerierung kann damit ein erster digitaler Zwilling des Testkörpers erstellt werden.

**AP3.2:** Die Simulation und Datenfusion der neu getesteten Array-Prüfköpfe aus AP2.1 soll bis Q3 2025 abgeschlossen sein. Parallel dazu werden die Datenformate von Simulation und Messung harmonisiert. Mit einem realistischen synthetischen Setup der Messkonfiguration werden erste Inversionen einer stark bewehrten Betonplatte durchgeführt. Dabei fließen die Ergebnisse aus AP1.2, AP2.1 und AP3.1 ein um die Konfiguration so realistisch wie möglich zu halten.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9451C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> ACS-Solutions GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Innovatives Prüfsystem für die Ultraschalltomographie an massiven Betonbauwerken	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.01.2025 bis 31.12.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 344.243,87 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Andrey Bulavinov	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> andrey.bulavinov@acs-international.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der sichere und effiziente Rückbau kerntechnischer Anlagen erfordert präzises Wissen über die innere Bausubstanz, insbesondere über die Lage von Bewehrung und Leitungsschächten. Da die vorhandenen Baupläne nicht immer vollständig und verlässlich sind, werden zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für Einblicke ins Bauteilinnere benötigt. Diese stoßen jedoch bei stark bewehrten, massiven Betonbauwerken an ihre Grenzen. Daher wird im Projekt ZfP-Rückbau ein neuartiges, tieffrequentes Ultraschallmesssystem entwickelt, kombiniert mit optimierten Sensoranordnungen sowie geophysikalischer Bildgebung. Letztere ermöglicht die Lokalisierung und Materialcharakterisierung (innerer Aufbau, Materialdichte, Ultraschallgeschwindigkeit) selbst komplexer Strukturen in größeren Bauteiltiefen. Zentrales Projektziel ist die zuverlässige Ortung und geometrische Erfassung tiefliegender Kunststoffrohrleitungen in stark bewehrten Bodenplatten, damit diese gezielt freigemessen und falls kontaminiert getrennt vom Beton behandelt werden können. Dies spart Zeit, Kosten und reduziert radioaktiven Abfall. Die im Projekt entwickelten Methoden werden im Labor und an realen Strukturen validiert und bei Bedarf in Kombination mit ergänzenden ZfP-Verfahren wie Radar in Handlungsempfehlungen für die Praxis überführt. Ein interdisziplinäres Konsortium aus Forschung und Industrie bündelt Expertise, baut Fachkompetenz auf und bereitet die wirtschaftliche Nutzung sowie mögliche Standardisierung vor.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**AP1:** Entwicklung und Charakterisierung neuer 25 kHz DPC-Wandler und darauf basierender 2x32-Kanal-Arrays inkl. Full-Matrix-Capture-Elektronik und Softwareplattform. Inbetriebnahme, Test und Optimierung des Gesamtsystems an Referenz- und Realstrukturen.

**AP2:** Bau eines Betonprobekörpers mit eingebetteten PVC-Leitungen und der Ermittlung optimaler Messkonfigurationen durch Pilotmessungen & Vergleich mit ergänzenden ZfP-Verfahren. Das in AP1 entwickelte 2x32-Kanal-Ultraschallmesssystem wird an Labor- und Realstrukturen (Anlage Mülheim-Kärlich) erprobt, optimiert und in einer Prüfanweisung für den Praxiseinsatz dokumentiert.

**AP3:** Entwicklung eines digitalen Zwillings des Ultraschallmesssystems (AP1) und der relevanten Betonstruktur (AP2). Darauf basierend werden (a) die Full Waveform Inversion und (b) fokussierende Migrationsmethoden und (c) ihre Kombination auf Simulations-, Labor- und Felddaten angewendet, angepasst und validiert sowie zur Ableitung von Leitungsgeometrien und Materialparametern genutzt und mit herkömmlichen ZfP-Methoden verglichen. Die

resultierende Auswertemethodik mündet in praxisnahen Auswertestrategien und Handlungsempfehlungen für die Zustandsbewertung.

**AP4:** Projektresultate werden in Datenmanagement, Leitfäden, Konferenzbeiträgen, Workshops, Regelwerken der DGZfP und Publikationen eingebracht; IP- und Marktstrategien werden vorbereitet. Die Praxistauglichkeit des ZfP-Systems wird bewertet; daraus folgen Leistungsbeschreibung und Handlungsempfehlungen für die Anwendung im Rückbau kerntechnischer Anlagen.

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

Im Rahmen des Arbeitspakets „AP1.1 Entwicklung von spezialisierten DPC-Wandlern (Transversalwelle, Mittenfrequenz 25 kHz)“ wurden neuartige, hochgedämpfte Trockenkontaktsensoren (DPC-Wandler) zur Anregung und zum Empfang von Ultraschall-Transversallwellen mit einer Arbeitsfrequenz von 25 kHz konzipiert und gefertigt. Die Vermessung der Impuls- und Frequenzcharakteristiken der ersten hergestellten Wandlerprototypen zeigte, dass die angestrebten Zielparameter erfolgreich erreicht und teilweise übertrroffen wurden, insbesondere hinsichtlich der Breitbandigkeit der Sensoren. Im Vergleich zu den bestehenden 50-kHz-Sensormodellen, die in kommerziellen bildgebenden Betonprüfgeräten eingesetzt werden, konnte bei den neuen 25-kHz-Sensormodellen ein etwa 100 % höherer Wirkungsgrad der doppelten Schallwandlung festgestellt werden.

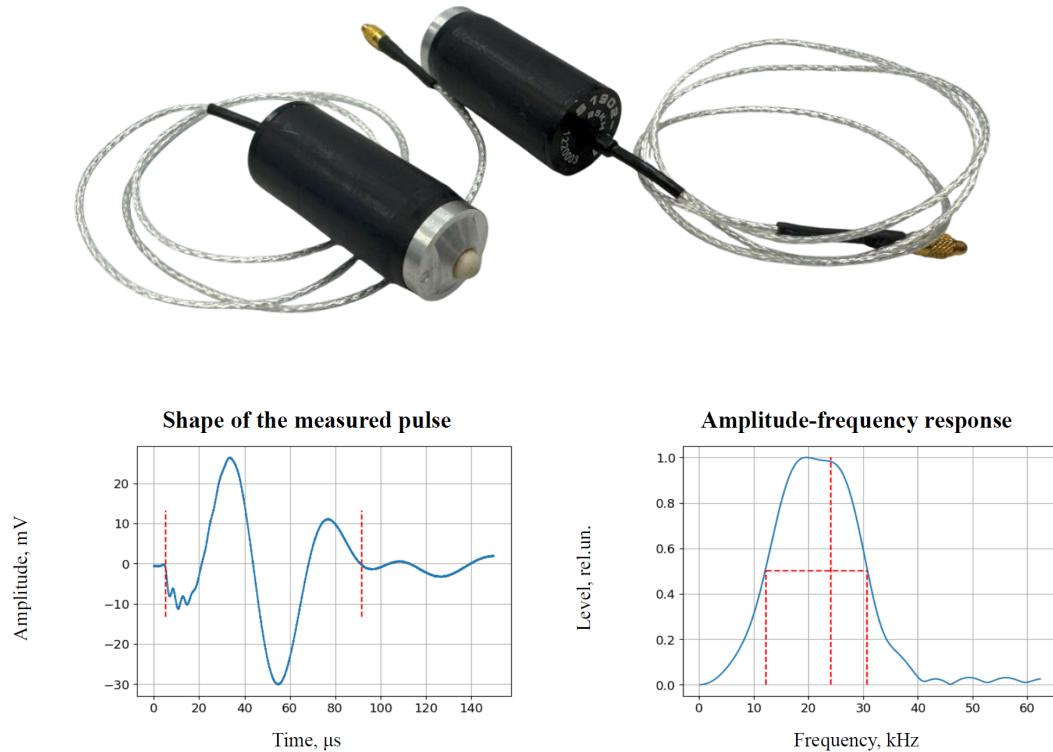


Abbildung 6. 25 kHz DPC-Wandler und ihre Impuls- und Frequenzcharakteristiken

Im Arbeitspaket „AP1.2 Konstruktion und prototypischer Aufbau des Ultraschall-Sensorsystems aus zwei Array-Prüfköpfen“ wurde planmäßig mit der Entwicklung der Wandler-Arrays begonnen. Zwei passive Sensor-Arrays mit jeweils 32 Elementen wurden auf Basis der im Arbeitspaket AP1.1 entwickelten DPC-Wandler konzipiert. Der entscheidende Sensorabstand sowie die Anordnung der Array-Elemente wurden einerseits aus den Erfahrungswerten des

bestehenden LAUS-Systems und andererseits unter Berücksichtigung der neuen Sensorabmessungen und der Arbeitsfrequenz abgeleitet. Darüber hinaus wurden im Berichtszeitraum die Arbeiten zur Konstruktion des Array-Gehäuses aufgenommen.

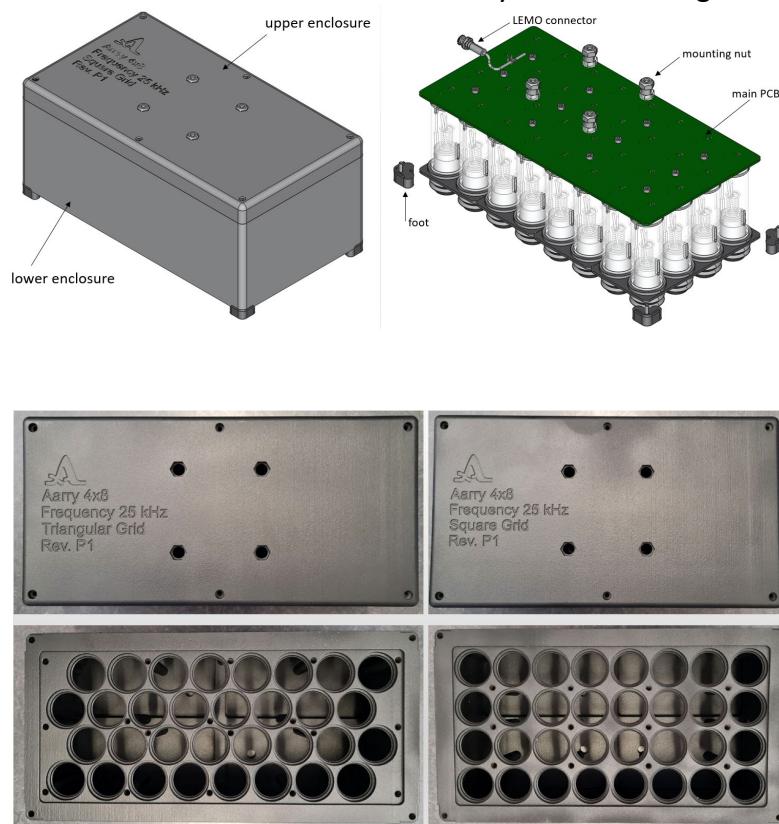


Abbildung 7. Konstruktion des Array-Gehäuse mit unterschiedlichen Sensoranordnungen

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

**AP1.1:** In der nächsten Projektphase ist der Abschluss der DPC-Sensorentwicklung vorgesehen, indem jeder Sensor mit einer miniaturisierten Leiterplatine ausgestattet wird. Diese Elektronikeinheit sieht in der ersten Ausbaustufe eine passive Array-Ausführung vor, während in den weiteren Projektphasen eine aktive Sende-Empfangseinheit auf der Platine integriert wird. Diese Arbeiten sollen bis Ende des 3. Quartals 2025 abgeschlossen sein.

**AP1.2:** Die Entwicklung und der Bau von zwei passiven, niederfrequenten Array-Prototypen – einschließlich der Produktion der Leiterplatten, der Assemblierung der Sensoren und Leiterplatten im Gehäuse sowie der anschließenden Funktionstests und Vermessung der Sensorcharakteristiken – sollen gemäß ursprünglicher Planung bis Ende des 4. Quartals 2025 abgeschlossen sein.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b>	
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Postfach 200 733, 80007 München	
Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Standort Dresden-Klotzsche, Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b>	
VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling)	
TP: Weiterentwicklung und Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Fraktionierung des Anodengases	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 957.340,29 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl.-Chem. H.-J. Friedrich	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> hans-juergen.friedrich@ikts.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

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

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

- AP010: Es fanden mehrere bilaterale Meetings statt, in denen der weitere Fortgang der Bearbeitung besprochen und Ergebnisse diskutiert wurden. Zwischen den Verbundpartnern wurde ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung des Projektes bis 31.12.2025 abgestimmt und nachfolgend eingereicht.
- AP100: Die Bearbeitung ist abgeschlossen.
- AP200: Im Berichtszeitraum wurden die Arbeiten zur Optimierung weitergeführt und vor allem die Stromdichteabhängigkeit der Gasfreisetzungsdynamik weiter untersucht. Eine signifikante Abhängigkeit wurde für die Intensität der CO2-Freisetzung gefunden, wobei mehrere Maxima zu beobachten sind. Während die Freisetzung von Kohlenwasserstoffen weiterhin nicht zu beobachten war, zeigte sich bei Umsätzen der organischen Substanzen > ca. 98 % eine deutliche Zunahme der Ozonkonzentration im Anodengas auf mehrere 10E03 ppm. Aufgrund eines Defektes am Massenspektrometer konnte die Isotopensignatur dabei nicht mit verfolgt werden.
- AP300: Die Bearbeitung wurde begonnen. Die Feinabstimmung ist Gegenstand laufender Arbeiten.
- AP400: Der Anlagenaufbau ist abgeschlossen und die Inbetriebnahme wurde erfolgreich durchgeführt. Gegenwärtig wird die Anlage mit konventionellen und mit radioaktiven Testsubstanzen erprobt. Die bisherigen Ergebnisse entsprechend den Erwartungen.
- AP500: Es erfolgten weitere methodische Arbeiten zur Verbesserung der Nachweisgrenzen.
- AP600: Im Berichtszeitraum waren hierzu keine Arbeiten vorgesehen.

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

- AP010: Die Bearbeitung wird planmäßig fortgesetzt. Das nächste Verbundmeeting ist im Herbst 2025 geplant.
- AP100: Die Bearbeitung ist abgeschlossen.
- AP200: Es werden noch einzelne Untersuchungen zu Vervollständigung durchgeführt.
- AP300: Die experimentelle Bearbeitung wird im Zuge der laufenden Erprobungen fortgesetzt.
- AP400: Die Bearbeitung wird mit Schwerpunkt auf realen C-14-Abfalllösungen fortgesetzt.
- AP500: Die methodische Entwicklungsarbeiten werden nur noch bedarfsabhängig fortgesetzt.
- AP6: Die Bearbeitung erfolgt im 2. Halbjahr 2025.

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

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

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

-keine-

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 – 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e.V., D-01328 Dresden	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagergerechten Konditionierung C14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling) TP: Weiterentwicklung des Verfahrens zur totzeitarmen C14-Bestimmg. mittels Flüssigszintillation und Untersuchung zur Freimessung von C14-Rückständen nach elektrochem. Behandlung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 – 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 179.459,84 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Henry Lösch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Henry.Loesch@vkta.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP 100 Vorbereitende Arbeiten

AP 120 Edukt Charakterisierung

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

AP 320 Erprobung/Weiterentwicklung totzeitarme C-14-Messung

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

AP 410 Scale up zur Pilotanlage

Das Scale-Up der Pilotanlage erfolgte durch den Projektpartner IKTS. Diese Anlage wird auch durch den Projektpartner betrieben. Die entwickelte Messtechnik soll dort integriert werden.

AP 500 Konditionierung/Freimessung der Reaktionsprodukte (laufend)

AP 600 Fortschreibung Verwertungskonzept

AP 610 Verwertungskonzept

AP 620 Sicherung des Know-how, wissenschaftliche Verwertung

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

AP 320 Erprobung/Weiterentwicklung totzeitarme C-14-Messung

In Bezug auf die Signalstabilität konnte festgestellt werden, dass die Temperatur einen Einfluss auf die sogenannte Breakdown-Spannung besitzt. Diese Spannung bestimmt u.a. den Verstärkungsfaktor und die Effektivität bei der Photonendetektion. Diese Spannung kann nicht direkt gemessen werden, sondern ergibt sich aus dem internen Aufbau des SiPM und der angelegten Bias-Spannung. In Laborversuchen soll daher evaluiert werden, ob eine temperaturbedingte Anpassung der Spannung notwendig oder ob dies für rein zählende Messungen nicht notwendig ist, soweit alle gemessenen Pulse oberhalb der Dunkelpulszählrate liegen.

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

Fortführung der oben genannten AP.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine bekannt

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Noch keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9433C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> IUT - Institut für Umwelttechnologien GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Weiterentwicklung und Piloterprobung eines Verfahrens zur endlagegerechten Konditionierung C-14-belasteter flüssiger organischer Abfälle (C14-Recycling) TP: Piloterprobung der elektrochemischen Totaloxidation mit Isotopentrennung zur Rückgewinnung von C-14	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2021 bis 31.12.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 22.273,54 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Frau Kirsten Guthmann-Scholz	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> <a href="mailto:k.guthmann-scholz@iut-berlin.com">k.guthmann-scholz@iut-berlin.com</a>

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

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

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

- AP100: Vorbereitung einer Probe „Syntheserückstand aus der Methanol Synthese“ für Elektrolyseversuche im VKTA.  
Anfrage bei VKTA auf welche spezifische Aktivität die Probe eingestellt werden soll und welche Menge bereitgestellt werden soll.

AP200 keine  
AP300 keine  
AP400 keine  
AP500 keine  
AP600 keine

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

AP100: Konkretisierung ist erst nach Nachweis der Gasfraktionierung und Erreichen eines 14C Mindestgehalt > 1 % in der 14C Fraktion möglich.

AP200  
AP300  
AP400  
AP500  
AP600

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9441
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Framatome GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Konditionierung von mittelaktiven (ILW) Ionentauscherabfällen aus der Chemischen System Dekontamination	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2023 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 100.162,92 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Thomas Fischedick	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Thomas.Fischedick@framatome.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP1: Anlagensicherheit

AP2: Methodenentwicklung und -optimierung

AP3: Immobilisierung der verflüssigten Ionentauscherabfälle in verschiedenen Matrizen

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

Im H1 2025 wurde die in 2024 abgeschlossene Methodenentwicklung und -optimierung auf verschiedene Ionentauschermaterialien und -beladungen angewandt (AP2). Das ausgearbeitete Verfahren ließ sich stabil und reproduzierbar auf simulierte Ionentauscher aus der chemischen Systemdekontamination anwenden, d.h. die eingesetzten Mischbetttauscher aus Purolite NRW 100 und Purolite NRW 400 sowie Lewatit S200 und Lewatit M800 konnten zuverlässig und ohne Systemstörungen zersetzt werden. Durch den Einsatz der optimierten Katalysatormischung aus organischen Kupfer- und Eisenverbindungen konnte sowohl der Verbrauch an pH-Regulationschemikalien (vgl. Abbildung 8) als auch der finale Trockenrückstand (rechnerisch um 1/3) reduziert werden.

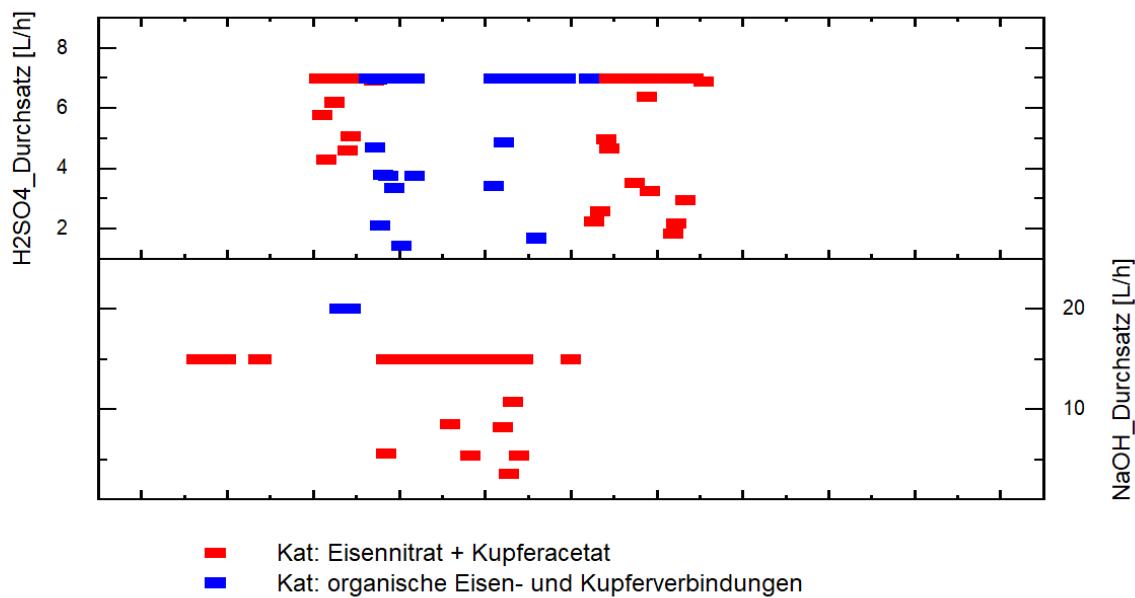


Abbildung 8: Vergleich pH-Regulierungsschemikalien bei Verwendung von rein organischen Katalysatorverbindungen bzw. organischen und anorganischen Verbindungen

Bei der Anwendung der entwickelten Methode auf simulierte Ionentauscher (Lewatit S200 und Lewatit M800) aus der Kühlmittelreinigung zeigte sich, dass die Dosierrampe flacher verlaufen muss und auch eine geringe Zieldosierrate von Nötigen ist.

Ferner wurde die Raman-Spektrometrie auf zahlreiche Verflüssigungsproben angewandt, wobei in 10 % der Fälle Wasserstoffperoxid nicht erkannt wurde obwohl mittels Hach Lange Schnelltest nachgewiesen. Damit scheidet die Raman-Spektrometrie zur H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-Überwachung aus. Die Datenanalyse von Abgasrate, Dosierrate, Kühlleistung und Reaktionstemperatur konnte hingegen zuverlässig eine Akkumulation erkennen, bzw. ausschließen.

Die Verfestigung (AP3) von aufkonzentrierten zerstörten Ionentauscherharzen wurde neben den Zementierungstests auch mit Geopolymeren durchgeführt. Für die Geopolymermatrix wurde Natronlauge für die Neutralisation der zerstörten Ionentauscherharze ausgeschlossen. Dafür wurden Lithium- und Aluminiumhaltige Neutralisationen ausgewählt. Ein Index zur Bewertung der Rezepturen wurde ausgearbeitet, um die Rezepturen bewerten und untereinander vergleichen zu können. Durch die Rezepturentwicklung konnte der Anteil an aufkonzentrierten zerstörten Ionentauscherharzen in der Geopolymermatrix erhöht werden. Als letzter Schritt wird untersucht, ob der Anteil an zerstörten Ionentauscherharzen in der Geopolymermatrix durch vollständige Trocknung in einem Walzentrockner maximiert werden kann.

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

Forschungsprojekt wird in Q3 2025 abgeschlossen – keine weitere Weiterarbeit geplant.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

NPC 2025 Conference, Successful Start of a Semi-industrial Scaled Pilot Plant for Spent Resin Treatment - 1105

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9442
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Hochschule Mannheim	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Charakterisierung und Dekontamination von i-Grafiten (i-GraDe)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2023 bis 31.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.600.524,03 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Lotte Lens/ Prof. dr. Ulrich W. Scherer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> u.scherer@hs-mannheim.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Auf Grundlage von Vorarbeiten sollen vielversprechende Verfahren der thermochemischen Behandlung von i-Grafiten fertig gestellt werden. Darüber hinaus wird als innovativer Ansatz die Extraktion von Radionukliden mit superkritischen Lösungsmitteln untersucht werden.

Voraussetzung für diese Untersuchungen ist allerdings die ausreichend gute Charakterisierung vorhandener bestrahlter Grafite bzgl. ihrer Radionuklidinventare und Homogenität. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Anteil leicht flüchtigen Radiokohlenstoffs (14C). Damit kann eine Vorauswahl von Materialien getroffen werden, die möglicherweise direkt freigebbar oder ohne weitere Behandlung einlagerbar sind. Bei einem sehr geringen Anteil an flüchtigem 14C in der Grafitmatrix könnte das Abfallvolumen an Grafit im Endlager Konrad signifikant optimiert werden. Alle anderen Anteile müssen nach einer Klassifizierung auf ihre Dekontaminierbarkeit untersucht werden.

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

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

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

Die gammaspektrometrische Charakterisierung der Grafitproben aus Mainz sowie vom JEN wurden abgeschlossen. Die berichteten Differenzen zu vorangegangenen Messungen der Grafitproben aus Jülich konnten erklärt werden.

Die Charakterisierung der Proben auf Betastrahler ist weitgehend abgeschlossen. Die Proben aus Mainz sind weitestgehend als homogen bezüglich der Verteilung von H-3 und C-14 zu betrachten. Dies gilt auch für die Proben aus Jülich. (Arbeitspaket 3)

Die Freisetzung von H-3 und C-14 bei 50 °C wurde mit den kleinen Rohröfen an Proben aus Mainz untersucht. Es konnte keine signifikante Freisetzung trotz der langen Versuchsdauer von ca. 2 Wochen gefunden werden. Dies liegt sicher an der niedrigen Aktivität der Proben. Derzeit laufen Versuche mit Grafiten von JEN. (Arbeitspaket 3)

Die Masterprojektarbeit zur alternativen Herstellung von Szintillatorfolien wurde erfolgreich abgeschlossen. Aufgrund der schlechten Lieferbarkeit eines bestimmten Monomers konnte die gewünschte mechanische Stabilität jedoch nicht erzielt werden (Arbeitspaket 3)

Die Inbetriebnahmen der Geräte und Validierung der Methoden zur Untersuchung der Dekontamination sind abgeschlossen. Die vermeintlichen Brandschutzprobleme erwiesen sich bei näherer fachmännischer Betrachtung als nicht stichhaltig. (Arbeitspaket 4)

Für die Untersuchung der Dekontaminationswirkung wurden die Verfahren zunächst getestet und validiert, auch anhand der Proben aus Mainz. Da deren Aktivitäten gering sind, ist die Aussagekraft der Ergebnisse beschränkt. Für die Untersuchung der JEN-Proben wurden Paare von Probenstücken herausgesucht, die ähnliche Aktivitäten und Radionuklidverteilungen aufweisen.

Die Dekontaminationswirkung des thermischen Verfahrens wurde systematisch anhand der Proben aus Mainz untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Dekontamination wenig von der Luftfeuchtigkeit (30, 50, 75 %) abhängt, sondern wesentlich durch die Temperatur bestimmt wird. Dekontamination von H-3 und C-14 ist klar ab ca. 1000 °C zu beobachten und steigt zu 1300 °C an, wo H-3 quantitativ in 4h Bearbeitungszeit entfernt wird. Unter diesen Bedingungen wird C-14 zu ca. 50 % entfernt. Überraschend war, dass auch Co-60 quantitativ das Probenmaterial verlässt. Bei den Eu-Isotopen sieht man einen deutlichen Unterschied zwischen Eu-152 und Eu-154. Letzteres ist signifikant flüchtiger als Eu-152, was auf einen anderen Entstehungsmechanismus hindeutet.

Die Effekte werden verstärkt durch die Bearbeitung bei 1500 °C. Bei den Europium-Isotopen sieht man zusätzlich den Einfluss der Feuchtigkeit: höhere Feuchtigkeit entfernt ca. 3-4 mal mehr Europium aus den Proben.

Kritisch betrachtet werden muss allerdings der Abbrand: Bei 1500 °C und 75 % Feuchtigkeit werden nach 4 h Behandlung ca. 90 % der Masse verloren. Das ist aus der Herstellung von „Synthesegas“ aus Kohlenstoff und Wasser in der chemischen Industrie bekannt, wo man eine quantitative Umsetzung anstrebt. Auch bei 1300 °C ist der Abbrand relevant. Bei 30 % Luftfeuchte beträgt er nach 4 h schon ca. 20 %.

Optimal ist eine Behandlung bei etwas niedrigerer Temperatur, bei der die Dekontamination ausreichend hoch, der Abbrand aber noch niedrig (< 5 %) ist. (Arbeitspaket 5)

Mit der Superkritischen Fluidextraktion (SCFE) wurden Versuche in wässrigen Systemen durchgeführt. Neben dem Wasser wurden Komplexbildner (TTA, TBP) und ein zweites Lösungsmittel (Isopropanol, IPA) eingesetzt. Die ersten sollen beständige, leichter aus der Matrix extrahierbare Verbindungen mit den Metallkationen bilden, das Lösungsmittel die Fluideigenschaften durch Änderung der Dichte verbessern. Diese Maßnahmen erhöhen die Extraktionsausbeute, ebenso eine längere Einwirkzeit bis ca. 16 h. Das Wiederholen der Prozedur an derselben Probe zeigt etwa den gleichen prozentualen Anteil der extrahierten Radiometalle für jeden Schritt. Das weist auf die teilweise tief im Inneren der Proben sitzenden Radionuklide. Nach 6 Wiederholungen können keine weiteren Anteile mehr entfernt werden, was aber auch durch die sehr geringe Restaktivität erklärt werden kann. Die Ergebnisse der Dekontamination von H-3 und C-14 liegen noch nicht vor, da dafür Proben aus einem größeren Stück jeweils vor und nach dem Prozess im Oxidizer untersucht werden müssen und es dort zu Kapazitätsproblemen kommt. (Arbeitspaket 5)

Erstaunlich war jedoch, dass beim Auskochen von Proben im Rückfluss mit derselben Wasser/TTA-Mischung wie bei der SCFE eingesetzt auch 60 % des Co-60 und 40 % des Europiums entfernt werden konnten. Allerdings ist die Dekontamination von H-3 und C-14 vernachlässigbar klein. (Arbeitspaket 5)

Erste Untersuchungen der Abfallprodukte ergaben nur sehr geringe Aktivitäten. H-3 liegt als HTO und C-14 als CO<sub>2</sub> vor. Letzteres kann in alkalischen Lösungen aufgefangen und als festes Carbonat ausgefällt werden. Die Metallkationen liegen komplexiert vor und müssen durch eine chemische Weiterbehandlung in eine feste Form gebracht werden. (Arbeitspaket 7)

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

Die Versuche zur Freisetzung von H-3 und C-14 aus den Proben von JEN wurden begonnen und sollen in wenigen Wochen abgeschlossen sein. (Arbeitspaket 3)

Die Versuche zur Dekontamination mit der thermischen Methode und der S<sub>CFE</sub> sind ebenfalls begonnen worden und sollen in der zweiten Jahreshälfte beendet werden. (Arbeitspaket 5)

Aufgrund der Entscheidung der Technischen Hochschule Mannheim die Professur für Radiochemie nicht erneut auszuschreiben nach meinem Ausscheiden, haben wir entschieden, die experimentellen Arbeiten (Arbeitspakte 5 und 7) vorzuziehen und in diesem Jahr 2025 zu beenden.

Das weitere Projekt soll in engerer Zusammenarbeit mit der Universität Mainz (TRIGA und Institut für Kernchemie) fortgeführt werden. Im Frühjahr 2026 soll dazu bei Verfügbarkeit der neuen Labore der Umzug der experimentellen Ausstattung an die Universität Mainz erfolgen.

Die Arbeitspakte 6 und 8 sollen dann in 2026 bearbeitet werden.

Da die Grafitproben aus Frankreich nicht mehr 2025 geliefert werden können, soll die Lieferung direkt nach Mainz erfolgen. Dort könnten dann weitere experimentelle Arbeiten nach dem Aufbau, Wiederinbetriebnahme und Validierung der Geräte stattfinden (Arbeitspakte 3, 5 und 7). Zu diesem Zweck wurde schon ein Mitarbeiter des Instituts für Kernchemie mit 50 % Beschäftigungsumfang eingestellt, der auch an der Projektskizze zur Fortführung des Projekts maßgeblich mitarbeitet. Er wird den Umzug der Geräte nach Mainz organisieren und die Wiederinbetriebnahme leiten.

Im August/September zwei neue Studierende das Team ergänzen im Austausch mit den beiden Studierenden, die ihre Abschlussarbeiten beendet haben werden.

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

Zurzeit haben wir keinen Überlapp mit anderen Vorhaben.

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

##### **Projektarbeiten**

- Inbetriebnahme und Validierung von Rohröfen für Freisetzungsversuche von Radionukliden und Dekontaminationsexperimente an Reaktorgrafit, Mosa Salar, März 2025.
- Inbetriebnahme eines Hochtemperaturofens, Bako Abdolla, April 2025.
- Die Herstellung von Plastiksintillatoren durch Polymerisation von Styrol und Vinyltoluol, Ron Bembene, Juni 2025.

Bachelorarbeit

- Zur Effizienzbestimmung von HPGe-Detektoren, Daniel Reiswich, Februar 2025.

Vortrag

- Validation of a Gamma Ray Spectrometry Method for the Characterization of irradiated Reactor Graphite from German Research Reactors, L. Meunier, SAAGAS, Wien März 2025.
- 

Veröffentlichungen:

- Characterization of irradiated reactor graphite from German research reactors, N. Heiss, L. Meunier, L. Lens, Ch. E. Duellmann, M. Knebel, U. W. Scherer: eingereicht
- Method validation for the characterization of  $\gamma$ -emitting radionuclides in irradiated graphite using the efficiency transfer software EFFTRAN. L. Meunier, N. Heiß, L. Lens, D. Reiswich, M. Knebel, U. W. Scherer: eingereicht

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9436A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> AFRY Deutschland GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO) TP: Koordination und Erstellung der BIM Modelle	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 75.963,73 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Andreas Bauer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiter/-in:</b> andreas.bauer@afry.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Durch die zu entwickelnde digitale Schnitt- und Verpackungsplanung kann die Anzahl der Abfallbehälter (Konradcontainer) optimiert und damit die Planung des Rückbaus verbessert werden. Ziel ist hier die Kostensenkung durch eine Reduktion der Containeranzahl und damit die Schonung des Endlagervolumens. Des Weiteren bietet DABKO eine modellbasierte Rückbauplanung und Visualisierung bzw. Aktivitätssimulationen. Diese tragen zu einer verbesserten Koordination und Kommunikation aller Prozessbeteiligten bei.

DABKO schafft durch die enge Zusammenarbeit der TU Darmstadt, der TÜV SÜD ET und AFRY Deutschland die Möglichkeit für Studierende des Bauingenieurwesens bzw. der Physik, sich mit dem Rückbau von aktivierten Betonstrukturen im Rahmen von interessanten und innovativen Arbeiten zu befassen. DABKO trägt damit zum Kompetenzerhalt und zur Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bei.

Die Zusammenarbeit von TU Darmstadt, TÜV SÜD ET und AFRY Deutschland hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens  
 Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells  
 Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmungsberechnung  
 Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung  
 Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens  
 Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank  
 Arbeitspaket 7: Dokumentation

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

Zu AP1: Mehrere Treffen zur Koordination, einer Abgrenzung der Arbeitsfelder und gegenseitigen Schulungen zum gemeinsamen Verständnis der Problematik haben stattgefunden. Kontakt zwischen Betreibern von kerntechnischen Anlagen und Rückbaufirmen wurde hergestellt, um den Doktoranden ein Gefühl für die Aufgabe und die technischen Optionen zu geben.

Eine Exkursion zum ITER und ein Gespräch mit der französischen Strahlenschutzbehörde wurden organisiert. Ziel war es den Studenten ein Gefühl für die Bedeutung des Strahlenschutzes bei der Fusion und die Regularien einer Genehmigung zu geben.

Zu AP2: Für die Arbeiten liegen die Modelle aktivierter Betonstrukturen aus vier Kernkraftwerken in verschiedenen Formaten vor. Zusätzlich wurden auch die Dampferzeuger und sonstige aktivierte Strukturen in 3D-Modelle überführt. Die Daten stammen aus mehreren deutschen und einem Schweizer AKW. Die Daten der kerntechnischen Anlagen und der Konrad Container (KC) wurden digitalisiert, die Formate abgestimmt und den Projektteilnehmern zur Verfügung gestellt.

Zu AP3: Zur Validierung der Methode hat AFRY den Kontakt zwischen der KTE und der TU Darmstadt hergestellt. Die Daten wurden für die Masterarbeit von Tim Ramaker (Ramaker, 2023) genutzt.

Als zusätzliches Feature wurde eine Methode entwickelt, um auf BIM Modelle Aktivitätsdaten zu übertragen. Hierzu werden verschiedenen Bauteilen des BIM Models einheitliche Aktivitätsdichten zugeordnet. Diese Bauteile werden dann in einem Container platziert und der gesamte Container anschließend voxelisiert. Daran anschließend wird mittels des Transportcodes FLUKA die Dosisleistung ermittelt. Dies ermöglicht eine einfache Verifizierung, ob die Dosisleistungskriterien der Endlager eingehalten werden.

Zu AP4: Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Rückbauprojekte von aktivierten Betonstrukturen evaluiert. Dazu wurde mit den beteiligten Betreibern der kerntechnischen Anlagen, den Rückbaufirmen und den Sachverständigen die praktische Zerlegung und Verpackung diskutiert.

Die Firma Braun BetonTec war einen Tag an der TU in Darmstadt und stellte kritische Fragen zum Zerlege-Algorithmus und gab wertvolle Tipps aus der Praxis. Anhand dessen wurde die Optimierung der Zerlegungs- und Verpackungsplanung orientiert und entsprechende Vorgänge angepasst.

Zu AP5: Als Benchmark wurde eine händisch optimierte Verpackungsplanung für alle aktivierten Baustrukturen einer Vor-Konvoi-Anlage (Tragring, Tragschild und Biologischer Schild) vorgenommen. Es gelang eine Zerlegung in 69 Konrad Container vom Typ 3 zu realisieren und damit die ursprüngliche Planung von ca. 100 KC vom Typ 3 deutlich zu unterbieten. Die von AFRY händisch optimierte Schnitt- und Verpackungsplanung wurde den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (siehe Arbeitspaket 2).

Weitere Benchmarks wurden durchgeführt und zur Verfügung gestellt, darunter befanden sich die händische Verpackungsplanung eines biologischen Schildes eines Siedewasserreaktors, die händische optimierte Verpackungsplanung aller aktivierten Strukturen eines Schweizer Kraftwerks und die händische Zerlegeplanung von Dampferzeugern.

Es wurden außerdem BIM Modelle für die Betonstrukturen zweier kompletter Kraftwerke angefertigt. Auch diese wurden den Projektteilnehmern zur Verfügung gestellt.

Zu AP6: Hier warten wir auf die Schnittstelle zu NWL von der BGE.

Zu AP7: Begleitend zu den jeweiligen Arbeitspaketen findet eine kontinuierliche Dokumentation der Ergebnisse statt.

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

Ein Folgeprojekt für DABKO 2 wird vorbereitet.

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

/

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

Tim Ramaker, 2023 Konformitätsuntersuchungen an Monte-Carlo-basierten Dosiseleistungs-berechnungen zur Dosiseleistungsreduktion im Außenraum eines gepackten Konrad-Containers, Masterarbeit Leibniz Universität Hannover & TU Darmstadt.

(<https://www.irs.uni-hannover.de/fileadmin/irs/Arbeiten/Master/masramak.pdf>)

Abschlussarbeit im Studiengang M.Sc. Umweltingenieurwissenschaften (2023): Entwicklung und VR-basierte Visualisierung eines Optimierungsalgorithmus zum kontrollierten Rückbau von aktivierten Strukturen

Poster KONTEC 2025 DABKO - Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Container beim Rückbau-technischer Anlage“

Autoren: B. Kandler, T. Ramaker, P. Mosler, A. Bauer, R. Sachse, F. Hofbauer, U. Rüppel

Poster KONTEC 2025 DABKO - Wiederverwertung von Beton im Rückbau: Eine ökonomische und ökologische Alternative zur Deponierung undendlagerung

Mosler, A. Bauer, R. Sachse, A. Harstrick A., B. Kandler, T. Ramaker, J. Birkhan, U. Rüppel, N. Pietralla

Abschlussarbeit im Studiengang B.Sc. Informatik (2025): Konzeption und Umsetzung einer Extended Reality-Anwendung zur Visualisierung der Dosiseleistungsverteilung in kerntechnischen Anlagen

Bautechnik (accepted) Wiederverwertung von Stahlbeton aus dem Rückbau von Kernkraftwerken - Abklinglagerung als Schlüssel zur CO2-Einsparung und Kostenreduktion? P. Mosler, A. Bauer, R. Sachse, A. Harstrick A., B. Kandler, T. Ramaker, J. Birkhan, U. Rüppel, N. Pietralla

Dissertation (Veröffentlichung voraussichtlich 2026) XR-KIS: An Extended Reality Information System for Knowledge Management in Nuclear Facilities (vorläufiger Arbeitstitel)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9436B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Darmstadt – Fachbereich Bau- & Umweltingenieurwissenschaften – Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO) TP: BIM, Game Engine, optimierte Verpackungsplanung und FLUKA Simulation	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 624.368,66 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> rueppel@iib.tu-darmstadt.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Zielsetzung von FORKA ist die Entwicklung, Optimierung und Erprobung anwendungsorientierter Technologien und Verfahren beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. Auch der Kompetenzerhalt beim Rückbau spielt bei FORKA eine wichtige Rolle.

Durch die zu entwickelnde optimierte Schnitt- und Verpackungsplanung können Abfallcontainer optimiert und die Planung des Rückbaus verbessert werden. Ziel ist hier die Kostenreduktion durch Containerreduktion. Des Weiteren bietet DABKO eine modellbasierte Rückbauplanung und Visualisierung. Das trägt zu einer verbesserten Koordination und Kommunikation aller Prozessbeteiligten bei. DABKO schafft durch die enge Zusammenarbeit der TU Darmstadt, der TÜV SÜD ET und AFRY die Möglichkeit für Studierende des Bauingenieurwesens und der Physik, sich mit dem Rückbau im Rahmen von interessanten und innovativen Arbeiten zu befassen. DABKO trägt so zum Kompetenzerhalt und der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bei.

Die Zusammenarbeit von TÜV SÜD ET, AFRY und der TU Darmstadt hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen. Es wird ein Demonstrator hergestellt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens

Die Projektbeteiligten der Technischen Universität Darmstadt stehen im regelmäßigen Austausch mit den andern Projektbeteiligten. Im Rahmen regelmäßiger Treffen werden Maßnahmen zur Datenbeschaffung erörtert, Meilensteine geprüft, diskutiert und die Ergebnisse kritisch durch alle Projektbeteiligten hinterfragt.

### Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells

Die für das Endlager vorgesehene, rückzubauende Struktur wird in 3D-Modellen erfasst (AP 2.1), die Aktivierungsdaten und die Bauteildichte werden in das Modell integriert (AP 2.2). Die dabei verwendeten Attribute werden in Abstimmung zwischen allen Projektpartnern festgelegt (AP 2.3).

### **Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmungsberechnung**

Wann immer der Optimierer für die Verpackungsplanung eine neue Anordnung der Segmente im Container errechnet, erfolgt die Aktualisierung der Dosiseistungsverteilung durch FLUKA. Die Einbettung von FLUKA in den globalen Optimierer erfordert die Schaffung einer Schnittstelle, z. B. in Form eines Shell-Skripts. Wichtige Arbeitsschritte sind die Schaffung dieser Schnittstelle, die automatisiert die voxelisierten Geometrien des Containers und der Schildsegmente an FLUKA übergibt, die Interpolation von Aktivitätskonzentrationen für die erzeugten Voxel innerhalb der Beton-Struktur auf Basis der Betreiberdaten und die Validierung der Physik in den Simulationen anhand von Testquellen und die Untersuchungen zur Laufzeitoptimierung der Simulationsrechnungen.

### **Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Die Optimierung wurde inzwischen neu strukturiert und verfolgt nun einen modularisierten Ansatz, bei dem Schneiden und Verpacken strikt getrennt betrachtet werden. Der Fokus liegt auf einer ringbasierten Zerschneidung mit radialen Schnitten, die durch Optimierungsalgorithmen wie Surrogate-Modelle gesteuert werden. Für das Verpacken wird ein spezialisierter Nesting-Algorithmus (Nest2D) genutzt, der eine effiziente 2D-Anordnung der Segmente in Standardcontainern erlaubt. Reinforcement Learning spielt aktuell keine Rolle mehr, da es sich als ungeeignet für die komplexen Anforderungen in DABKO erwiesen hat. Mithilfe geometrischer Operationen werden geplante Schnitte am Modell umgesetzt und in einem Containermodell verpackt. An diesem Container-Modellen werden weitere Rahmenbedingungen überprüft. Die finale Abschirmungsberechnung erfordert die Voxelisierung des Containers, um die Informationen für FLUKA zu exportieren.

### **Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens**

Um die Ergebnisse zu validieren, sollen die automatisierte Schnittplanung und die manuelle Schnittplanung der Firma AFRY verglichen werden. Die Anzahl der Container, die AFRY unter Berücksichtigung der Freigabebedingungen berechnet, dient als Benchmark. Für einen aussagekräftigen Vergleich stellt AFRY Datensätze für Kernkraftwerke zur Verfügung, die aus Aktivitätsdaten und dem geometrischen Modell des biologischen Schildes bestehen.

### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Die BGE verwendet im Rahmen der Freigabeprozesse eine Datenbank, in der jeder Container erfasst werden soll. Im Projekt DABKO wurde hierfür eine Schnittstelle entwickelt, die alle im Zuge der Schnitt- und Verpackungsplanung erzeugten Containerinformationen strukturiert ausgibt. Eine direkte Anbindung an die NWL-Datenbank ist derzeit noch nicht möglich. Die erzeugten Daten liegen jedoch bereits in einem Format vor, das eine spätere Integration in relationale Datenbanken problemlos ermöglicht.

### **Arbeitspaket 7: Dokumentation:**

Es wird ein gemeinsamer Arbeitsbericht mit AFRY und TÜV Süd erarbeitet und abgegeben.

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

### **Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells**

AP 2 wurde im Wesentlichen abgeschlossen. Zur Validierung des Verfahrens (s. AP 4) werden aktuell die Koordinatenursprünge der BIM-Modelle dreier Biologischer Schilder und dazugehörigen Aktivitätsdaten aufeinander abgestimmt, sodass sie in der Game Engine Unity nach dem Import automatisch übereinandergelegt werden.

### **Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmberechnung**

Es wurde damit begonnen, verschiedene Einzelfunktionen für den FLUKA-Import, die unabhängig voneinander entwickelt wurden, in ein allgemeines Programm umzulegen, das dann durch Parameterangaben oder eine Konfigurationsdatei die verschiedenen Funktionen lädt. Die Einzelfunktionen waren ursprünglich nötig, um verschiedene Inputs für FLUKA verarbeitbar zu machen oder z. B. Abklingverhalten zu simulieren, ohne dass ein neuer Export aus dem Voxelisierer von Nöten ist. Damit diese Funktionen weiterhin genutzt können, sollen diese als Teil der langfristigen Verwendbarkeit des Programms dauerhaft implementiert werden.

### **Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Die Methoden zur Berechnung der Schwerpunktlage, des Füllgewichts und des Störfallsummenwerts wurden erweitert. Im Projekt wurde die Zerschneide- und Verpackungsplanung implementiert, bei der der homogene Teil des Modells (Ringbereiche) per CSG-Verfahren zerschnitten und in 2D verpackt wird. Die Aktivitätsverteilung der verpackten Segmente wird voxelbasiert interpoliert oder homogen angenommen. Auf Basis des Container-Modells erfolgt die Prüfung der Transport- und Annahmebedingungen (Schwerpunktlage, Gewicht, Störfallsumme). Die Ergebnisse der Überprüfung werden dokumentiert. Die Übergabe der Segmentdaten an FLUKA ist über den Voxelisierer realisiert. Die CSG-Zerschneidung auf Basis der Zerschneide- und Verpackungsplanung bildet dabei die Grundlage für die Berechnungen und erzeugt die bepackten Container-Modelle. Eine Anwendung auf manuell bepackte Container sowie zur Bewertung der Dosisleistung in Bioschilden ist ebenfalls möglich. Derzeit sind die Module funktional getrennt, eine vollständige Prozesskette ist in Vorbereitung.

### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Ein direkter Zugriff auf die Datenbank ist derzeit nicht möglich, da noch keine API-Schnittstelle vorliegt. Die Programmstruktur wurde jedoch so gestaltet, dass ein späterer Export über definierte Schnittstellen unkompliziert möglich ist.

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

Allgemein: Zusammenführung der verschiedenen Module zu einer einheitlichen Prozesskette sowie Dokumentation der Programme und Datenschnittstellen.

AP 3: Laden der verschiedenen Geometrien entsprechend des benötigten Containers und der erforderlichen Materialien auf Basis von Nutzereingaben.

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

Keine

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

- Fachartikel zur wirtschaftlichen Abwägung Endlagerung von Betonstrukturen vs. Urban Mining nach ausreichender Abklingzeit

Gegenwärtig werden folgende Veröffentlichungen geplant:

- Beitrag für die KONTEC zur Pipeline vom vorhandenen Schnittelement zur FLUKA Simulation
- Veröffentlichung in der Sonderausgabe der "Kerntechnik"

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9436C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> TÜV SÜD Energietechnik GmbH Baden-Württemberg	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Digital optimierte Verpackungsplanung von aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO) TP: Datenbank	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.10.2022 bis 30.09.2025	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 18.622,45 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Regina Sachse	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> regina.sachse@tuvsud.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Zielsetzung von FORKA ist die Entwicklung, Optimierung und Erprobung anwendungsorientierter Technologien und Verfahren beim Rückbau kerntechnischer Anlagen. Auch der Kompetenzerhalt beim Rückbau spielt bei FORKA eine wichtige Rolle.

Durch die zu entwickelnde optimierte Schnitt- und Verpackungsplanung können Abfallcontainer optimiert und die Planung des Rückbaus verbessert werden. Ziel ist hier die Kostenreduktion durch Containerreduktion. Des Weiteren bietet DABKO eine modellbasierte Rückbauplanung und Visualisierung. Das trägt zu einer verbesserten Koordination und Kommunikation aller Prozessbeteiligten bei.

DABKO schafft durch die enge Zusammenarbeit der TU Darmstadt, der TÜV SÜD ET und AFRY die Möglichkeit für Studierende des Bauingenieurwesens und der Physik, sich mit dem Rückbau im Rahmen von interessanten und innovativen Arbeiten zu befassen. DABKO trägt so zum Kompetenzerhalt und der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses für den Rückbau kerntechnischer Anlagen bei.

Die Zusammenarbeit von TÜV SÜD ET, AFRY und der TU Darmstadt hat zum Ziel, die Wettbewerbsfähigkeit von deutschen Unternehmen beim Rückbau kerntechnischer Anlagen im internationalen Umfeld auszubauen. Es wird ein Demonstrator hergestellt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

### Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens

Während der Projektlaufzeit findet ein regelmäßiger Austausch der Projektbeteiligten statt. Im Rahmen regelmäßiger Treffen werden Meilensteine geprüft, diskutiert und die Ergebnisse kritisch durch alle Projektbeteiligten hinterfragt.

### Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells

Die für das Endlager vorgesehene, rückzubauende Struktur wird in 3D-Modellen erfasst (AP 2.1), die Aktivierungsdaten und die Bauteildichte werden in das Modell integriert (AP 2.2). Die dabei verwendeten Attribute werden in Abstimmung zwischen allen Projektpartnern festgelegt (AP 2.3).

### Arbeitspaket 3: Automatisierte Abschirmungsberechnung

Keine Beteiligung der TÜV SÜD ET an AP3.1 und 3.3.

AP 3.2: Experimentelle quantitative Verifikation an einem Referenzcontainer sowie Parallelisierung und Beschleunigung der FLUKA-Berechnungen.

#### **Arbeitspaket 4: Optimierung der Verpackungsplanung**

Keine Beteiligung der TÜV SÜD ET an AP4.1 bis 4.5.

#### **Arbeitspaket 5: Validierung des Optimierungsverfahrens**

Keine Beteiligung der TÜV SÜD ET an AP5.1 und 5.2.

#### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Die endlagerrelevanten Daten der beladenen KC werden aus dem BIM-Modell in eine speziell zu entwickelnde Datenbank exportiert. Basierend auf den Interessen der BGE soll die Datenbank alle gesetzlich erforderlichen Informationen enthalten. Dazu gehören der Inhalt der KC (Dosisleistung, Wassergehalt, etc.) und zusätzlich der Stand von Prüf- sowie Freigabeschritten zur Zwischen- und Endlagerung. Zusätzlich sollen ergänzende Informationen wie z. B. Bilddokumentationen erfasst werden können und eine eindeutige Zuordnung jedes physischen Containers zur Datenbank z. B. mittels QR-Codes oder NFC-Chips ermöglicht werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht ermittelte Werte, z. B. stoffliche Randbedingungen nach Wasserhaushaltsgesetz, werden in der Datenbank mit sinnvollen Werten belegt.

Ein externer Zugriff (ggf. durch App) auf die Datenbank zur Abfrage bestimmter Daten sowie die Änderung und Ergänzung bestimmter Daten soll ermöglicht werden. Die Entwicklung einer Schnittstelle zur digitalen Übergabe von Daten an die BGE ist vorgesehen.

In Abstimmung mit der BGE wird untersucht, inwieweit mit dem digitalen Tool DABKO der zeitliche Ablauf des Rückbaus inkl. Angabe der stofflichen und radiologischen Inhalte der KCs prognostiziert werden kann.

#### **Arbeitspaket 7: Dokumentation**

Begleitend zu den jeweiligen Arbeitspaketen findet eine Dokumentation der Ergebnisse statt.

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

#### **Arbeitspaket 1: Koordination des Gesamtvorhabens**

Regelmäßiger virtueller und persönlicher Austausch zwischen den Projektbeteiligten. Alle Projektbeteiligten sind über die Aktivitäten der anderen Projektbeteiligten informiert.

#### **Arbeitspaket 2: Erstellung des BIM-Modells**

Eine Abstimmung zu AP 2.3 hat stattgefunden. Das Arbeitspaket ist abgeschlossen.

#### **Arbeitspaket 3.2: Verifikation der Abschirmungsberechnungen**

Keine.

#### **Arbeitspaket 6: Schaffung einer zusätzlichen Datenbank**

Handbuch zur Nuclear Waste Logistics (NWL) wurde von der BGE bereitgestellt. Danach erforderliche und im Projekt erhobene Daten wurden abgeglichen.

#### **Arbeitspaket 7: Dokumentation**

Vorbereitung von Veröffentlichungen.

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

Dokumentation abschließen.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keine.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Präsentation auf der FORKA-Tagung in Berlin, 2024.

Postervortrag "Wiederverwertung von Beton im Rückbau: Eine ökonomische und ökologische Alternative zur Deponierung undendlagerung | Recycling Concrete in Decommissioning: An Economic and Ecological Alternative to Landfilling and Final Disposal" für die KONTEC im September 2025 in Dresden (in Vorbereitung)

Veröffentlichung "Wiederverwertung von Stahlbeton aus dem Rückbau von Kernkraftwerken" in der Zeitschrift Bautechnik (im Review)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9443
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> Aus- und Weiterbildung sowie Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen und Abfallprodukten aus Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen (EduCTUM)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.06.2023 bis 31.05.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 911.614,21 €
<b>Projektleiter:</b> Dr. Thomas Bücherl	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Thomas.buecherl@tum.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben hat die Ausbildung, Fortbildung und Weiterbildung, den Kompetenzerhalt sowie die Vermittlung von allgemeinen Informationen aus den Bereichen Produktkontrolle und Charakterisierung radioaktiver Abfälle zum Ziel. Eine auf einem Content Management System (CMS) basierende Webplattform zur Vermittlung der Lerninhalte und Informationen aus den Bereichen Produktkontrolle und Charakterisierung radioaktiver Abfälle wird realisiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Vorhaben ist unterteilt in die vier Arbeitspakete

- AP 1: „Technische Realisation“,
- AP 2: „Vermittlung der Lerninhalte“,
- AP 3: „Kommunikation“ und
- AP 4: „Summer School“

In AP 1 wird die erforderliche Infrastruktur für die Realisierung des Vorhabens bereitgestellt die mit den Lerninhalten aus AP 2 gefüllt wird. Mit AP 3 wird der Verbreitung der Vorhabenergebnisse Rechnung getragen. Im Rahmen einer „Summer School“ (AP 4) werden die im Vorhaben erarbeiteten Themengebiete in direktem Kontakt einem kleinen Personenkreis vermittelt. Die Bearbeitung der Arbeitspakete und ihrer Unterpunkte kann zum Teil unabhängig und parallel realisiert werden.

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

AP 1: Im ersten Halbjahr 2025 wurden Stabilität, Sicherheit und Administrationsfreundlichkeit der Server zur Nutzung von Programmen durch externe Nutzer weiter optimiert. Hierzu gehörte beispielsweise eine weiter verbesserte Absicherung gegen externe Angriffe aus dem Internet. Diese Maßnahme hatte wiederum Arbeiten zur Folge um weiterhin den externen Zugriff auf zur Verfügung gestellte Programme durch autorisierte externe Nutzer zu ermöglichen. Jeder neue Nutzer muss nach einer entsprechenden Anfrage manuell vom Systemadministrator angelegt werden. Dieser Vorgang wurde soweit automatisiert, dass nach Eingabe der Nutzerdaten sofort ein nutzereigenes Verzeichnis mit allen benötigten Daten auf einem NAS-Laufwerk angelegt wird. Für die Nutzung des Gamma-Spektroskopieprogramms LVis wurde ein Automatismus eingebaut, der bei jedem Start durch einen Nutzer dessen Daten auf den neuesten Stand bringt, d. h.

Programmupdates werden automatisch übernommen und müssen nicht mehr vom Systemadministrator für jeden Nutzer einzeln eingespielt werden. Das Gamma-Spektrometrieprogramm Lvis kann nunmehr für online-Messungen mit einem NaI- und einem LaBr3-Detektor genutzt werden. Durch weitere Optimierungen steht nun ein 24/7-Betrieb bereit. Entwickelte Kontrollprogramme führen bei festgestellten Unterbrechungen des Netzwerks einen automatischen Neustart der Spektrenaufnahme aus, d. h. die Übertragung der Messdaten wird automatisiert fortgesetzt. Ein Anfang des Jahres eingebundener HPGe-Detektor musste aufgrund eines Hardwaredefekts wieder entfernt werden.

AP 2: Ende 2024 wurde der Messaufbau für die online-Messungen im Rahmen eines Gamma-Spektrometrie-Praktikums von Studenten der TU München genutzt. Eine entsprechende (detaillierte) Praktikumsanleitung ist auf einer Webseite verfügbar. Sie wurde entsprechend den Rückmeldungen der Teilnehmer überarbeitet.

Parallel hierzu wurde intensiv an den Inhalten der Webseiten gearbeitet. Bereits existierende Webseiten wurden hinsichtlich ihrer Inhalte, Verständlichkeit und Darstellung entsprechend den zugeordneten Nutzeranforderungen (Einsteiger, Fortgeschrittene, Anwender, Experte) überprüft. Festgestellte Unklarheiten wurden, wo sinnvoll, durch zusätzliche Animationen, Grafiken, Videos etc. klarer beschrieben, Fehler korrigiert und fehlende Verweise auf (neuerstellte) Inhalte eingearbeitet. Aus den verschiedenen Bereichen des segmentierten Gamma-Scannings ergeben sich zahlreiche Querverbindungen zu Beschreibungen in den Bereichen der Gamma-Spektrometrie. Die Erarbeitung dieser Seiten nahm deshalb den größten Teil der Entwicklungszeit ein. Begleitend werden zahlreiche (Kalibrations-)Messungen zur Gamma-Spektrometrie und zum segmentierten Gamma-Scanning durchgeführt und durch Videoaufnahmen dokumentiert. Diese dienen der Verdeutlichung der praktischen Vorgehensweisen bei den Messungen und werden nach ihrer Bearbeitung in die entsprechenden Webseiten integriert. Mit der Erarbeitung von Inhalten für das Themengebiet Radiographie wurde begonnen.

Verschiedene Berechnungstools für Aspekte des segmentierten Gamma-Scannings wurden bereits in 2024 erstellt. Diese wurden in praktischen Anwendungen an der RCM hinsichtlich ihrer korrekten Funktion getestet, identifizierte Fehler behoben sowie weitere Tools entwickelt. Arbeiten an der barrierefreien Nutzung dieser Tools wurden durchgeführt. Weitere Tools sind in Vorbereitung.

Die Nutzung der Ende 2024 neugestalteten Website zeigt an einigen Stellen noch Optimierungsbedarf, wie immer wieder von verschiedenen Personen durchgeführte Test zeigten. Diese werden ebenso wie die Kommentare von (Test-)Nutzern in den weiteren Bearbeitungsschritten berücksichtigt.

AP 3: Die Präsentation der bislang erzielten Ergebnisse, d. h. die Website mit den verfügbaren Informationen unterteilt nach Schwierigkeitsgrad, die Möglichkeit Gamma-spektrometrische Messungen mit verschiedenen Detektoren (aktuell NaI und LaBr3) nach persönlichem Login jederzeit online durchführen zu können sowie die geplanten Integrationen weiterer Software, wurde auf Tagungen, Konferenzen und Treffen intensiv diskutiert und mit großem Interesse aufgenommen.

AP 4: Für April 2026 ist die Durchführung einer Summer School an der RCM geplant. Mit den Vorbereitungen hierzu wurde begonnen. Die derzeitigen Planungen sehen vor, dass an einem Vormittag Kollegen aus verschiedenen europäischen Ländern, die im Bereich der Charakterisierung radioaktiver Abfälle tätig sind, für Vorträge und Diskussionen mit den Teilnehmern der Summer School zur Verfügung stehen. Praktische Übungen aus dem Bereich der zerstörungsfreien Charakterisierung von radioaktiven Abfallgebinden sowie Besichtigungen der entsprechenden Einrichtungen an der RCM sollen durchgeführt werden.

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

AP 1: Für das zweite Halbjahr 2025 ist ein Umzug des Messplatzes vorgesehen. Hierbei soll dessen Aufbau optimiert und, falls möglich, weitere Messgeräte eingebunden werden. Ein großes Problem stellt seit Mitte 2024 der sehr langsame Zugriff auf die Webseite <https://eductum.de> dar. Eine genaue Analyse des Grundes hierfür muss durchgeführt und gegebenenfalls der Webhoster gewechselt werden. Dies kann zur Optimierung der derzeitigen Dateistruktur des Servers genutzt werden, die aufgrund der historisch bedingten Wechsel verwendeter Templates und Websiteersteller sehr heterogen ist.

AP 2: Die vordringlichsten und aktuell bereits mit höchster Priorität durchgeführten Arbeiten betreffen die Erstellung der weiteren Inhalte. Diese müssen, sobald sie einen publizier- und nutzbaren Umfang erreicht haben, in die bestehenden bzw. neu zu erstellende Webseiten integriert werden. Bestehende Webseiten müssen hinsichtlich der Verlinkung auf die neuen Seiten überarbeitet werden. Begleitend sind Grafiken, Animationen, Videos etc. zur Veranschaulichung der Lerninhalte neu zu erstellen bzw. bereits existierende gegebenenfalls weiter zu optimieren. Bevorzugt werden weitere Inhalte zu den Themenbereichen segmentiertes Gamma-Scanning und Gamma-Spektrometrie für alle Nutzerebenen erstellt. Aber auch die Bereiche Radiographie und Tomographie sollen bereits bearbeitet werden.

Für die Vermittlung der Lerninhalte des Bereichs segmentiertes Gamma-Scanning ist die Bereitstellung eines Programms zur Auswertung segmentierter Gamma-Scan-Messungen vorgesehen. Die entsprechend erforderlichen Vorarbeiten sind bereits zu einem großen Teil abgeschlossen, die entsprechenden Tutorials in Form von Texten, Videos etc. müssen nach Verfügbarkeit des Programms erstellt werden. Da online-Messungen in diesem Fall nicht möglich sind, werden entsprechende gemessene Datensätze zur Verfügung gestellt. Ein weiteres Programm zur Auswertung bereitgestellter Gamma-Spektren soll nach Möglichkeit integriert werden. Von Seiten des Herstellers wurde bereits die prinzipielle Bereitschaft hierzu signalisiert. Die Einbindung weiterer Programme für die Nutzung durch den Anwender nach dem Herunterladen wird mit weiteren Entwicklern derzeit diskutiert.

AP 3: Der Verbreitung der Vorhabenergebnisse wird durch Teilnahme an weiteren Tagungen, Austausch mit (Fach-)Kollegen, Herstellern von Messsystemen etc. Rechnung getragen.

AP 4: Die Vorbereitung der Summer School 2026 wird weiter vorangetrieben. Erste Flyer mit „Save the Date“ sollen zum FORKA Doktorandenseminar im Vorfeld der KONTEC 2025 und auf der KONTEC 2025 verteilt werden.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

keiner

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

26.02.2025: SAGAAS, Wien, Österreich

19.05.2025: ENTRAP – Technical Meeting, Lund, Schweden

09.06.2025: ANIMMA; Valencia, Spanien

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9446A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Karlsruher Institut für Technologie (Universitätsaufgabe) – Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften – Institut für Technologie und Management im Baubetrieb	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebindebinden (ZIKA) TP: Konzeption, Bau des Demonstrators und Durchführung von Test- und Praxisphase	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2023 bis 31.08.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 567.564,65 €
<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 des Forschungsantrages ZIKA ist es, die Innenkorrosion an radioaktiven Fassgebindebinden mittels zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) automatisch zu erkennen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden mit den bisherigen Forschungsergebnissen des Vorgängerprojektes EMOS kombiniert, das sich mit äußereren Schadenseinwirkungen der Fassgebinde beschäftigte. So können speziell Innenkorrosion und sowie mögliche innere Schadensquellen erkannt werden, bevor diese zum sicherheitsrelevanten Problem werden. Bislang konnte Innenkorrosion erst erkannt werden bei z.B. Blasenbildung an der Lackierung des Fassgebindebindes oder äußerlichen Veränderungen der Oberfläche. Wenn innere Schäden jedoch äußerlich bereits zu erkennen sind, ist die Integrität des beschädigten Fassgebindebindes nicht mehr gegeben, was erhebliche Konsequenzen nach sich zieht. Deshalb ist eine Früherkennung vor Ausfall der Integrität von besonderer Bedeutung für Zwischenlager mit schwach- und mittelradioaktiven Abfallgebindebinden.

Die Umsetzung des Projekts erfolgt durch vier Verbundpartner. Das Karlsruher Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (KIT-TMB), Fachbereich Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke, erstellt die Konzeption und baut den Demonstrator, basierend auf den Arbeiten des Vorgängerprojektes, und führt die Praxistests durch. Als Spezialist für ZfP-Verfahren wird die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die Erkennung der Innenkorrosion mittels Thermografie, Ultraschall, Laservibrometrie, Magnetische Streuflussmessung und Wirbelstrom untersuchen. Diese Verfahren werden möglichst realitätsnah, systematisch untersucht und evaluiert. Als direkter Anwender des Demonstrators fungiert die Landessammelstelle Berlin (ZRA). Der einheitliche, maschinelle und automatisierte Inspektionsprozess würde zu einer erheblichen Reduktion der Aufwände bei der Landessammelstelle führen. In diesem Zusammenhang stellt die Zusammenarbeit mit den Kraftanlagen Heidelberg GmbH (KAH), Teil der Nuklearen Division von Bouygues Construction Expertise Nucleaire, ein enormes Potenzial dar, das System sowohl in Deutschland als auch im Ausland bekannt zu machen und einzusetzen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt ZIKA setzt sich aus folgenden Arbeitspaketen zusammen:

**AP0:** Planungs- und Projektberatung die gesamte Projektlaufzeit durch KAH und ZRA

**AP1:** Grundlagenarbeiten

**AP2:** Voruntersuchung

**AP3:** Bestimmung des Parameterraums

**AP4:** ZfP-Auswahl

**AP5:** Softwareentwicklung

**AP6:** Konzeptionelles Systemdesign

**AP7:** Komponentenzusammenstellung

**AP8:** Bau des Demonstrators

**AP9:** Sensorikinstallation

**AP10:** Test- und Validierungsphase

**AP11:** Praxisphase

**AP12:** Evaluierung

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

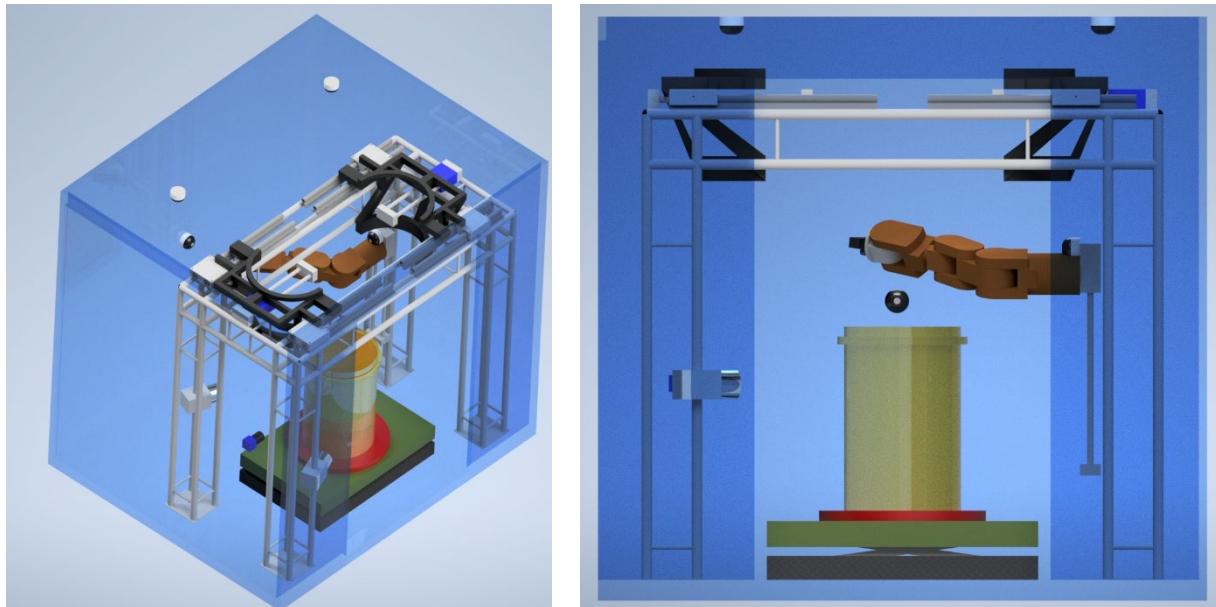
In den Berichtszeitraum fallen die APs 4, 5, 6 7 und 8.

Das AP 4, welches die ZfP-Auswahl beinhaltet, wurde planmäßig mit dem Meilenstein 1 im März mit dem 6. Projekttreffen abgeschlossen. Hierbei wurde sich einstimmig und wie auch von der BAM validiert und empfohlen für ein Thermografie-System entschieden. Nach Anfrage mehrerer Angebote, konnte die BAM das System von InfraTec, was im Demonstrator verbaut werden soll, vorab auf Eignung testen, mit zufriedenstellenden Ergebnissen.

Das AP 5 beinhaltet die Softwareentwicklung. Das AP erstreckt sich über einen Großteil des Projekts und wird daher projektbegleitend entwickelt. Im Berichtszeitraum wurde die Eignung von Power Automate für die automatische Berichterstellung geprüft. Aufgrund von vergleichbaren Projekten, die in Power Automate erstellt worden sind, wird diese Option als vielversprechend bewertet. Final kann dies aber erst bewertet werden, wenn die Ergebnisse aus dem Demonstrator vorliegen.

Die AP 6 „Konzeptionelles Systemdesign“ und AP 7 „Komponentenzusammenstellung“ stehen unmittelbar vor Abschluss. Das grundlegende Design wurde Ende im April in einem gemeinsamen Meeting final abgestimmt. Zur Fertigstellung des AP 7 muss noch das finale Design des Greifers für die Fässer geklärt werden. Bilder des Konzepts sind am Ende von 3. zu sehen. Da der Demonstrator für voraussichtlich drei Monate in Berlin im Kontrollbereich getestet wird, findet ein enger Austausch mit der Strahlenschutzverantwortlichen statt, um ein Konzept für die problemlose Rückholung zu ermöglichen.

Der Bau des Demonstrators gemäß AP 8 ist eingeleitet. Dies bedeutet, dass in der Werkstatt ein geeigneter Platz für den Bau reserviert wurde und mit dem Werkstattpersonal die Umsetzbarkeit geprüft worden ist. Der Start des tatsächlichen Baus ist für Anfang August geplant, sobald die ersten Bestellungen eintreffen.



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

Für das nächste Halbjahr ist geplant, den Bau des Demonstrators inklusive Messsensorik abzuschließen. Weiterhin soll die Steuerung so weit sein, dass ein Durchlauf mit Probekörper möglich ist und die einzelnen Messsysteme Messungen durchführen können.

Begleitend zum Bau des Demonstrators werden die Probekörper für die Testphase in Karlsruhe vorbereitet.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebinde (EMOS)“ mit dem BMBF Förderkennzeichen FKZ 15S9520.

#### 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Aktualisierung der Kurzbeschreibung auf der Homepage des TMB: [https://www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte\\_7870.php](https://www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte_7870.php)
- Veröffentlichung eines Abstracts für die Kontec 2025 [https://www.kontec-symposium.com/\\_files/ugd/8a9f3d\\_70c4f74c26d140759a67d99ec0c658b7.pdf](https://www.kontec-symposium.com/_files/ugd/8a9f3d_70c4f74c26d140759a67d99ec0c658b7.pdf)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9446B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinde (ZIKA) TP: Untersuchung und Bewertung der Eignung verschiedener ZfP-Verfahren, sowie Hard- und softwaremäßige Unterstützung bei der Integration von ZfP-Verfahren in den Demonstrator.	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2023 bis 31.08.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 289.823,13 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr.-Ing. Julien Lecompagnon	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> julien.lecompagnon@bam.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel des Forschungsantrages ZIKA ist es, die Innenkorrosion an radioaktiven Fassgebinde mittels zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) automatisch zu erkennen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden mit den bisherigen Forschungsergebnissen des Vorgängerprojektes EMOS kombiniert, das sich mit äußerer Schadenseinwirkungen der Fassgebinde beschäftigte. So können speziell Innenkorrosion und sowie mögliche innere Schadensquellen erkannt werden, bevor diese zum sicherheitsrelevanten Problem werden. Bislang konnte Innenkorrosion erst erkannt werden bei z.B. Blasenbildung an der Lackierung des Fassgebinde oder äußerlichen Veränderungen der Oberfläche. Wenn innere Schäden jedoch äußerlich bereits zu erkennen sind, ist die Integrität des beschädigten Fassgebinde nicht mehr gegeben, was erhebliche Konsequenzen nach sich zieht. Deshalb ist eine Früherkennung vor Ausfall der Integrität von besonderer Bedeutung für Zwischenlager mit schwach- und mittelradioaktiven Abfallgebinde.

Die Umsetzung des Projekts erfolgt durch vier Verbundpartner: dem Karlsruher Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (KIT-TMB), Fachbereich Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), der Landessammelstelle Berlin (ZRA) und der Kraftanlagen Heidelberg GmbH (KAH), Teil der Nuklearen Division von Bouygues Construction Expertise Nucleaire.

Zielsetzung der BAM im Projekt ZIKA ist es, geeignete ZfP-Verfahren zur Detektion von Innenkorrosion an Fassgebinde mit verschiedenen Füllzuständen zu identifizieren, zu validieren und die geeigneten Verfahren für den automatisierten Einsatz in der Demonstratoranlage weiterzuentwickeln und im Testbetrieb zu verifizieren. Schwerpunktmaßig werden dazu verschiedene Ausprägungen der aktiven Infrarotthermografie, Ultraschall- und Wirbelstromprüfung untersucht und deren Anwendbarkeit quantifiziert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt ZIKA setzt sich aus folgenden Arbeitspaketen zusammen:

**AP0:** Planungs- und Projektberatung die gesamte Projektlaufzeit durch KAH und ZRA

**AP1:** Grundlagenarbeiten

**AP2:** Voruntersuchung

**AP3:** Bestimmung des Parameterraums

**AP4:** ZfP-Auswahl

**AP5:** Softwareentwicklung

**AP6:** Konzeptionelles Systemdesign

**AP7:** Komponentenzusammenstellung

**AP8:** Bau des Demonstrators

**AP9:** Sensorikinstallation

**AP10:** Test- und Validierungsphase

**AP11:** Praxisphase

**AP12:** Evaluierung

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

Zentraler Aspekt des Berichtszeitraumes im Teilprojekt BAM war der Abschluss des AP4: „ZfP-Auswahl“, welcher im ersten Projektmeilenstein endete. Nach sorgfältiger Prüfung aller untersuchten ZfP-Verfahren auf die Detektionsgüte innerer Korrosion und der Eignung des Einsatzes in einer automatisierten Anlage verblieb einzig die aktive thermografische Prüfung als geeignetes Prüfverfahren. Alle anderen untersuchten Verfahren konnten keine rückseitige Korrosion an lackierten Stahlfässern detektieren. Diese Einschätzung wurde zum Meilenstein von den anderen Projektteilnehmern einstimmig bestätigt und somit wurde aktive Thermografie für den weiteren Projektfortschritt als Prüfverfahren ausgewählt. Der erste Projektmeilenstein wurde damit fristgerecht erfüllt.

Weitere Arbeiten umfassten im Rahmen des AP5: „Softwareentwicklung“ die Weiterentwicklung der Defekterkennungsroutinen für die durch aktive Thermografie ermittelten Messdaten. Hauptschwierigkeit ist weiterhin der Einfluss der Unregelmäßigkeiten auf der Fassoberfläche (Kratzer, Lackschäden, Verschmutzungen, etc.), welcher sowohl die Erwärmung als auch die Bestimmung der Oberflächentemperaturänderung mittels Infrarotkamera erschwert. Hier wurde mit KI-Methoden versucht, den Oberflächeneinfluss von den Defektsignalen zu trennen und so zu einer sicheren Detektion von Innenkorrosion zu gelangen. Es konnte gezeigt werden, dass dies mit hoher Detektionswahrscheinlichkeit möglich ist (siehe 6. Berichte und Veröffentlichungen). Aktuelle Arbeiten zielen auf die weitere Verbesserung der Detektionswahrscheinlichkeit und der Verringerung von Falschpositiven.

In den Arbeitspaketen AP6: „Konzeptionelles Systemdesign“, AP7: „Komponentenzusammenstellung“ und AP8: „Bau des Demonstrators“, die federführend beim Projektpartner KIT bearbeitet werden, wurde wesentlicher Anteil in der Konzeption und Beschaffung der thermografischen Prüftechnik für die geplante Demonstratoranlage genommen.

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

Für den nächsten Berichtszeitraum ist die Fortführung der Arbeiten im AP5: „Softwareentwicklung“ geplant. Hier soll nicht nur die Performance der Datenauswertung weiter verbessert werden, sondern auch auf die exakten Gegebenheiten der Demonstratoranlage angepasst und für den automatisierten Betrieb befähigt werden.

In den Arbeitspakten AP8: „Bau des Demonstrators“ und AP9: „Sensorikinstallation“ werden weiterhin Unterstützungsleistungen für den Projektpartner KIT erbracht. Weiterhin ist geplant, die thermografische Messsensorik in der Demonstratoranlage in Betrieb zu nehmen, sodass der nächste Berichtszeitraum mit dem zweiten Meilenstein enden kann, welcher eine vollständig integrierte Demonstratoranlage zum Ziel hat.

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

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebinde (EMOS)“ mit dem BMBF Förderkennzeichen FKZ 15S9520.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Im Berichtszeitraum wurden die Methodik und Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung auf zwei Fachkonferenzen international und national präsentiert und mit dem anwesenden Fachpublikum diskutiert:

- Präsentation und Conference Paper im Rahmen der „SPIE Defense + Commercial Sensing - Thermosense: Thermal Infrared Applications XLVII“ Konferenz, Orlando, USA; Beitrag: doi:10.1117/12.3052732
- Präsentation auf der „Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP)“, Berlin; Beitrag: <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=31229>

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9446C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Kraftanlagen Heidelberg GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinde (ZIKA) TP: Planung und Projektberatung, sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.09.2023 bis 31.08.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 70.043,72 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Jonas Braun	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> jonas.braun@bcen-kraftanlagen.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel des Forschungsantrages ZIKA ist es, die Innenkorrosion an radioaktiven Fassgebinde mittels zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) automatisch zu erkennen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden mit den bisherigen Forschungsergebnissen des Vorgängerprojektes EMOS kombiniert, das sich mit äußerer Schadenseinwirkungen der Fassgebinde beschäftigte. So können speziell Innenkorrosion, sowie mögliche innere Schadensquellen erkannt werden, bevor diese zum sicherheitsrelevanten Problem werden. Bislang konnte Innenkorrosion erst erkannt werden bei z. B. Blasenbildung an der Lackierung des Fassgebinde oder äußerlichen Veränderungen der Oberfläche. Wenn innere Schäden jedoch äußerlich bereits zu erkennen sind, ist die Integrität des beschädigten Fassgebinde nicht mehr gegeben, was erhebliche Konsequenzen nach sich zieht. Deshalb ist eine Früherkennung vor Ausfall der Integrität von besonderer Bedeutung für Zwischenlager mit schwach- und mittelradioaktiven Abfallgebinde.

Die Umsetzung des Projekts erfolgt durch vier Verbundpartner. Das Karlsruher Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (KIT-TMB), Fachbereich Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke, erstellt die Konzeption und baut den Demonstrator, basierend auf den Arbeiten des Vorgängerprojektes, und führt die Praxistests durch. Als Spezialist für ZfP-Verfahren wird die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), die Erkennung der Innenkorrosion mittels Thermografie, Ultraschall, Laservibrometrie, Magnetische Streuflussmessung und Wirbelstrom untersuchen. Diese Verfahren werden möglichst realitätsnah, systematisch untersucht und evaluiert.

Als direkter Anwender des Demonstrators fungiert die Landessammelstelle Berlin (ZRA). Der einheitliche, maschinelle und automatisierte Inspektionsprozess würde zu einer erheblichen Reduktion der Aufwände bei der Landessammelstelle führen. In diesem Zusammenhang stellt die Zusammenarbeit mit den Kraftanlagen Heidelberg GmbH (KAH), Teil der Nuklearen Division von Bouygues Construction Expertise Nucleaire, ein enormes Potenzial dar, das System sowohl in Deutschland als auch im Ausland bekannt zu machen und einzusetzen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Forschungsprojekt ZIKA setzt sich aus folgenden Arbeitspaketen zusammen:

**AP0:** Planungs- und Projektberatung

**AP1:** Grundlagenarbeiten

**AP2:** Voruntersuchung

**AP3:** Bestimmung des Parameterraums

**AP4:** ZfP-Auswahl

**AP5:** Softwareentwicklung

**AP6:** Konzeptionelles Systemdesign

**AP7:** Komponentenzusammenstellung

**AP8:** Bau des Demonstrators

**AP9:** Sensorikinstallation

**AP10:** Test- und Validierungsphase

**AP11:** Praxisphase

**AP12:** Evaluierung

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

Im Berichtszeitraum wurden im Projekt mehrere Arbeitspakete (AP) erfolgreich vorangetrieben. Die Auswahl der zerstörungsfreien Prüfverfahren (AP 4) wurde abgeschlossen. Nach umfassenden Prüfungen und Beratungen, fiel die Wahl auf die aktive Thermografie als geeignetes Verfahren zur Detektion von Korrosion in lackierten Stahlfässern. Der zugehörige Meilenstein wurde fristgerecht erreicht.

Die Prüfung, im Rahmen des AP 5 (Softwareentwicklung), der Anwendung von Power Automate zur automatischen Berichterstellung zeigt sich vielversprechend, wobei endgültige Ergebnisse noch ausstehen. Parallel wurde die Weiterentwicklung von Defekterkennungsroutinen durchgeführt, um den Einfluss von Oberflächenunregelmäßigkeiten zu minimieren.

Die Arbeitspakete AP 6 (Konzeptionelles Systemdesign) und AP 7 (Komponentenzusammenstellung) stehen kurz vor dem Abschluss. Das grundlegende Design wurde final abgestimmt, während letzte Details, wie das Design des Greifers, geklärt werden müssen. Hierbei konnte KAH hinsichtlich der Strahlenschutzanforderungen für den bevorstehenden Demonstratortest beratend unterstützen.

AP 8: Bau des Demonstrators – Die Vorbereitungen für den Bau des Demonstrators (AP 8) sind abgeschlossen, und der Start des tatsächlichen Baus ist für August geplant. Ein geeigneter Platz in der Werkstatt des KIT wurde reserviert und die Umsetzbarkeit geprüft.

Das Projekt hat signifikante Fortschritte in der Entwicklung der thermografischen Prüftechnik für die Demonstratoranlage gezeigt.

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

Für den folgenden Berichtszeitraum ist der Abschluss des Bau des Demonstrators, einschließlich der Installation und Inbetriebnahme der Messsensorik, insbesondere der thermografischen Sensoren, geplant. Gleichzeitig wird die Steuerung des Systems so entwickelt, dass Testdurchläufe mit vorbereiteten Probekörpern durchgeführt werden können und die Messsysteme aktiv Messungen vornehmen. Die Softwareentwicklung wird fortgesetzt, mit dem Ziel, die Performance der Datenauswertung zu verbessern und die Software für den automatisierten Betrieb der Demonstratoranlage anzupassen. Der Berichtszeitraum soll mit dem Erreichen des zweiten Meilensteins enden, der eine vollständig integrierte Demonstratoranlage vorsieht.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Folgeprojekt des Forschungsprojekts „Entwicklung eines mobilen, automatisierten, optischen Inspektionssystems für radioaktive Fassgebinde (EMOS)“ mit dem BMBF Förderkennzeichen FKZ 15S9520.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

- Aktualisierung der Kurzbeschreibung auf der Homepage des TMB: [https://www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte\\_7870.php](https://www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte_7870.php)
- Am 19.09.2024 wurden die Aktivitäten im Projekt ZIKA den Projektteilnehmern des Projektes „Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme (CODAP)“ der OECD/NEA im Rahmen einer Technical Tour auf dem Gelände der BAM vorgestellt...

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Einfluss von natürlichen nanopartikulären Phasen auf die Radionuklidverteilung im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 30.04.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 498.769,96 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Thorsten Schäfer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> thorsten.schaefer@uni-jena.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem End-lager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und stellen einen integralen Bestandteil der Radioökologie dar. Untersuchungen zu RN-transport, -speziation und -partitionierung im Boden sowie der RN-aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u. a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen im wurzelnahen Boden (Rhizosphäre). Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- TP-A: Remobilisierung und Einfluss natürlicher nanopartikulärer Phasen auf die Verteilung von Radionukliden während des Transportes im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze
- AP-1: Variation des Wasserstandes in Laborlysimetern
- AP-2: Implementierung der Wasserspiegelschwankung in Hydrus 2D/3D und ECOLEGO
- AP-3: Bepflanzung der Lysimeter mit anschließender Untersuchung von Porenwässern
- AP-4: Durchführung konsekutiver Umlaufsäulenexperimente
- AP-5: Sensitivitätsanalyse des bestehenden Modellierungsansatzes der Laborlysimeter mit neu generierten Daten zu Unterbodensystemen

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

**AP1:** Die Laborlysimeter liefen planmäßig weiter mit dem zuvor erhöhten Wasserspiegel mit Grimsel (GTS) – Grundwasser bei 20°C für insgesamt ca. 150 Tage. Physikochemische sowie hydraulische Parameter wurden weiter im Monitoring überwacht. Bevor der Wasserspiegel wieder durch Trennung des Zuflusses und Evaporation abgesenkt wurde, wurde eine Probenahme der Porenwässer und Analytik mittels Routineanalytik für Kationen, Anionen und DOC. Kolloidale Phasen wurden mittels asymmetrischer Fluss-Feldfluss-Faktionierung (AF4) gekoppelt mit ICP-MS durch gleichzeitigen Elementbestimmung untersucht. Hierbei zeigten sich systematische Fluoreszenzmuster bei hydrodynamischen Größen von ca. 10 nm und gleichzeitig assoziierte Elementmuster von Fe und Ca. Für U und Cs wurden nur geringfügig kolloidassoziierte Konzentrationen nachgewiesen. Weiterhin wird der ansteigende Wasserspiegel mit Probenahmen begleitet.

**AP2:** Die Softwareeinarbeitung wurde fortgesetzt.

**AP3:** Im Zuge der Vorexperimente zur Bepflanzung der Lysimeter wurden zwei studentische Qualifikationsarbeiten (Master Projektmodule) abgeschlossen. Es konnte u.a. gezeigt werden, dass Selen und Illit nach 1,5 Jahren in einer künstlichen Regenwassermatrix keine weitere Interaktion im Vergleich zur Reaktion nach wenigen Tagen zeigen. Weiterhin wurde die Koagulationskinetik von Illit mit organischen Säuren als Stellvertreter für Wurzelexsudate untersucht. Es wurde gezeigt, dass in der Reihenfolge Weinsäure > Citronensäure > Apfelsäure die hydrodynamischen Durchmesser als Funktion der Konzentration und des pH-Wertes zunahmen. Die zweite Arbeit zeigte Herausforderungen der Charakterisierung von in hydroponischen Systemen beprobteten Wurzelexsudaten und deren Interaktion mit Selen auf. Eine Interaktion im Zuge des Kurzzeitexperimentes konnte nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden.

**AP4:** Die konsekutiven Säulenexperimente mit den ersten drei Horizonten des RefeSol 01A wurden geplant und durchgeführt. Abweichend von der bisherigen Planung wurde dabei auf ein offenes Experimentdesign zurückgegriffen, da dieses sich besser zur Modellvalidierung eignet. Die Experimente wurden in zweifacher Ausführung durchgeführt. Zunächst kam dabei für die erste Säule mit dem Bodenmaterial des C-Horizontes eine Tracerlösung mit U, Cs, Se, I und Br sowie Illit-Nanopartikeln zum Einsatz. Anschließend wurden die weiteren Säulen mit dem B- und A-Bodenmaterial jeweils mit dem Effluenten der vorherigen Säule gespeist. Parallel wurden für jeden Horizont auch Versuche mit der ursprünglichen Tracerlösung durchgeführt, damit eventuelle Unterschiede zwischen den Säulen evaluiert werden können. Als Analysemethoden kamen IC, ICP-MS/OES, HCO<sub>3</sub>-Titration, LC-OCD, NTA sowie AF4 gekoppelt mit ICP-MS zum Einsatz. Darüber hinaus wurde mit Python und PhreeqcRM ein Transportmodell implementiert, dass die Modellierung der Säulen ermöglichen soll.

**AP5:** Parallel zu den Säulenversuchen (AP4) wurden zusätzliche Batch-Versuche mit dem Unterbodenmaterial und der dort eingesetzten Tracerlösung durchgeführt.

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

Im Zuge eines Projekt-Workshops zu Beginn des nächsten Berichtszeitraumes werden für alle Arbeitspakete kollaborative Planungen erstellt und geplante Weiterarbeiten spezifiziert.

**AP1:** Der Anstieg des Wasserspiegels wird mittels Probenahmen und hydrogeochemischer Analytik sowie Kolloidalanalytik weiter überwacht. Weiterhin wird die finale Feststoffprobenahme geplant.

**AP2:** Die aus der Variation des Wasserspiegels bei den Laborlysimetern gewonnenen Daten sollen mit einem HYDRUS-Modell abgeglichen werden. Dabei dienen die Einstellungen der Mariottischen Flaschen als Inputparameter, woraufhin der Modelloutput mit den

experimentellen Ergebnissen abgeglichen werden soll. Dabei sollen verschiedene Modellansätze, vor allem im Hinblick auf die Hysterese, verglichen werden.

**AP3:** Topfexperimente werden mit den Partnern LUH-IRS, HZDR, UB und ÖI geplant. Abweichend zur AP3 wird hierbei der Fokus von der Bepflanzung der Lysimeter auf Topfexperimente verlegt.

**AP4:** Die aus den Säulenexperimenten gewonnenen Daten sollen gesichtet und aufbereitet werden. Anschließend soll unter Einbezug des kolloidalen Transports ein Modell der Säulen erstellt und auf Grundlage der experimentellen Daten validiert werden.

**AP5:** Nach der Validierung des UNiSeCs-Ansatzes für den Unterboden mithilfe der Batch- und Säulenexperimente soll das Modell zur Simulierung eines naturnahen Systems mit kontinuierlicher Variation der Bodenparameter über das Bodenprofil hinweg verwendet werden.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

BMBF Verbundprojekt TransLARA (02NUK051C; abgeschlossen). Untersuchung des Transportverhaltens von RN in Böden mit besonderem Fokus auf deren kolloidalen Transport.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

M Böhm, S Hellmann, T Schäfer (2025): Size matters: Soil porewater nanoparticles and their associated trace-elements characterized by Electrical Field and Flow FFF. Goldschmidt 2025 Conference.

Schillinger, J. (2025). Projektmodul MBGW, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Weisheit, R. (2025). Projektmodul MBGW, Friedrich-Schiller-Universität Jena.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Leibniz Universität Hannover / Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS) und Institut für Zellbiologie und Biophysik (IfB)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Remobilisierung von Radionukliden [...], Charakterisierung mikrobieller Diversität im Boden und die Beeinflussung durch Radionuklide und Wurzelexsudate	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 30.04.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 998.850,94 €
<b>Projektleiterin:</b> Dr. Beate Riebe	<b>E-Mail-Adresse der Projektleiterin:</b> riebe@irs.uni-hannover.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil der radioökologischen Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u. a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen im wurzelnahen Boden (Rhizosphäre). Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**TP-2a:** Remobilisierung von RN bei schwankenden Wasserständen und Charakterisierung der mikrobiellen Diversität im Boden und ihre Beeinflussung durch RN und Wurzelexsudate von Pflanzen (LUH-IRS)

AP-1a: Remobilisierung von RN in Lysimetern bei schwankenden Wasserständen (Lysimeter)

AP-2a: Veränderung von Mikroorganismengesellschaften (Rhizosphäre / bulk soil) durch RN

AP-3a: Einfluss von Wurzelexsudaten auf RN-Aufnahme in Pflanzen (Rhizoboxen/Modellböden)

AP-4a: Einfluss von Pflanzenwurzeln auf RN-Migration (Lysimeter)

**TP-2b:** Bedeutung pflanzlicher Transporter für die Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden in Pflanzen (LUH-IfB)

AP-1b: Klonierung von CRISPR/Cas9 Vektor für die jeweiligen Transporter

AP-2b: Generierung von Knock-out Zellen / Aufnahme von RN in Knock-out Zellen

AP-3b: Generierung/Kultivierung von Knock-out Pflanzen / Aufnahme von RN in Knock-out Pflanzen

AP-4b: Analyse der Produktion von Exsudaten in Knock-out Pflanzen

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

AP-1a: In Säulenversuchen mit Se-75 zeigte sich die stärkste Sorption an RefeSol-04A (Retardation von ca. 8 % der Aktivität in der Säule), während bei RefeSol-03G nur etwa 72 % der Aktivität in Säule verblieben. Die Proben aus dem Pu-Lysimeter werden weiterhin aufgearbeitet und ausgewertet; bislang weist die unterste Schicht die höchste Aktivität auf. Die Analyse des I-125-Lysimeters zeigt im Vergleich zum ersten Durchgang eine gleichmäßige Verteilung des Tracers, bei der sich ca. 75 % der Gesamtaktivität in der Höhe von 1,5 bis 27 cm befinden, was auf die zwischenzeitliche Wasserspiegelanhebung zurückzuführen ist. Das Se-Lysimeter wurde mit Tracer beaufschlagt, das Porenwasser kontinuierlich beprobt.

AP-2a: Die Sequenzierung der Pflanzen (Tomate, Paprika) aus den Topfversuchen ergab, wie schon bei den Rhizoboxexperimenten, keine Unterschiede zwischen Kontrolle und den mit I-125 und Tc-99 markierten Proben. Bei der Untersuchung der mikrobiellen Gemeinschaften (BIOLOG EcoPlates) wurde zwar eine geringfügig höhere Stoffwechselrate in den Rhizosphärenproben gefunden als im nicht durchwurzelten Boden, aber es ließ sich kein Unterschied in der Stoffwechselrate zwischen den Kontroll- und den getracereten Proben feststellen. Dies deutet darauf hin, dass es keine Veränderungen in der mikrobiellen Gemeinschaft gibt.

AP-3a: Gefäßversuche mit (I-125, Tc-99) in Tomate und Paprika wurden ausgewertet; für Tc-99 ließ sich ca. 80 % der zugegebenen Aktivität in der Pflanze wiederfinden, während bei I-125 im Mittel ca. 80 % der Aktivität im Boden verblieb; insbesondere bei Iod zeigte sich starke Abhängigkeit der Aufnahme vom Zeitpunkt der Tracerzugabe im Verhältnis zum Wachstumsstadium: eine Paprikapflanze, die zum Zeitpunkt der Tracerzugabe größer war als die anderen Pflanzen, nahm etwa fünfmal mehr Aktivität auf. Ein weiterer Rhizobox-Versuch (Tc-99) wurde vorbereitet, mit Fokus auf sequentielle Extraktion von Bodenproben aus Wurzelraum unter Vergleich mit nicht durchwurzeltem Boden.

AP-4a: Ein neues Lysimeter mit RefeSol-03G wurde aufgesetzt und mit Tomaten bepflanzt. Anschließend erfolgte die Zugabe von I-125-Tracer mit KI-Träger.

AP-1b: Klonierungsarbeiten für CRISPR-Cas9-Vektoren für IRT1 in Tomate (*S. lycopersicum*) sind fortgeschritten und zum Teil schon abgeschlossen. Es wurden zunächst Homologe aus Tomate zu dem IRT1 aus *A. thaliana* identifiziert. Hier ergaben sich drei verschiedene Proteine, gegen die jeweils guideRNAs designet wurden. Zu den Single-Knockouts sollen auch Double- und Triple-Knockout-Vektoren kloniert werden. Die Vektoren für die Single Knockouts sind bereits fertig und wurden durch ein Full-Plasmid-Sequenzing validiert.

AP-2b: Americium-Aufnahme Experimente mit den BY-2 Zellen müssen wiederholt werden, da die Medienzusammensetzung für die Eisenmangel-Induktion angepasst werden muss. Erfolgreiche Etablierung der cDNA-Synthese sowie Primer für qualitative Reverse-Transkriptase-PCR zur Expressionsanalyse (IRT1, Housekeeper EF1 $\alpha$ ). Damit Nachweis einer erhöhten IRT1-Expression auf mRNA-Ebene in BY-2 Zellen nach Induktion eines Eisenmangels (Analyse mittels  $2\Delta\Delta Ct$ -Methode). Erste Versuche zur Protein-Isolation und anschließendem Western Blot waren noch nicht erfolgreich. Beginn der Etablierung eines Calcein-Basierten Europium-Uptake-Assays.

AP-3b: Wiederholung der Americium-Aufnahme-Versuche nach Eisen-Defizienz-Induktion mit *A. thaliana* Wildtyp und IRT1-Knockout-Mutanten mit neuer Medienzusammensetzung. Ergebnis noch ausstehend.

Beginn Erlernen der Tissue-Culture-Methode zur Erzeugung von Knockout-Tomatenpflanzen. Dazu gehört die Herstellung kompetenter Agrobakterium *tumefaciens*, die Transformation dieser mit den erstellten CRISPR/Cas9-Vektoren sowie die Infizierung von Pflanzen-Callus mit den transformierten Bakterien.

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

AP-1a: Die Aufarbeitung, Messung und Auswertung der Proben aus dem Pu-Lysimeter werden fortgeführt und abgeschlossen. Die mit Tc-99 und Am-243 markierten Lysimeter werden ebenfalls abgetragen und die resultierenden Proben untersucht und ausgewertet.

AP-2a: BIOLOG-Analyse von I-125 markierten Proben, sowie deren statistische Auswertung. Auswertung der Sequenzierung von Am-243 getracerten Arabidopsis und weiteren Tc-99 markierten Rhizoboxen. Durchführung von qPCR von 16S rRNA, um Veränderungen in den mikrobiellen Populationen zu vergleichen. Charakterisierung von Wurzelexsudaten mit Orbitrap.

AP-3a: Der Rhizobox-Versuch mit Fokus auf sequentieller Extraktion (Tc-99) wird durchgeführt. Weiterhin werden ergänzende Gefäßversuche zur Aufnahme von Se-75 in Tomate und Paprika in zwei Referenzböden (RefeSol 01-A/ 03-G) für Modellierungszwecke durchgeführt.

AP-4a: Das Porenwasser im neu aufgesetzten Iod-Lysimeter wird bis zur Ernte der Pflanzen fortlaufend beprobt; anschließender erfolgt die Abtragung der Bodensäule.

AP-1b: Beendigung der Klonierungsarbeiten zum IRT1 Transporter. Beginn Klonierungsarbeiten zu verschiedenen PHT1 Transportern.

AP-2b: Wiederholung Americium-Aufnahme-Versuche mit BY-2 nach Fe-Mangelinduktion mit angepassten EDTA-Konzentrationen. Etablierung und Durchführung des Calcein-basierten Eu3+-Uptake-Assays nach Induktion eines Fe-Mangels. Weitere Versuche zur Proteinisolation und Nachweis der Proteinmenge des IRT1 Transporters.

Masterarbeit Julia Peuker: Expressionsanalyse GLRs in BY-2 Zellen, nach Exposition zu verschiedenen Lichtquellen. Calcium-Imaging-Messungen. Ziel ist die Erarbeitung eines Kultivierungsmodells, in dem die Expression von GLRs verstärkt wird, um später damit RN-Aufnahme-Experimente durchzuführen.

AP-3b: Wiederholung der Americium-Aufnahme-Experimente nach Fe-Mangelinduktion mit dazugehöriger Expressionsanalyse des IRT1. Anwendung des Calcein-basierten Eu3+-Uptake-Assays analog zu AP-2b. Durchführung der Tissue Culture zur Erzeugung von IRT1-Knockout-Tomaten.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

02NUK051A - Transport- und Transferverhalten langlebiger Radionuklide entlang der kausalen Kette Grundwasser-Boden-Oberfläche-Pflanze unter Berücksichtigung langfristiger klimatischer Veränderungen (Trans-LARA): Neben Säulenversuchen, sowie Lysimeterversuchen mit in-situ-Messung von pH und Redoxpotential wurde die Aufnahme der Radionuklide 125I, 99Tc, Americium und Plutonium in die Pflanze in Abhängigkeit von deren Speziation und den Bodeneigenschaften bestimmt. Transferfaktoren für die Aufnahme der Nuklide über den Wurzelpfad wurden für vier Nutzpflanzenarten in vier unterschiedlichen Referenzböden aus Deutschland experimentell ermittelt. Für das bessere Verständnis des Transferverhaltens von Iod und Technetium innerhalb der Pflanze wurden Erbsen und Karotten mit ortsaufgelösten massenspektrometrischen Methoden (SIMS und rL-SNMS) untersucht und die Radionuklide auf zellulärer Ebene detektiert. Zusätzlich wurde gezeigt, dass pflanzliche Metabolittransporter in der Lage sind, Radionuklide zu transportieren. Als Modellorganismus für die Expression einzelner Ionentransporter dienten die Oozyten des Frosches *Xenopus laevis*.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

'Investigation of the Migration Behaviour of I-125 Using a Laboratory Lysimeter with German Reference Soil' (Poster, N. Sassenberg, Radiochemie-Konferenz MARC XIII/Kona, Hawaii)

'Technetium in Soil: The Role of Plant Roots and Water Dynamics' (Poster, T. Schmalz, Radiochemie-Konferenz MARC XIII/Kona, Hawaii)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Institut für Ressourcenökologie	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den RN-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 30.04.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 473.892,37 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Susanne Sachs	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> s.sachs@hzdr.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil radioökologischer Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen zu RN-Transport, -Speziation und -Partitionierung im Boden sowie der RN-Aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulären Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u. a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

**TP-C:** Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den RN-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen

**AP-1:** Bestimmung der mikrobiellen Diversität in einem Referenzboden sowie der Beeinflussung dieser durch RN und Wurzelexsudate

**AP-2:** Untersuchung des Abbaus ausgewählter Pflanzenexsudate durch bodenrelevante Mikroorganismen und Charakterisierung der Abbauprodukte

**AP-3:** Untersuchung der RN-Speziation in Gegenwart von Pflanzenexsudaten und deren Abbauprodukten sowie Bestimmung fehlender thermodynamischer Daten

**AP-4:** Untersuchung des Einflusses von Wurzelexsudaten und deren Abbauprodukten auf den RN-Transport in „künstlichen“ Bodensystemen

**AP-5:** Untersuchung der RN-Aufnahme in genetisch modifizierte Pflanzenzellen und Vergleich mit dem Wildtyp

**AP-6:** Identifizierung von Pflanzenexsudaten RN-exponierter Pflanzen in Hydrokultur/„künstlichem“ Boden und Bestimmung der RN-Speziation in der Hydrokulturlösung/im Porenwasser

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

**AP1:** Experimente zur Bestimmung des Einflusses von Uran (U) und Äpfelsäure (ÄS; Vertreter für Wurzelexsudate) auf die mikrobielle Diversität im Referenzboden Refesol-01A wurden in Gegenwart einer erhöhten U-Konzentration (7,1 mg U/kg Boden) fortgeführt. Alle untersuchten Proben zeigten die gleichen dominanten Phyla (Pseudomonadota, Bacillota und Actinomycetota – neue Bezeichnungen) wie in der vorherigen Studie mit 1,8 mg U/kg Boden mit nur leichten Unterschieden in deren Verteilung. Es wurden keine signifikanten Variationen der Phyla in An- und Abwesenheit von Uran und ÄS beobachtet. Die Datenanalyse ergab Hinweise auf Variationen auf Ebene der Gattungen. Hierzu müssen weitere Untersuchungen erfolgen, um deren statistische Signifikanz zu prüfen.

**AP-2:** Die Wechselwirkung von *Mesorhizobium* sp. DNB0012 (bakterielles Isolat aus Refesol-01A) mit U wurde in Abhängigkeit von der U-Konzentration (50, 100 µM), der Expositionszeit (0-24 h), der Menge an Biomasse (OD600: 0.1-0.5) und in Gegenwart von ÄS (100 µM) untersucht. Es konnte eine rapide, nach einer Stunde zeitunabhängige U-Bioassoziation beobachtet werden. Dies weist auf einen Biosorptionsprozess hin. In Gegenwart von ÄS wurde eine signifikant verringerte U-Biosorption bestimmt, was vermutlich auf die Bildung von U(VI)-Malat-Komplexen im synthetischen Bodenwasser zurückzuführen ist. Spektroskopische Untersuchungen zum Nachweis der Komplexe und zur Bestimmung der bioassoziierten U-Spezies stehen noch aus. Eine 24-stündige U-Exposition führte bei *Mesorhizobium* sp. DNB0012 zu einer signifikanten Toxizität, was durch eine Lebend/Tot-Färbung nachgewiesen werden konnte.

**AP-3:** Die Arbeiten zur Charakterisierung der Komplexierung von Europium (Eu(III); Analogon für dreiwertige Actinide) mit Bernsteinsäure als Stoffwechselprodukt von Pflanzen und Bakterien wurden mit einer zweiten Dicarbonsäure, Glutarsäure, komplettiert. Methodisch kamen im Rahmen einer Masterarbeit (s.u.) die zeitaufgelöste laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie (TRLFS), die isotherme Titrationskalorimetrie (ITC) und die Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) zum Einsatz. Es konnten jeweils zwei Säure-assoziierte Eu(III)-Spezies mit einer 1:1- bzw. 1:2-Stöchiometrie nachgewiesen werden. NMR-Untersuchungen zeigten, dass die untersuchten Liganden Eu(III) im ersten Komplexierungsschritt über einen bidentaten Chelatring binden. ITC-Untersuchungen ergaben für beide Dicarbonsäuren Entropie getriebene Komplexierungsreaktionen mit Eu(III).

Ein Manuskript zu Struktur und Thermodynamik von 2:1- und 2:2-U(VI)-Malat-Komplexen wurde erarbeitet.

**AP-5:** Die Untersuchungen zur Rolle der GLR3.3, GLR3.6 und IRT1 Transportproteine für die U(VI)- bzw. Eu(III)-Aufnahme in Pflanzen wurden mit genetisch modifizierten *Arabidopsis thaliana* Pflanzen im Vergleich zum Wildtyp Columbia (Col-0) fortgeführt. Nach 24-stündiger U-Exposition zeigte die glr3.3 Linie die Tendenz weniger U aufzunehmen als Col-0. Ähnliche Ergebnisse wurden mit der Doppelmutante (glr3.3xglr3.6) beobachtet. Die glr3.6 Mutante zeigte keine statistisch signifikante Änderung in der U-Aufnahme im Vergleich zu Col-0. Es gibt somit Indizien, dass U über den GLR3.3 Transportweg oder ein anderes Transportprotein, das in Verbindung mit

diesem steht und über Ca-Signale reguliert wird, in die *A. thaliana* Pflanzen aufgenommen wird. Unterstützt wird dieses Ergebnis durch Beobachtungen an *Phaseolus vulgaris* Pflanzen, die in Gegenwart von U weniger bioassoziiertes Ca aufwiesen. Wahrscheinlich ist, dass U nicht über das IRT1 Transportprotein, welches Fe(III) über die Membran transportiert, in die Pflanze gelangt. Wiederholungsversuche zur Rolle des IRT1-Transporters für die Eu(III)-Aufnahme in *A. thaliana* Pflanzen lieferten auch nach Änderung der experimentellen Bedingungen keine reproduzierbaren Ergebnisse. Somit kann dazu noch kein abschließendes Fazit gezogen werden.

**AP-6:** Die Untersuchungen zu phänotypischen Anpassungen von *Phaseolus vulgaris* (Buschbohne) Pflanzen in Gegenwart von Eu(III) und U(VI) wurden fortgeführt. Präzipitate, die nur in Gegenwart von Eu(III) oder U(VI) in den hydroponischen Lösungen beobachtet wurden und auf die Ausscheidung von Wurzelexsudaten bedingt durch den Schwermetallstress hinweisen, wurden analysiert. Die beobachtete Braunfärbung U-exponierter Wurzeln ist vermutlich auf eine veränderte Stickstoffhomöostase zurückzuführen. Zu diesem Ergebnis führten Analysen des Stickstoffgehalts (Gesamt-, anorganischer Stickstoff, Nitrat, Nitrit) in Lösung bzw. in den Pflanzengeweben. Ramanmikroskopische Untersuchungen deuten auf Veränderungen in der Zellwandzusammensetzung der Wurzeln Eu-exponierter Pflanzen hin. Weitere Untersuchungen sind nötig, um die phänotypischen Veränderungen auf molekularer Ebene zu verstehen.

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

**AP-1:** Bestimmung des Einflusses von U und ÄS auf die mikrobielle Diversität im Refesol-01A Boden (Bestimmung von Bakterien und Pilzen) – Variation der experimentellen Bedingungen; Prüfen der statistischen Signifikanz der beobachteten Variationen auf Gattungsebene

**AP-2:** Fortführung der Untersuchungen zur Wechselwirkung von *Mesorhizobium* sp. DNB0012 mit U und ÄS (U-Bioassoziation, -Toxizität, -Speziation, -Lokalisation, Abbau von ÄS)

**AP-3:** Einreichung des Manuskripts zu Struktur und Thermodynamik von U(VI)-Malaten

**AP-4:** Durchführung eines Säulenversuchs zum Transport von U in einem „künstlichen“ Bodensystem in Gegenwart von Wurzelexsudaten

**AP-5:** Abschluss der Arbeiten zur Rolle von GLR3.3, GLR3.6 und IRT1 Transportproteinen für die Eu- und U-Aufnahme in *A. thaliana* Pflanzen

**AP-6:** Identifizierung von Wurzelexsudaten U- und Eu-exponierter und nichtexponierter *P. vulgaris* Pflanzen. Untersuchungen zur Rolle von Stickstoffverbindungen (z. B. Aminosäuren, Melatonin) im Zusammenhang mit der Aufnahme von Eu und U in *P. vulgaris* Pflanzen. Übergabe experimenteller Daten an das Ökoinstitut für Modellierungen.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt TRAVARIS schließt sich an das abgeschlossene Verbundvorhaben TRANS-LARA an. Die Arbeiten des HZDR (02NUK051B) konzentrierten sich auf die Wechselwirkung von Actiniden mit Pflanzenzellen/Pflanzen, um Aussagen zur Metall-Speziation in Gegenwart von Pflanzen zu treffen, sowie auf Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Uhlitzsch, L.: Die Komplexierung von Europium mit Dicarbonsäuren als mögliche Wurzelexsudate. Masterarbeit, Technische Universität Dresden, April 2025.

Mätkow, J.M., Steudtner, R., Bok, F., Stumpf, T., Sachs, S.: Wechselwirkung von U(VI) mit Phaseolus vulgaris Pflanzen und deren Einfluss auf die U(VI)-Speziation. 11. RCA-Workshop, Dresden, Germany, 03.-05.06.2025 (Vortrag).

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Öko-Institut e.V.	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Radioökologische Modellierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 30.04.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 324.912,58 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Veronika Ustohalova	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> v.ustohalova@oeko.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil radioökologischer Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen zu RN-transport, -speziation und -partitionierung im Boden sowie der RN-aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u. a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Übergreifend: Der Begriff ECOLEGO wird durch AFRY Intelligent Scenario Modelling oder AFRY-Scenario-Modelling (AISM) ersetzt.

AP-1: Abstimmung zum Ablauf der Lysimeterexperimente mit schwankenden Wasserständen und zu Umlaufsäulenexperimenten hinsichtlich der Übertragbarkeit der Prozesse und Parameterwerte in das AFRY Intelligent Scenario Modelling / Modellteil „Bodentransport“.

AP-2: Prüfung der Übertragbarkeit der Porenraummorphologie und der Hysterese (3D-HYDRUS) in das AFRY Intelligent Scenario Modelling / Modellteil „Bodentransport“.

AP-3: Abbildung der Kd-Wert-Variabilität im AFRY Intelligent Scenario Modelling / Modellteil „Bodentransport“ unter Einfluss von Mineralphasen, Organik und des pH-Wertes in Anlehnung an das „Smart-Kd-Konzept“.

AP-4: Aufbau des Mehrschichtmodells zum Wasser- und RN-Transport unter schwanken-dem Wasserspiegel in Anlehnung an Lysimeterexperimente (LUH-IRS und FSU-AnGeo) und Validierung des AFRY Intelligent Scenario Modelling / Modellteil „Bodentransport“.

AP-5: Erweiterung des AFRY Intelligent Scenario Modelling / Modellteil „Pflanze“ im Hinblick auf die Ergebnisse der Experimente des HZDR-IRE und des LUH-IfB.

AP-6: Erweiterung des AFRY Intelligent Scenario Modelling / Modellteil „Dosisberechnung“; Berechnung der BDCF und die Dosisabschätzung über lange Zeiträume mit anschließender statistischer Analyse.

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

AP-übergreifend: Die regelmäßige Überprüfung der Software-Features und deren Nutzung in der TRAVARIS-Modellierung wurde gestartet, es finden regelmäßige Treffen mit Fa. AFRY statt zur Programmierung einzelner Modellversionen/Modellteile mit AFRY. Die probabilistische Rechenläufe im AP3 berücksichtigen die Sorption in der Form der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen (PDF). Einführung der PDF-Funktionen auch für andere Parameter im Rahmen der AP4 und AP5 wird geprüft.

AP1: Mit FSU-AnGeo wurden die sich im Verlauf der Experimente ergebenden Fragen zu den Wasserspiegelschwankungen im Lysimeter sowie neulich auch den Bachversuchen (Kd-Wert-Bestimmung) laufend besprochen. Im Weiteren wurde die Durchführung der Pflanzenexperimente (LUH-IRS, HZDR) diskutiert. Alle genannten Projektpartner haben die Zwischenergebnisse der Experimente zur Verfügung gestellt.

AP2: Aktuell muss die Planung und die Umsetzung der Modellierung mit HYDRUS 3D am FSU-AnGeo abgewartet werden. Je nach dem Fortschritt der Modellarbeiten am FSU-AnGeo wird sinngemäß der aktuell im AISM implementierte vereinfachende Ansatz der linearen Diffusivität-Wassergehalt-Beziehung erweitert.

AP3: Die zeitliche Abhängigkeit der Sorptionsvorgänge scheint voraussichtlich für die makroskalige Betrachtung (Dosisberechnung) nicht relevant zu sein, die Schwankungsbereiche der Sorption (unabhängig von der Zeit) sind in der Form der PDF implementiert, welche die Parameterunsicherheiten repräsentieren. Die Form der PDF-basiert zum Teil auf den aktuellen Ergebnissen der PHREEQC-Modellierung, zum Teil werden für die zu untersuchenden Radionuklide (aktuell Tc, I, Pu, Am) verschiedene PDF unterstellt: Für jedes Radionuklid und Bodentyp wird eine PDF im AISM definiert. Der Bodentyp repräsentiert die typischen Bodeneigenschaften wie pH-Wert, Anteil Organik und Tonmineralien. Diese sind in Lookup-Tabellen implementiert, in welche wählbar entweder Einzelwerte oder PDF-Verteilungen der Kd-Werte eingebaut werden. Die Berechnungen mit den verschiedenen PDF zeigen weiterhin plausible Ergebnisse.

AP4: Das numerische Schema (Finite-Volumen-Methode) für die Richards-Gleichung und die Konvektions-Dispersions-Gleichung sollte die Wasserspiegelschwankungen in einer definierten Zeitspanne abbilden und den Radionuklidtransport berücksichtigen. Nach dem Wasserspiegel-

Anstieg folgt die Wassergehaltreduktion durch Evapotranspiration, so wie in Experimenten angedacht. Verschiedene Abläufe des konstanten Wasserspiegels gefolgt mit einer Wasserspiegelschwankung werden programmiert und gerechnet.

AP5: Der Fokus der Arbeiten liegt auf dem Modellteil „Pflanze“. Das Modell stellt aktuell die einzelnen Pflanzenteile und Wurzelzellschichten dar und verfügt über Schnittstellen zu den Bodenschichten des Modellteils „Boden“. Die ersten Erkenntnisse aus den Experimenten (LUH-IRS, HZDR und LUH-IfB) zur Rolle der Transporter und Exudate oder auch der Symbiose mit Bodenbakterien sind zurzeit nicht eindeutig. Lediglich die Ergebnisse der Experimente zu Transferfaktoren (LUH-IRS) liefern quantitative Ergebnisse zur Verteilung der Radionuklide in den Pflanzenteilen (Bohne, Tomate). Die Prozesse und Einflussfaktoren der Radionuklidaufnahme in die Pflanze werden diskutiert und mit Blick auf die Implementierbarkeit in das AIS-M-Modell bewertet.

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

AP1: Informationsaustausch zu den Lysimeterexperimenten mit schwankendem Wasserspiegel und zu den Umlaufsäulenexperimenten mit FSU-AnGeo und LUH-IRS sowie mit UB zur PHREEQC-Modellentwicklung und Ergebnissen werden fortgesetzt. Fokus wird zukünftig auf die Pflanzenexperimente (Austausch FSU-AnGeo, LUH-IRS, HZDR und IfB) gelegt.

AP2: Die Erweiterung des vereinfachten Ansatzes zur linearen Diffusivität-Wassergehalt-Beziehung in der AIS-M-Modellierung mit der Einführung der Parametrisierung nach van Genuchten (wie in HYDRUS) wird sinngemäß an die Umsetzung der Modellierung der Effekte der Hysteresis in 3D-HYDRUS (FSU-AnGeo) gekoppelt.

AP3: Die Recherche zu Daten mit Blick auf die Optionen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Kd-Werte und anderer transportwirksamen Parameter wird fortgesetzt. Die Lookup-Tabellen in AIS-M werden mit Blick auf die weiteren Einflussparameter auf die Sorption (wie Phosphor) erweitert. Die Parameterkombinationen werden in den Rechenläufen auf die Plausibilität geprüft und probabilistische Modellierung für weitere Parameter ausgebaut.

AP4: Rechenfälle zur Validierung des Modellteils „Boden“ werden fortgesetzt, die Implementierung des Wasser- und Radionuklidtransports unter schwankendem Wasserspiegel als eine Reihe verschiedener Ereignisse über eine definierte Zeitspanne ist abzuschließen; der Aufbau der Schnittstelle zum Modellteil „Exposition“ wird vollständig ausgebaut.

AP5: Das Konzept zum Modellteil „Pflanze“ wird weiter ausgebaut und die Ergebnisse der Experimente (FSU-AnGeo, LUH-IRS, HZDR und LUH-IfB) mit Blick auf die Implementierbarkeit in das AIS-M-Modell bewertet und ggf. berücksichtigt. Dabei wird mit den Projektpartnern abgestimmt, welche Ergebnisse bzw. Erkenntnisse in der quantitativen und welche in der qualitativen Form implementierbar sind.

AP6: Fortsetzung Erweiterung Modellteil „Dosisberechnung“ und Ausbau der Schnittstellen mit Fokus auf den Modellteil „Pflanze“.

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

TRANS-LARA (“Transport- und Transferverhalten langlebiger Radionuklide entlang der kausalen Kette Grundwasser-Boden-Oberfläche-Pflanze unter Berücksichtigung langfristiger klimatischer Veränderungen”), BMBF-Zuwendungsprojekt - Förderkennzeichen: 02NUK051E.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9437E
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Universität Bremen - Institut für Umweltphysik	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVRIS) TP: Geochemische Modellierung der in den Teilprojekten A und B untersuchten Systeme	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.11.2022 bis 30.04.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 300.035,70 € (gekürzt am 19.11.2024)
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Matthias Günther	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> matthias.guenther@mevis.fraunhofer.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Transportprozesse potenziell freigesetzter langlebiger Radionuklide (RN) aus einem Endlager für radioaktive Abfälle über den Wasserpfad und den Boden bis in Pflanzen und damit in die Nahrungskette des Menschen müssen für die Langzeitprognose eines Endlagersystems bekannt sein und sind integraler Bestandteil radioökologischer Berechnungen zur Dosisabschätzung. Untersuchungen zu RN-transport, -speziation und -partitionierung im Boden sowie der RN-aufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u. a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm Teilprojekt E

**AP-1:** Literaturstudie zum Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Bodenchemie von Pu, Am, I, Se, Tc, U, Eu und Cm.

**AP-2:** Integration der neuen RN in das UNiSeCs-Modell, Modellaktualisierung, Validierung.

**AP-3:** Sensitivitätsanalysen und Erstellung von  $K_d$ -Matrizen für den Unterboden, Vergleich der Ergebnisse für Eu mit denen von Am und Cm.

**AP-4:** Literaturstudie zu Pflanzenmetaboliten / Wurzelzone (soweit relevant für die geochemische Modellierung).

**AP-5:** Modellierung der Speziation und Partitionierung der RN U, Pu und Cm bzw. Eu außerhalb sowie innerhalb der Wurzelzone.

**AP-6:** Sensitivitätsanalysen und Erstellung von  $K_d$  - Matrizen für die Wurzelzone.

**AP-7:** Vergleich der Modellergebnisse mit experimentellen Daten, ggf. Modifikation der Modelle.

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

In den Modellierungen zur pH-Abhängigkeit der Nuklidspeziation mit Citrat (AP-5) traten z. T. starke Diskontinuitäten bei den Kd-Werten und insbesondere bei Nuklidspezies in Lösung auf. Es zeigte sich, dass die Schätzung von Al<sup>3+</sup>-Ionen in der Bodenlösung im bisherigen UNiSeCs-Ansatz unzureichend war, denn das Aluminium wechselwirkt nicht nur mit den im Modellansatz enthaltenen Metallhydroxid-Oberflächen (wo es in Konkurrenz zu den Citrat-Ionen steht), sondern auch mit den Citrat-Ionen selbst. Durch eine Modifikation der Schätzung des Al-Gehalts (nach Informationen aus Tipping 2005) konnten diese Schwierigkeiten beseitigt werden. Dies war allerdings mit einem erheblichen zusätzlichen Aufwand verbunden, da das modifizierte Modell erneut validiert und in das zur Erstellung der Kd-Matrizen verwendete KdMultigrid-Programm implementiert werden musste. Die ersten Berechnungen nach dem modifizierten Modell zeigen für die kationischen Nuklide eine eher geringe Abhängigkeit des Kd vom Citrat-Gehalt, aber starke Abweichungen für Se bei geringem P-Gehalt des Bodens. Für das KdMultigrid-Programm wurde ein user manual geschrieben, dass auch andere Projektmitarbeiter in die Lage versetzen soll, die berechneten Kd-Matrizen (z. B. deren Parameterschrittweiten) den jeweiligen Bedürfnissen anzupassen (siehe auch Punkt 4).

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

Es ist geplant, bei einer internationalen Fachzeitschrift einen Artikel einzureichen, in dem das im Projekt weiterentwickelte Programm KdMultigrid (entwickelt u.a. zur Berechnung von Kd-Matrizen für die Teilprojekte A und D) vorgestellt wird. Das Programm soll auf einer noch zu erstellenden Internetseite der Fachwelt zur Verfügung gestellt werden.

Da die Analysen für die verschiedenen Unterbodenschichten im betreffenden Halbjahr noch nicht vorhanden waren, wurden die entsprechenden Berechnungen auf das kommende Halbjahr verschoben (AP-3).

Des Weiteren wird zurzeit durch Modellierungen untersucht, unter welchen Bedingungen ein erhöhter Citrat-Gehalt in der Wurzelzone einen merklichen Einfluss auf die Speziation und damit auf die Pflanzenaufnahme haben kann (AP-5 und AP-6).

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Anschlussvorhaben zu Trans-LARA (Transport- und Transferverhalten langlebiger Radionuklide entlang der kausalen Kette Grundwasser-Boden-Oberfläche-Pflanze unter Berücksichtigung langfristiger klimatischer Veränderungen; FKZ 02NUK051D).

### 6. Berichte und Veröffentlichungen

...

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9445A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Friedrich-Schiller-Universität Jena	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Dendroanalyse, Bildung organische Bodensubstanz, Mykorrhizosphärenprozesse, (kolloidalen) Schwermetall/Radionuklid-Austrag & Drohnenbefliegungen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 30.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 993.460,91 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Thorsten Schäfer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> thorsten.schaefer@uni-jena.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im aktuellen Projektvorhaben werden radionuklid- und schwermetallbelastete (RN/SM) Substrate im Sinne einer Strahlenschutz-Vorsorge zur Produktion von Energiepflanzen genutzt. Ziel ist es, mikrobiell gesteuerte Phytostabilisierungsmaßnahmen mit Mykorrhizapilzen für standortunabhängige Konzepte in MykoBEst weiterzuentwickeln und auf (europäische) Bergbaufolgelandschaften sulfidischen Erzbergbaus unterschiedlicher klimatischer Bedingungen zu übertragen. Die Maßnahmen zielen dabei auf die langfristige Sicherung der Standortsanierung von Bergbaufolgelandschaften ab, die auch den neuen Herausforderungen in Zeiten des Klimawandels gerecht werden muss. Übergeordnete Ziele sind dabei die Erosionsverminderung und die Nutzung von Holz aus bereits in den Projekten USER/USER II (FKZ: 15S9417, 15S9194) etablierten Kurzumtriebsplantagen als Energieträger bzw. als Rohstoff für eine stoffliche Nutzung. Ein neuer Nutzungsaspekt ist der alternative Einsatz der Biomasse als Faserrohstoff für die Zellstoff- und Papiererzeugung, welcher durch den Verbundpartner AFRY untersucht und bzgl. der technischen sowie ökonomischen Umsetzbarkeit bewertet wird. In den belasteten Bodenbereichen soll mit Hilfe eines gesteuerten RN/SM-Transportverhaltens (Austrag bzw. Stabilisierung) ein nachhaltiges System etabliert werden, das für Bergbaufolgeflächen durch die im Wurzelbereich erfolgende Bodenbildung und Bodenstabilisierung sowie eine durch Mykorrhizapilze verbesserte Wasserverfügbarkeit für Wirtsbäume gleichzeitig erosionsmindernd wirkt und damit zu einem langfristigen Erosionsschutz der Haldenabdeckungen führt. Ältere, über den Partner Wismut zur Verfügung gestellte, Standorte sollen mittels eines innovativen Biomonitorings (Nutzung der Elementspeicherung im Holz älterer Bäume) analysiert werden, um den (zeitlich variierenden) klimatischen Stress auf die oberirdische Biomasse zu dokumentieren. Diese Dendroanalyse erlaubt eine zeitlich-räumliche Auflösung der Kontaminationspfade bzw. gibt Informationen der Integrität von Schutzbarrieren.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1 Lysimeterstudien zur Infiltrationsdynamik im Klimawandel
- AP 2 Standortspezifische Sukzession und Bodenentwicklung
- AP 3 Charakterisierung der oberirdischen Biomasse
- AP 4 Monitoring der Bodenerosion
- AP 5 Übertragbarkeit der Ergebnisse
- AP 6 Weiterqualifizierungsprogramm & Outreach

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

Zur Koordination und Diskussion der (Zwischen-)Ergebnisse fanden im Januar und Juni Online-Projekttreffen statt. Im März fand ein Treffen in Jena mit den Projektpartnern der FSU und der Wismut GmbH statt.

- AP 1: Erste Analysen von Aquaporin-Genen in Mykorrhizapilzen für die Wirkung auf Wasserverteilung durch die Pilzmycelien aus Mikro-Kosmen-Experimenten wurden begonnen.
- AP 2: Probenahme von Rhizosphären-Porenwasser und Analytik mittels LC-OCD auf dem Testfeld Gessenwiese. Erweiterung der LC-OCD-Datenbank mit Standards zur Zuordnung von Peaks in der „Neutralstofffraktion“, welche auf Wurzelexsudate zurückzuführen sein können. Auf dem Testfeld Kanigsberg „Bareground“ wurden Durchwurzelungsdaten, Wurzel- und Bodenproben gewonnen.
- AP 3: Die Ernte der Bäume auf allen vier Testfeldern, Auswertung der Biomasseproduktion und Probenvorbereitung zur Analyse der Gehalte an RN/SM in der oberirdischen holzigen Biomasse ist erfolgt. Die Biomasse wurde an das DBFZ Leipzig für die Brennwertanalytik und Prüfstandskessel-Untersuchungen geliefert. Eine vergleichende Auswertung der Biomassedaten aus der Ernte und der LiDAR-Daten der Drohnenbefliegung aus dem August 2024 wurde durchgeführt. Vorbereitende Arbeiten für die Dendroanalyse, inklusive Auswertung der dazugehörigen Wasser- und Bodenproben wurden weitergeführt. Eine erneute Baumbohrkernprobenahme im Reuster Forst mit anschließender dendrochronologische Auswertung ist erfolgt.
- AP 4: Das hydrogeochemische Monitoring von Grund- und Porenwässern auf der Gessenwiese und von Sickerwässern auf der Halde Beerwalde wurde fortgeführt. Erste Versuche zur Wirkung von Mykorrhiza auf die Bodenstabilität im Labormaßstab und Aufsetzen des Messprogramms für die weiteren Untersuchungen ist erfolgt.
- AP 5: Probenahme und Probenvorbereitung von Baumbohrkernen in einem stark mit Chrom kontaminierten Standort in Indien (in Zusammenarbeit mit Kollegen des IIT Delhi).
- AP 6: Organisation des „1st Environmental Interfaces Symposiums“ und Co-Organisation eines Workshops zur wirtschaftlichen Nutzung von Biomasse aus Bergbaufolgelandschaften mit Projektpartner AFRY. Einbindung der Weiterqualifizierung in die JSMC durch Teilnahme an Seminaren und dem Mentorenprogramm sowie aktive Teilnahme an nationalen und internationalen Tagungen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP 1: Die Simulation eines Regenereignisses auf den Lysimetern auf der Gessenwiese ist geplant.
- AP 2: Die Planung der Weiterführung der (Rhizosphären-)Porenwasserprobenahme für die Analytik von Exsudaten ist abgeschlossen und wird durchgeführt werden.
- AP 3: Die Auswertung der Elementgehalte in der oberirdischen Biomasse und Daten der Brennstoffanalytik und Prüfstandskessel-Untersuchung wird nach Erhalt der Ergebnisse durchgeführt. Die Methodenentwicklung an der LA-ICP-MS für die Analyse von Baumbohrkernen mit anschließender Analyse der bereits entnommenen Baumbohrkerne ist geplant. Fluoreszenzmessungen in Beerwalde in Kombination mit Multispektralmessungen mittels Drohne und Überprüfung durch Stressparameter-Tests der Vegetation werden im Sommer durchgeführt.
- AP 4: Das hydrogeochemische Monitoring wird fortgeführt. Die Mikro-Kosmen-Experimente zum Einfluss der Mykorrhizierung auf den Erosionsschutz werden ausgewertet. Auswertung der Durchwurzelungsdaten am Testfeld „Bareground“ und Analyse von Mykorrhiza-Morphotypen und Elementgehalten in Wurzel- und Bodenproben.

AP 5: Die Analyse von Baumbohrkernen aus dem mit Chrom kontaminiertem Standort in Indien mittels LA-ICP-MS und Mikrowellenaufschluss mit anschließender ICP-MS-Analytik sind geplant. Literaturstudien zur Übertragbarkeit der Methodik in anderen klimatischen Gebieten werden ausgeweitet. Weiterführung der Verwertbarkeitsstudie mit den Daten aus der Ernte 2025.

AP 6: Aktive Teilnahme und (Co-)Organisation des Workshops und Environmental Interfaces Symposium vom 7.-10.10.2025. Mentoring und Qualifizierung zum Schreiben von international begutachteten Artikeln sowie Forschungsaufenthalte im Ausland sind ebenso fest geplant (u.a. SUBATECH, Nantes, Frankreich) wie Konferenzteilnahmen an nationalen und internationalen Konferenzen (z.B. Goldschmidt 2025) für alle Promovierenden/ Postdocs.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Das Projekt basiert auf den durch das BMBF geförderten, abgeschlossenen Projekten USER/USER II (FKZ: 15S9417, 15S9194).

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Nettemann S (2025) Mobility of trace elements associated with natural nanoparticles in acid mine drainage influenced pore- and groundwaters. Posterbeitrag. Dresdner Grundwassertage, 23. – 24.06.2025.

Nettemann, S., Mirgorodsky, D., Fürst, D., Lenk, K., Merten, D., Willing, K., Rosenbaum, M.A., Kothe, E., Schäfer, T. (2025, accepted) Land reclamation of a former uranium mining site: Combined metal phytostabilization and biomass production. *Total Environment Engineering*.

Nettemann, S., Kothe, E., Schäfer, T. (2025, in preparation) Event-driven colloidal transport of trace elements and radionuclides in post-mining soils and groundwater. In preparation for submission to *Science of the Total Environment*.

Kothe E (2025) Special Issue: Plant resilience through microbial biocontrol. *J Basic Microbiol* 65:e70079.

Bogdanova O, Krause K, Pietschmann S, Kothe E (2025) Drivers of fungal and bacterial communities in ectomycorrhizospheres of birch, oak, and pine in a former uranium mining site, Ronneburg, Germany. *Environ Sci Pollut Res Int* 32:10786-10799.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9445B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Wismut GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Entwicklung von Verfahren zur gezielten Vitalisierung des Wismut-Sanierungswaldes mittels Bodenmikroorganismen und Prüfung minimalinvasiver Biomonitoringverfahren	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 30.06.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 44.976,87 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dipl. Ing. agr. Mirko Köhler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> m.koehler@wismut.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im aktuellen Projektvorhaben werden radionuklid- und schwermetallbelastete (RN/SM) Substrate im Sinne einer Strahlenschutz-Vorsorge zur Produktion von Energiepflanzen genutzt. Ziel ist es, mikrobiell gesteuerte Phytostabilisierungsmaßnahmen mit Mykorrhizapilzen für standortunabhängige Konzepte in MykoBEst weiterzuentwickeln und auf (europäische) Bergbaufolgelandschaften sulfidischen Erzbergbaus unterschiedlicher klimatischer Bedingungen zu übertragen. Die Maßnahmen zielen dabei auf die langfristige Sicherung der Standortsanierung von Bergbaufolgelandschaften ab, die auch den neuen Herausforderungen in Zeiten des Klimawandels gerecht werden muss. Übergeordnete Ziele sind dabei die Erosionsverminderung und die Nutzung von Holz aus bereits in den Projekten USER/USER II (FKZ: 15S9417, 15S9194) etablierten Kurzumtriebsplantagen als Energieträger bzw. als Rohstoff für eine stoffliche Nutzung. Ein neuer Nutzungsaspekt ist der alternative Einsatz der Biomasse als Faserrohstoff für die Zellstoff- und Papiererzeugung, welcher durch den Verbundpartner AFRY untersucht und bzgl. der technischen sowie ökonomischen Umsetzbarkeit bewertet wird. In den belasteten Bodenbereichen soll mit Hilfe eines gesteuerten RN/SM-Transportverhaltens (Austrag bzw. Stabilisierung) ein nachhaltiges System etabliert werden, das für Bergbaufolgeflächen durch die im Wurzelbereich erfolgende Bodenbildung und Bodenstabilisierung sowie eine durch Mykorrhizapilze verbesserte Wasserverfügbarkeit für Wirtsbäume gleichzeitig erosionsmindernd wirkt und damit zu einem langfristigen Erosionsschutz der Haldenabdeckungen führt. Ältere, über den Partner Wismut zur Verfügung gestellte, Standorte sollen mittels eines innovativen Biomonitorings (Nutzung der Elementspeicherung im Holz älterer Bäume) analysiert werden, um den (zeitlich variierenden) klimatischen Stress auf die oberirdische Biomasse zu dokumentieren. Diese Dendroanalyse erlaubt eine zeitlich-räumliche Auflösung der Kontaminationspfade bzw. gibt Informationen der Integrität von Schutzbarrieren.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1 Lysimeterstudien zur Infiltrationsdynamik im Klimawandel
- AP 2 Standortspezifische Sukzession und Bodenentwicklung
- AP 3 Charakterisierung der oberirdischen Biomasse
- AP 4 Monitoring der Bodenerosion
- AP 5 Übertragbarkeit der Ergebnisse
- AP 6 Weiterqualifizierungsprogramm & Outreach

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

Zur Koordination und Diskussion der (Zwischen-)Ergebnisse fanden im Januar und Juni Online-Projekttreffen statt. Im März fand ein Treffen in Jena mit den Projektpartnern der FSU und der Wismut GmbH statt.

- AP 1: Die Daten-/Probenübergaben der Wismut GmbH zur Hydrochemie der Sickerwässer der Lysimeteranlagen auf der Halde Beerwalde an die FSU Jena wurden fortgesetzt. Zusätzlich wurden Daten und Informationen zum Systemverständnis bzw. zur Historie der Halde Beerwalde an die FSU Jena aufbereitet, übergeben bzw. vermittelt. Zur Einschätzung der Relevanz künftiger meteorologischer Extremereignisse (Starkniederschläge, Trockenheit) wurden statistische Auswertungen anhand der bereits aufgearbeiteten Klimaprojektionen durch die Wismut GmbH erstellt.
- AP 2: Probenahme von Rhizosphären-Porenwasser und Analytik mittels LC-OCD auf dem Testfeld Gessenwiese. Erweiterung der LC-OCD-Datenbank mit Standards zur Zuordnung von Peaks in der „Neutralstofffraktion“, welche auf Wurzelexsudate zurückzuführen sein können. Auf dem Testfeld Kanigsberg „Bareground“ wurden Durchwurzelungsdaten, Wurzel- und Bodenproben gewonnen.
- AP 3: Die Ernte der Bäume auf allen vier Testfeldern, Auswertung der Biomasseproduktion und Probenvorbereitung zur Analyse der Gehalte an RN/SM in der oberirdischen holzigen Biomasse ist erfolgt. Die Biomasse wurde an das DBFZ Leipzig für die Brennwertanalytik und Prüfstandskessel-Untersuchungen geliefert. Eine vergleichende Auswertung der Biomassedaten aus der Ernte und der LiDAR-Daten der Drohnenbefliegung aus dem August 2024 wurde durchgeführt. Vorbereitende Arbeiten für die Dendroanalyse, inklusive Auswertung der dazugehörigen Wasser- und Bodenproben wurden weitergeführt. Eine erneute Baumbohrkernprobenahme im Reuster Forst mit anschließender dendrochronologische Auswertung ist erfolgt.
- AP 4: Das hydrogeochemische Monitoring von Grund- und Porenwässern auf der Gessenwiese und von Sickerwässern auf der Halde Beerwalde wurde fortgeführt. Erste Versuche zur Wirkung von Mykorrhiza auf die Bodenstabilität im Labormaßstab und Aufsetzen des Messprogramms für die weiteren Untersuchungen ist erfolgt.
- AP 5: Probenahme und Probenvorbereitung von Baumbohrkernen in einem stark mit Chrom kontaminierten Standort in Indien (in Zusammenarbeit mit Kollegen des IIT Delhi).
- AP 6: Organisation des „1<sup>st</sup> Environmental Interfaces Symposiums“ und Co-Organisation eines Workshops zur wirtschaftlichen Nutzung von Biomasse aus Bergbaufolgelandschaften mit Projektpartner AFRY. Einbindung der Weiterqualifizierung in die JSMC durch Teilnahme an Seminaren und dem Mentorenprogramm sowie aktive Teilnahme an nationalen und internationalen Tagungen.

### 4. Geplante Weiterarbeiten (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP 1: Die Auswertungen zur meteorologischen Extremereignissen unter Berücksichtigung des Klimawandels werden fortgesetzt. Die Daten zum Sickerwasser der Lysimeter auf der Halde Beerwalde (Hydrochemie und Mengen) werden fortlaufend an die FSU Jena übergeben.
- AP 2: Die Planung der Weiterführung der (Rhizosphären-)Porenwasserprobenahme für die Analytik von Exsudaten ist abgeschlossen und wird durchgeführt werden.
- AP 3: Die Auswertung der Elementgehalte in der oberirdischen Biomasse und Daten der Brennstoffanalytik und Prüfstandskessel-Untersuchung wird nach Erhalt der Ergebnisse durchgeführt. Die Methodenentwicklung an der LA-ICP-MS für die Analyse von

Baumbohrkernen mit anschließender Analyse der bereits entnommenen Baumbohrkerne ist geplant. Fluoreszenzmessungen in Beerwalde in Kombination mit Multispektralmessungen mittels Drohne und Überprüfung durch Stressparameter-Tests der Vegetation werden im Sommer durchgeführt.

- AP 4: Das hydrogeochemische Monitoring wird fortgeführt. Die Mikro-Kosmen-Experimente zum Einfluss der Mykorrhizierung auf den Erosionsschutz werden ausgewertet. Auswertung der Durchwurzelungsdaten am Testfeld „Bareground“ und Analyse von Mykorrhiza-Morphotypen und Elementgehalten in Wurzel- und Bodenproben.
- AP 5: Die Analyse von Baumbohrkernen aus dem mit Chrom kontaminiertem Standort in Indien mittels LA-ICP-MS und Mikrowellenaufschluss mit anschließender ICP-MS-Analytik sind geplant. Literaturstudien zur Übertragbarkeit der Methodik in anderen klimatischen Gebieten werden ausgeweitet. Weiterführung der Verwertbarkeitsstudie mit den Daten aus der Ernte 2025.
- AP 6: Die Teilnahme am Environmental Interfaces Symposium am 10.10.2025 ist geplant. Außerdem ist die Begleitung und Mitwirkung am Geländepraktikum der FSU Jena (Bio-Geo-Interaktionen) am 18.08.2025 geplant. Die Wismut GmbH bereitet dafür am Standort Beerwalde organisatorisch das studentische Praktikum vor.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9445C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> AFRY Deutschland GmbH	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Wirtschaftliche Begleitung und Bewertung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.07.2023 bis 31.12.2026	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 53.611,19 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Timo Kuntzsch	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> timo.kuntzsch@afry.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Im aktuellen Projektvorhaben werden radionuklid- und schwermetallbelastete (RN/SM) Substrate im Sinne einer Strahlenschutz-Vorsorge zur Produktion von Energiepflanzen genutzt. Ziel ist es, mikrobiell gesteuerte Phytostabilisierungsmaßnahmen mit Mykorrhizapilzen für standortunabhängige Konzepte in MykoBEst weiterzuentwickeln und auf (europäische) Bergbaufolgelandschaften sulfidischen Erzbergbaus unterschiedlicher klimatischer Bedingungen zu übertragen. Die Maßnahmen zielen dabei auf die langfristige Sicherung der Standortsanierung von Bergbaufolgelandschaften ab, die auch den neuen Herausforderungen in Zeiten des Klimawandels gerecht werden muss. Übergeordnete Ziele sind dabei die Erosionsverminderung und die Nutzung von Holz aus bereits in den Projekten USER/USER II (FKZ: 15S9417, 15S9194) etablierten Kurzumtriebsplantagen als Energieträger bzw. als Rohstoff für eine stoffliche Nutzung. Ein neuer Nutzungsaspekt ist der alternative Einsatz der Biomasse als Faserrohstoff für die Zellstoff- und Papiererzeugung, welcher durch den Verbundpartner AFRY untersucht und bzgl. der technischen sowie ökonomischen Umsetzbarkeit bewertet wird. In den belasteten Bodenbereichen soll mit Hilfe eines gesteuerten RN/SM-Transportverhaltens (Austrag bzw. Stabilisierung) ein nachhaltiges System etabliert werden, das für Bergbaufolgeflächen durch die im Wurzelbereich erfolgende Bodenbildung und Bodenstabilisierung sowie eine durch Mykorrhizapilze verbesserte Wasserverfügbarkeit für Wirtsbäume gleichzeitig erosionsmindernd wirkt und damit zu einem langfristigen Erosionsschutz der Haldenabdeckungen führt. Ältere, über den Partner Wismut zur Verfügung gestellte, Standorte sollen mittels eines innovativen Biomonitorings (Nutzung der Elementspeicherung im Holz ältere Bäume) analysiert werden, um den (zeitlich variierenden) klimatischen Stress auf die oberirdische Biomasse zu dokumentieren. Diese Dendroanalyse erlaubt eine zeitlich-räumliche Auflösung der Kontaminationspfade bzw. gibt Informationen der Integrität von Schutzbarrieren.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP 1 Lysimeterstudien zur Infiltrationsdynamik im Klimawandel
- AP 2 Standortspezifische Sukzession und Bodenentwicklung
- AP 3 Charakterisierung der oberirdischen Biomasse
- AP 4 Monitoring der Bodenerosion
- AP 5 Übertragbarkeit der Ergebnisse
- AP 6 Weiterqualifizierungsprogramm & Outreach

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

Im Berichtszeitraum wurden im Januar ein Online-Meeting mit allen Projektpartnern sowie weitere Meetings (ca. monatlich) mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena abgehalten.

Schwerpunkte der Arbeiten im Berichtszeitraum bildeten die Fortsetzung der Verwertbarkeitsstudie und die Detailausarbeitung des Programmes für den entsprechend des Projektantrages im Bereich „Weiterqualifizierung und Outreach“ vorgesehenen Workshop.

**(AP 5)** Die Arbeiten zur Erarbeitung und Bewertung von Nutzungspfaden (Verwertbarkeitsstudie) wurden fortgesetzt. Hierzu wurden anhand der vorliegenden Berechnungsblätter weitere Szenarienrechnungen durchgeführt (u. a. weitere Detaillierung der Erntekosten bzw. Kosten allgemein, Einbeziehung der von den Projektpartnern bereitgestellten Ergebnisse und Abstimmung der Arbeiten für eine weitere an der Friedrich-Schiller-Universität Jena angesiedelten Masterarbeit mit Bezug zur Verwertbarkeitsstudie).

**(AP 6)** Das Konzept für den Workshop zu Nutzungspfaden und wirtschaftlichen Aspekten der Biomasseproduktion wurde ausgearbeitet mit den Schwerpunkten:

- Umsetzung naturwissenschaftlich-technischer Forschungsergebnisse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten am Beispiel der Biomassegewinnung aus Bergbaufolgelandschaften
- Identifikation und Bewertung von Nutzungspfaden für die erzeugte Biomasse (Art der Nutzung, Anforderungen und verfügbares Eigenschaftsprofil, technisch und ökonomische Bewertung, Skalier- und Übertragbarkeit)

Der Workshop umfasst eine Exkursion inkl. Besichtigung von Technikums- und Praxisanlagen im Chemiepark Leuna sowie Fachvorträge und interaktive Seminare. Er soll den Teilnehmern (u.a. Studierende + Doktoranden) vor allem die Umsetzung naturwissenschaftlich-technischer Forschungsergebnisse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nahebringen.

Weiterhin nutzte AFRY interne und externe Kommunikationskanäle (AFRY-Newsletter, soziale Medien wie „LinkedIN“) sowie Teilnahmen an Messen mit eigenem Stand und Networking-Veranstaltungen (Jahrestagung des Vereins der Zellstoff- und Papier-Chemiker und - Ingenieure „ZELLCHEMING“) für die Bekanntmachung und Diskussion der Projektaktivitäten.

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

**(AP 5)** Die Verwertbarkeitsstudie wird weiter fortgeführt und detailliert, u. a. sind hierzu zusätzliche Szenarien-Rechnungen sowie die Teil-Betreuung einer Masterarbeit in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena angedacht (u. a. Einbeziehung Daten der neuen Ernte, Berücksichtigung Analyseergebnisse u. a.). Weiterhin wird geprüft, ob die vergleichende Betrachtung als Standort für Windenergie- bzw. Photovoltaikanlagen untersucht werden kann.

**(AP 6)** Der geplante Workshop soll am 7. und 8. Oktober 2025 im zeitlichen und räumlichen Zusammenhang mit dem „Environmental Interfaces Symposium“ (vormals „Sanierungskolloquium“) in Jena stattfinden.

### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

/

### 6. Berichte und Veröffentlichungen

/

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> actimondo eG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Innovation in der Kerntechnik: Stärkung der nuklearen Sicherheit durch digitalisierte und bildungsorientierte Ansätze	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 279.712,60 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. John Kettler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> john.kettler@actimondo.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Projekts K.I.S.S. ist es, integrierte Plattformen für das effiziente Rückbau- und Genehmigungsmanagement von kerntechnischen Anlagen mit Fokus auf Kompetenzerhalt, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung zu entwickeln. Das Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt, die jeweils eine innovative Lösung für die Qualifizierung von Fachkräften, das Genehmigungsmanagement und die Prozessführung für den Rückbau darstellen. Die Plattform soll die Sicherheitskultur in der Kerntechnik stärken, den Wissensaustausch und -erhalt fördern, die Kommunikation und Transparenz zwischen den Beteiligten verbessern und die Position deutscher Akteure im internationalen Rückbaumarkt sichern.

actimondo ist der Koordinator des Verbundvorhabens und hauptverantwortlich für das Modul 1, in dem eine Community Plattform sowie eine mobile Trainingsstation entwickelt wird, die Präsenz- und Online-Lernen sowie Virtual- und Augmented-Reality kombinieren. Die Community Plattform soll Fachkräfte, insbesondere Quer- und Neueinsteiger, unterstützen einen zielgerichteten Zugang zum Wissen der Branche zu finden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Im Nachgang zum Kick-off des Projektes wurde das Arbeitsprogramm überarbeitet und präzisiert. Ursprünglich war im Konzept lediglich von einer hybriden Plattform (AP1) die Rede. Diese wurde im Zuge der Anpassungen in zwei separate Elemente unterteilt: die Community-Plattform und die mobile Trainingsstation. Diese differenzierte Strukturierung wurde detailliert ausgearbeitet und mit dem Projektträger sowie der FORKA-Begleitgruppe abgestimmt. Beide Instanzen haben der Anpassung zugestimmt, wodurch nun eine klarere und besser strukturierte Basis für die Umsetzung der Arbeitspakete geschaffen wurde. Diese Überarbeitung sorgt für eine gezieltere Ausrichtung der Projektaktivitäten und stellt sicher, dass die Ziele effizienter erreicht werden können.

Das K.I.S.S. Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt:

1. Modul 1: Community-Plattform & mobile Trainingsstation - Ziel ist es, durch aufeinander abgestimmte und miteinander verknüpfte Lösungen (Digital Smart Campus, mobile

Trainingsstation, Lernmanagementumgebung etc.) das Wissens- sowie Projektmanagement im Bereich Rückbau- und Genehmigungsverfahren von kerntechnischen Anlagen zu stärken.

2. Modul 2: Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben - Ziel ist es, eine digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie zu entwickeln, um die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente und in Echtzeit geführte Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten zur Beschleunigung der Projekte zu ermöglichen.

3. Modul 3: KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau - Ziel ist es, ein Managementsystem zur KI-gestützten Prozessführung für den Rückbau zu realisieren, damit die umfangreichen Daten besser aufbereitet werden können, sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation optimiert werden.

Jedes Modul hat für sich einen eigenen Anwendungsschwerpunkt, wobei die Synergie im abgestimmten Einsatz der Basistechnologien bzw. Softwarelösungen begründet ist.

Seitens actimondo wird in Modul 1 das Konzept für den Digital Smart Campus als Grundlage für die Community Plattform erstellt. Hierauf aufbauend wird bis Anfang 2025 ein Prototyp entwickelt und fertiggestellt, um den Use-Case für die Zielgruppe zu spezifizieren. In Modul 2 werden mit den Verbundpartnern FIR, GRS und Dornier bis Anfang 2025 der Prototyp für die digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben entwickelt. Hierzu werden zunächst eine Anforderungsanalyse und das Plattformkonzept ausgearbeitet. Das Team von actimondo bringt hierfür sein Netzwerk mit ein, um die Interessen der Stakeholder (Behörden, Industrie, EVUs, TÜVs etc.) zu berücksichtigen. In Modul 3 werden zunächst die Anforderungsfelder für die KI-gestützte Prozessführung im Rückbau identifiziert. Parallel wird eine Studie für die Basistechnologie durchgeführt. Seitens actimondo werden hierfür relevante Technologien hinsichtlich ihrer Eignung auf den Anwendungsfall untersucht. Zu den Randbedingungen gehört, dass die Technologien DSVGO-konform sind und die Wissenspools als Multi-Cloud-Lösung genutzt werden kann, so dass jeder Anwender sicherstellen kann, dass keine vertraulichen Daten der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

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

#### **Modul 1 – Mobile Trainingsstation und Community-Plattform**

Die mobile Trainingsstation wurde technisch und didaktisch soweit weiterentwickelt, dass sie im Berichtszeitraum erstmals der Zielgruppe vorgestellt werden konnte. Es wurden vier Anwendungsszenarien konzipiert, umgesetzt und in einer ersten Testphase evaluiert. Die Station kam bereits im Rahmen mehrerer Veranstaltungen zum Einsatz, bei denen wichtige Rückmeldungen zur Nutzererfahrung und Wirksamkeit eingeholt wurden.

Hinsichtlich der Community-Plattform wurde eine vertiefte Recherche zur zugrunde liegenden Basistechnologie durchgeführt. Eine Umfrage unter der Zielgruppe zeigte, dass die ursprünglich priorisierte Plattformlösung (basierend auf „teech“) nicht den Erwartungen der potenziellen Nutzer:innen entspricht. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, die Technologieauswahl neu zu bewerten und anzupassen. Der Auswahlprozess einer alternativen Plattform ist eingeleitet und fließt in die weitere Projektplanung ein.

## Modul 2 – Demonstratorentwicklung

Die Entwicklung des Demonstrators befindet sich in der abschließenden Phase. Aktuell werden letzte Anpassungen im Backend vorgenommen, um eine stabile und performante Anwendung zu gewährleisten. Es kam im Berichtszeitraum zu einer leichten Verzögerung, da sich im Rahmen der technischen Umsetzung zusätzliche Anforderungen an die Programmierung ergeben haben. Diese konnten inzwischen identifiziert und größtenteils behoben werden, sodass die Fertigstellung zeitnah erfolgen kann.

## Modul 3 – KI-gestützte Prozessführung

Im dritten Modul wurden die geplanten Anwendungsszenarien für die KI-gestützte Prozessführung konkretisiert. Auf dieser Basis wurde ein definierter Wissenspool als Grundlage für die KI-Auswertung zusammengestellt. Damit ist die inhaltliche Vorbereitung abgeschlossen, und die Arbeiten zur technischen Umsetzung können im zweiten Halbjahr planmäßig fortgesetzt werden.

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

### Modul 1 – Mobile Trainingsstation und Community-Plattform

Für die mobile Trainingsstation sollen die vier entwickelten Szenarien nun finalisiert werden, um anschließend eine Reihe ausgiebiger Nutzertests durchzuführen. Ziel ist es, die Anwendung didaktisch zu evaluieren und gezielt weiterzuentwickeln. Hardware und Virtual-Framework sind abgeschlossen – in ersten Tests zeigte sich jedoch, dass insbesondere Nutzer:innen ohne Vorerfahrung mit Virtual Reality oder der eingesetzten Hardware zusätzliche Unterstützung benötigen. Diese Erkenntnisse fließen in die nächsten Entwicklungsschritte ein, insbesondere in Bezug auf Usability und Nutzerführung.

Bei der Community-Plattform ist die Fertigstellung eines Demonstrators für die zweite Jahreshälfte vorgesehen. Dieser wird anhand der Anforderungen aus der Nutzerumfrage – insbesondere der Rückmeldungen aus der Erhebung der TU Dresden – weiterentwickelt. Geplant ist, den Demonstrator zunächst im internen Testkreis und anschließend öffentlich zu präsentieren.

### Modul 2 – Demonstratorentwicklung

Der Demonstrator wird derzeit finalisiert. Nach Abschluss der Backend-Entwicklung ist eine intensive Testphase vorgesehen, um die Funktionsfähigkeit unter realitätsnahen Bedingungen zu prüfen. Die Tests dienen sowohl der technischen Absicherung als auch der Evaluation aus Anwendersicht. Die Rückmeldungen aus dieser Phase sollen direkt in die Optimierung des Demonstrators einfließen.

### Modul 3 – KI-gestützte Prozessführung

Im dritten Modul beginnt nun die konkrete Umsetzung der KI-Anwendungen für definierte Use Cases. Geplant ist, diese Anwendungen in enger Abstimmung mit den Verbundpartnern für spezifische Inhalte zu konfigurieren und jeweils pilotartig zu testen. Die Ergebnisse dieser Tests werden systematisch ausgewertet, um die Praxistauglichkeit und den Mehrwert der KI-gestützten Prozessführung zu beurteilen.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Ein relevanter Anknüpfungspunkt ergibt sich aktuell durch den intensiven Austausch mit dem European Nuclear Education Network (ENEN). ENEN entwickelt mit dem sogenannten ENEN-Hub eine Plattform, die strukturell und funktional vergleichbar mit unserer geplanten Community-Plattform ist. Erste Erkenntnisse aus dem gegenseitigen Austausch zeigen, dass die beiden Plattformansätze komplementär zueinander sind. Daraus ergibt sich die Chance für eine sinnvolle inhaltliche und technische Zusammenarbeit. Ziel des Austauschs ist es, Synergien zu nutzen und redundante Entwicklungen zu vermeiden, etwa durch die Abstimmung von Schnittstellen, Formaten oder Zielgruppenansprachen. Der Dialog mit ENEN wird in der zweiten Jahreshälfte weitergeführt und konkretisiert.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

### Fachveröffentlichung

- *Titel:* Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effiziente Rückbau kerntechnischer Anlagen – Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „K.I.S.S.“
- *Medium:* atw – International Journal of Nuclear Power, Januar-Ausgabe 2025
- *Inhalt:* Einführung in Ziele, Struktur und erste Ergebnisse des KISS-Projekts
- *Zugriff:* <https://www.yumpu.com/en/document/read/69539201/atw-international-journal-for-nuclear-power-012025>

### Veranstaltungsbeiträge

- **10. Februar 2025 – Energiegespräch der Parlamentarischen Gesellschaft**, Berlin
  - Vorstellung des KISS-Projekts im Kontext des Themas „Kompetenzerhalt in der Kerntechnik“
- **6.–10. März 2025 – Symposium des European Nuclear Education Network (ENEN)**
  - Präsentation des KISS-Projekts und der mobilen Trainingsstation
- **11.–13. Juni 2025 – SUMMER SCHOOL NewCLEAR**, Potsdam
  - Vorstellung des KISS-Projekts und Demonstration der mobilen Trainingsstation
- **23.–24. Juni 2025 – Exkursion zu Copenhagen Atomics**, Kopenhagen
  - Präsentation des KISS-Projekts, der mobilen Trainingsstation und des Gesamtvorhabens im Rahmen der Delegationsreise

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Plattformen zum Lernen, Genehmigungsverfahren, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung im behördlichen Umfeld	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 854.225,03 EUR
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Holger Seher	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> holger.seher@grs.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundvorhabens K.I.S.S. ist es, eine integrierte Plattform für das effiziente Rückbau- und Genehmigungsmanagement von kerntechnischen Anlagen mit Fokus auf Kompetenzerhalt, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung zu entwickeln. Das Vorhaben ist in drei Fachmodule unterteilt, die jeweils eine innovative Lösung für die Qualifizierung von Fachkräften, das Genehmigungsmanagement und die Prozessführung für den Rückbau darstellen. Die Plattform soll die Sicherheitskultur in der Kerntechnik stärken, den Wissensaustausch und -erhalt fördern, die Kommunikation und Transparenz zwischen den Beteiligten verbessern und die Position deutscher Akteure im internationalen Rückbaumarkt sichern.

Die GRS bringt ihre Erfahrungen auf dem Gebiet des Rückbaus und derendlagerung in das Vorhaben mit ein. Sie ist an allen Modulen beteiligt und koordiniert die Arbeiten des Verbundes für das Modul 3.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Verbundvorhaben K.I.S.S. ist in drei Fachmodule unterteilt:

1. Modul 1: Hybride und innovative Community-Plattform - Ziel ist es, durch aufeinander abgestimmte und miteinander verknüpfte Lösungen (Digital Smart Campus, mobile Trainingsstation, Lernmanagementumgebung etc.) das Wissens- sowie Projektmanagement im Bereich Rückbau- und Genehmigungsverfahren von kerntechnischen Anlagen zu stärken.
2. Modul 2: Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben - Ziel ist es, eine digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie zu entwickeln, um die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente und in Echtzeit geführte Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten zur Beschleunigung der Projekte zu ermöglichen.
3. Modul 3: KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau - Ziel ist es, ein Managementsystem zur KI-gestützten Prozessführung für den Rückbau zu realisieren, damit die umfangreichen Daten besser aufbereitet werden können, sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation optimiert werden.

Jedes Modul hat für sich einen eigenen Anwendungsschwerpunkt, wobei die Synergie im abgestimmten Einsatz der Basistechnologien bzw. Softwarelösungen begründet ist.

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

Im Berichtszeitraum fand ein Projekttreffen beim Projektpartner Actimondo in Köln sowie ein AP3 interner Austausch in Aachen statt.

Modul 1: Für die Communityplattform wurde an dem Konzeptpapier zum Aufbau des Wissenspools weitergearbeitet. Die drei zentralen Bereiche der Plattform, denen ein gemeinsamer Wissenspool zugrunde liegen soll, wurden konkretisiert. Es wurde, in Zusammenarbeit mit dem Vorhaben KIKO, damit begonnen modular aufgebaute Ontologien zu erarbeiten. Diese sollen später zur Erstellung von Wissensgraphen verwendet werden. Weitere Beschreibungen der Erfolgsfaktoren und der Customer Journeys wurden erstellt.

Für die mobile Trainingsstation wurden die vorhandenen Szenarios weiterhin getestet und verfeinert.

Modul 2: Im Anschluss an das Technologiescouting für eine geeignete Softwarebasis wurde seitens des Projektpartners FIR mit den Arbeiten an der Umsetzung der Blockchain und parallel mit den Arbeiten am Frontend begonnen. In internen Meetings wurden erste Entwürfe diskutiert. Die Arbeiten der GRS liegen derzeit in der Qualitätssicherung der gezeigten Softwareentwürfe im Hinblick auf eine sinnvolle und möglichst vollständige Umsetzung der zuvor erarbeiteten Schwerpunkte – korrekter Prozessablauf, regulatorische Anforderungen, Nutzerfreundlichkeit.

Modul 3: Die Beteiligten am Modul 3 haben sich auf vier Use Cases geeinigt, die weiter ausgearbeitet werden sollen. Erste Überlegungen zur Umsetzung von Use Case 10 „Container-Dokumentation“ wurden vorgenommen. Es wurde damit begonnen, mit dem Projekt KIKO über die Erstellung von Ontologien für den Rückbau zu sprechen.

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

Modul 1 Für die Communityplattform sollen Use Cases für die Learning Area zur Verwaltung von Lehrmaterial definiert werden. Hierfür wird eine Ontologie erstellt. Erstellung der Ontologie von der abstrakten Ebene zur Entwicklung von Kompetenzfragen.

Die Szenarien der mobilen Trainingsstation sollen weiter verfeinert werden. Die VR-Anwendung soll auf der SafeND und der Contec vorgestellt werden.

Modul 2: In Kürze soll ein weiterer kleiner Workshop mit den beteiligten Stakeholdern stattfinden, um den ersten Entwurf der Plattform vorzustellen und Rückmeldungen einzuholen.

Modul 3: Planung und Umsetzung des Use Case 10 zusammen mit dem FIR. Zusammenarbeit mit dem KIKO-Projekt zu Ontologien.

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

Das Vorhaben KIKO ist gestartet. Die GRS hat mit dem KIKO-Projektkonsortium eine Zusammenarbeitsvereinbarung getroffen. Auf Basis dessen findet eine Zusammenarbeit und Austausch statt.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> FIR e.V. an der RWTH Aachen Campus-Boulevard 55 52074 Aachen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Plattform inkl. KI-gestützter Prozessführung und Schulungsinhalte für sicherheitssensitive Genehmigungsverfahren	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 689.262,51 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Gerrit Hoeborn, Max-Ferdinand Stroh	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> Gerrit.Hoeborn@fir.rwth-aachen.de Max-Ferdinand.Stroh@fir.rwth-aachen.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Projekts K.I.S.S. ist es, integrierte Plattformen für das effiziente Rückbau- und Genehmigungsmanagement von kerntechnischen Anlagen mit Fokus auf Kompetenzerhalt, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung zu entwickeln. Das Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt, die jeweils eine innovative Lösung für die Qualifizierung von Fachkräften, das Genehmigungsmanagement und die Prozessführung für den Rückbau darstellen. Die Plattform soll die Sicherheitskultur in der Kerntechnik stärken, den Wissensaustausch und -erhalt fördern, die Kommunikation und Transparenz zwischen den Beteiligten verbessern und die Position deutscher Akteure im internationalen Rückbaumarkt sichern.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das K.I.S.S. Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt:

**1. Modul:** Community-Plattform & mobile Trainingsstation - Ziel ist es, durch aufeinander abgestimmte und miteinander verknüpfte Lösungen (Digital Smart Campus (DSC), mobile Trainingsstation, Lernmanagementumgebung etc.) das Wissens- sowie Projektmanagement im Bereich Rückbau- und Genehmigungsverfahren von kerntechnischen Anlagen zu stärken.

**2. Modul:** Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben - Ziel ist es, eine digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie zu entwickeln, um die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente und in Echtzeit geführte Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten zur Beschleunigung der Projekte zu ermöglichen.

**3. Modul:** KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau - Ziel ist es, ein Managementsystem zur KI-gestützten Prozessführung für den Rückbau zu realisieren, damit die umfangreichen Daten besser aufbereitet werden können, sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation optimiert werden.

Jedes Modul hat für sich einen eigenen Anwendungsschwerpunkt, wobei die Synergie im abgestimmten Einsatz der Basistechnologien bzw. Softwarelösungen begründet ist.

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

**1. Modul (AP1):** Zentrale Arbeitsfortschritte des Forschungsvorhabens aus dem 1. Modul betrafen besonders die Konzeption, Umsetzung und fortlaufende Optimierung der mobilen Trainingsstation (AP 1.9 und AP 1.10). Zur initialen Erprobung der Trainingsstation wurde ein Beobachtungsbogen entwickelt, der für Erfassung anwendungsbezogener Informationen in unterschiedlichen Kategorien des Umgangs mit VR-Technologie genutzt wurde (z. B. pragmatische und hedonische Aspekte), um weitere Nutzeranforderungen systematisch zu identifizieren. Anschließend wurde die Station in mehreren iterativen Testzyklen mit Nutzenden hinsichtlich technischer Funktionalität und didaktischer Wirksamkeit der erstellten 3D-Modelle erprobt und weiterentwickelt. Auf Grundlage dieser Testergebnisse wurde gemeinsam mit den Konsortialpartnern eine priorisierte Maßnahmenliste erstellt, die gezielt zur Verbesserung der vier definierten Anwendungsszenarien beitrug. Dabei flossen sowohl technische Modifikationen als auch didaktische Anpassungen ein, um die Nutzungsfreundlichkeit und Lerneffektivität weiter zu erhöhen. Die finale Version der Trainingsstation befindet sich derzeit in der Abschluss- und Reviewphase durch alle Projektpartner.

Zudem wurde im Rahmen der Entwicklung der Community-Plattform aktiv Unterstützung bei der Erarbeitung zentraler konzeptioneller und technischer Grundlagen geleistet (AP 1.1). Dies umfasste insbesondere die gemeinsame Identifikation und Auswahl geeigneter technischer sowie inhaltlicher Zielkomponenten mit dem Ziel, eine funktionsfähige prototypische Plattformversion für Lehre, Forschung und Industrie zu ermöglichen. Ergänzend wurde die grundlegende Analyse potenzieller Anwenderzielgruppen begleitet, um die spätere Ausrichtung der Plattform an konkreten Bedarfen sicherzustellen. Darüber hinaus wurden Synergien mit bestehenden eigenen Forschungsvorhaben, etwa im Kontext der LMS-Auswahl, geprüft und konstruktiv in den Entwicklungsprozess eingebracht.

**2. Modul (AP2):** Im Fokus des Arbeitspakets 2 stand die nutzerzentrierte und technisch fundierte Weiterentwicklung der digitalen Genehmigungsplattform. Zu Beginn wurden die relevanten Stakeholder identifiziert und gezielt für Validierungsgespräche koordiniert, um ein fundiertes Verständnis der Anforderungen und Erwartungen zu gewinnen. Auf Basis der Anforderungsanalyse aus der ersten Projektphase wurden erste Mock-Ups für die Benutzeroberfläche (UI) und die Customer Journey entwickelt. Diese wurden in iterativen Schleifen validiert und um internes Feedback ergänzt, um eine möglichst intuitive und funktionale Nutzererfahrung sicherzustellen (AP 3.1).

Parallel dazu wurde die technische Grundlage geschaffen: Die Server-Architektur wurde gemäß den Ergebnissen der Anforderungsanalyse aufgebaut, sodass ein stabiles Backend für die weitere Entwicklung zur Verfügung stand. Für das absolvierte Verbundtreffen wurde ein strukturiertes Status-Update erarbeitet, das durch eine Live-Demonstration des Front Ends der Plattform ergänzt wurde und so den aktuellen Entwicklungsstand greifbar machte.

Zur weiteren Spezifikation der Plattformfunktionalitäten wurden zentrale Genehmigungs- und Änderungsverfahren anhand konkreter Use Cases beschrieben. Abschließend erfolgte das Clustering der Genehmigungsprozesse, um eine meilensteinabhängige Steuerung innerhalb der Plattform zu ermöglichen. Dadurch wird eine strukturierte und transparente Abbildung der Entscheidungslogik innerhalb des Genehmigungsworflows gewährleistet. Für die detaillierte Use-Case-Beschreibung haben wir mithilfe von Figma die validierten Mockups erstellt (AP3.2). Aus den vorherigen Interviews mit Projektbeteiligten ergab sich, dass aktuell keine Aufnahme der bestehenden IT-Systemlandschaft gewünscht ist. Daher wird stattdessen eine Dokumentation zur

Nutzung erstellt. Für die Agile Softwareentwicklung wurden etablierte Technologien verwendet, darunter Hyperledger Fabric, IPFS, Go, Docker und Kubernetes im Backend sowie eine JavaScript-basierte Web-Oberfläche im Frontend. Zur Systemüberwachung kommen Admin-Dashboards wie Hyperledger Explorer, das IPFS Panel und das Kubernetes Dashboard zum Einsatz.

**3. Modul (AP3):** Im Rahmen des AP 3.1 hat das FIR zur „Identifikation geeigneter Anwendungsfelder“ Dokumente zur Recherche und Beschreibung des Stands von Wissenschaft und Technik im Anwendungszusammenhang finalisiert und ein erstes Datenmodell sowie erste Tätigkeiten zur Datenvorbereitung der durch GRS identifizierten Dokumente für die Verwendung in Sprachmodellen erstellt. Für das AP 3.2 „Technologie-Scouting für die Basistechnologie und Systementwurf“ wurde gemeinsam mit der GRS ein erster Ansatz für eine Methodik zur Bewertung der Technologien definiert.

In Abstimmung mit den Konsortialpartnern GRS und Dornier wurde der Systementwurf für einen Retrieval Augmented Generation basierten Chatbot-Assistenten erstellt. Hierfür wurden die Anforderungen definiert, und in Absprache mit dem Entwicklerteam des FIRs relevante Systemkomponenten ermittelt, sowie benötigte Kapazitäten erörtert. In AP3.3 „Aufsetzen und Entwicklung des Language Modells und anderer KI-Verfahren“ wurde zur methodischen Unterstützung der GRS anstelle User Stories in Abstimmung mit dem Entwickler- und Konsortialteam ein kombiniertes Format aus Kurzsteckbrief und Frage-Antwort-Vorlage entwickelt. Dies verbessert die Anforderungsbeschreibung und erleichtert die Validierung der Ergebnisse.

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

**1. Modul (AP1):** Im Rahmen von Modul 1 fokussiert sich die kommende Projektphase auf die Fertigstellung der mobilen Trainingsstation sowie deren Evaluation durch umfangreiche Nutzertests unter realen Einsatzbedingungen. Ziel ist die empirisch gestützte Bewertung von Funktionalität und didaktischer Wirksamkeit, wobei arbeitspsychologische Expertise in die Analyse nutzerbezogener Rückmeldungen einfließen soll, um gezielte Optimierungspotenziale zu identifizieren (AP 1.10). Ergänzend dazu wird die Weiterentwicklung der Community-Plattform unterstützt aus AP 1.1 und AP 1.4, mit dem Ziel, einer finalen DSC Prototypenkonzeption die inhaltliche und funktionale Ausgestaltung iterativ weiterzuentwickeln und zentrale Anforderungen in eine praxisnahe MVP-Version zu überführen.

**2. Modul (AP2):** Die sichere Dateispeicherung über IPFS sowie die Integration des Hyperledger Explorers wurden bislang separat getestet. In der nächsten Phase sollen beide kombiniert werden: PDF-Dateien werden über IPFS gespeichert, während Metadaten (z. B. Versionen, Änderungen) in der Blockchain erfasst werden. Zudem entsteht eine UI basierend auf Rollen- und Rechtekonzepten zur Verwaltung von Datei-Zugriffen. Es wird eine modulare Integrationsstrategie dokumentiert.

**3. Modul (AP3):** Im AP 3.2 soll die für die weiteren bereits ermittelten Anwendungsfelder in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Konsortialpartnern Systemarchitekturen und die Selektion der von FIR und GRS bewerteten Technologien finalisiert werden. Weiterhin wird das FIR im AP 3.3 „Aufsetzen und Entwicklung des Language Modells und anderer KI-Verfahren“ die Entwicklung des Chatbot-Assistenten vorantreiben. Hierfür sollen Open-Source LLM-Anwendungen zum Einsatz kommen und für den definierten Anwendungsfall entsprechend angepasst werden. Zudem soll eine Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt werden, um den Benutzer eine strukturierte und intuitive Anwendung zu ermöglichen.

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

Im Berichtszeitraum wurden in allen drei Modulen (APs) kein Bezug zu anderen Vorhaben vorgenommen.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

Im Berichtszeitraum wurden in allen drei Modulen (APs) keine Berichte und Veröffentlichungen vorgenommen.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448D
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Safeguards sowie Partitioning	
<b>Laufzeit des Vorhaben:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 294.290,91 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Irmgard Niemeyer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> i.niemeyer@fz-juelich.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Projekts K.I.S.S. ist es, integrierte Plattformen für das effiziente Rückbau- und Genehmigungsmanagement von kerntechnischen Anlagen mit Fokus auf Kompetenzerhalt, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung zu entwickeln. Das Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt, die jeweils eine innovative Lösung für die Qualifizierung von Fachkräften, das Genehmigungsmanagement und die Prozessführung für den Rückbau darstellen. Die Plattform soll die Sicherheitskultur in der Kerntechnik stärken, den Wissensaustausch und -erhalt fördern, die Kommunikation und Transparenz zwischen den Beteiligten verbessern und die Position deutscher Akteure im internationalen Rückbaumarkt sichern.

Im Teilprojekt „Safeguards und Partitioning“ werden Lerninhalte für einen virtuellen Trainingskurs zur internationalen Kernmaterialüberwachung (engl. Safeguards) und für ein virtuelles kerntechnisches Messpraktikum entwickelt.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das K.I.S.S. Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt:

1. Modul 1: Community-Plattform & mobile Trainingsstation - Ziel ist es, durch aufeinander abgestimmte und miteinander verknüpfte Lösungen (Digital Smart Campus, mobile Trainingsstation, Lernmanagementumgebung etc.) das Wissens- sowie Projektmanagement im Bereich Rückbau- und Genehmigungsverfahren von kerntechnischen Anlagen zu stärken.
2. Modul 2: Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben - Ziel ist es, eine digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie zu entwickeln, um die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente und in Echtzeit geführte Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten zur Beschleunigung der Projekte zu ermöglichen.
3. Modul 3: KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau - Ziel ist es, ein Managementsystem zur KI-gestützten Prozessführung für den Rückbau zu realisieren, damit die umfangreichen Daten besser aufbereitet werden können, sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation optimiert werden.

Jedes Modul hat für sich einen eigenen Anwendungsschwerpunkt, wobei die Synergie im abgestimmten Einsatz der Basistechnologien bzw. Softwarelösungen begründet ist.

Im Rahmen von Modul 1 werden die Lerninhalte für Safeguards und kerntechnisches Messpraktikum entwickelt und in die Community Plattform integriert.

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

Trainingsinhalte für Modul 1:

- 1) Zwei Szenarien zum Strahlenschutz „Detektion und fachgerechte Entsorgung kontaminiert Objekte“ und „Dekontamination einer ausgelaufenen Flüssigkeit“ befinden derzeit in der Umsetzung.
- 2) Zwei Szenarien der internationalen Kernmaterialüberwachung „Siegelanbringung am CASTOR® -Behälter durch Betreiber in der Reaktorhalle“ und „Siegelverifikation und-Austausch am CASTOR®-Behälter durch Inspektor“ im Zwischenlager befinden derzeit in der Umsetzung.

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

Die unter Punkt 3 skizzierten Arbeiten im Rahmen von Modul 1 werden fortgesetzt. Nach ersten Tests befinden sich die ersten Prototypen der Strahlenschutz- und Safeguards-Trainingsszenarien nun im Debugging-Prozess zwischen Jülich, NUSEC, der TU Dresden und Actimondo.

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

Bislang besteht kein Bezug zu anderen Vorhaben

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

- [1] J. Kettler, "Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kerntechnischer Anlagen - Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „K.I.S.S.“, ATW Nr. 1 ISSN 1431–5254, 2025

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448E
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität Dresden – Center for Open Digital Innovation and Participation (CODIP)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Kapazitätsaufbau durch virtuell erweitertes Training und Entwicklung der Wissensgemeinschaft	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 414.910,89 EURO
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Thomas Köhler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> thomas.koehler@tu-dresden.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Erprobung von aufeinander abgestimmten und miteinander verknüpften, digital und KI-gestützten Lösungen für das Wissens- und Projektmanagement zum Rückbau von kerntechnischen Anlagen. Diese sollen die Entwicklung und den Erhalt von Kompetenzen unterstützen sowie die Durchführung von Verfahrens- und Dokumentationsprozessen optimieren und vereinfachen. Konkret werden dabei eine Community-Plattform für die Orientierung und den Austausch von angehenden und erfahrenen Fachkräften der kerntechnischen Branche, eine mobile Trainingsstation mit einer Virtual Reality (VR)-Anwendung zur Kompetenzentwicklung, eine digitale Plattform für Genehmigungs- und Aufsichtsverfahren sowie KI-gestützte Softwarewerkzeuge für den Rückbau konzipiert, umgesetzt und erprobt.

Im Teilprojekt der Technischen Universität Dresden (TUD) liegt der Fokus insbesondere auf der Entwicklung von wissenschaftlich fundierten, pädagogisch-didaktischen Konzepten für die Gestaltung und Implementierung der Community-Plattform und des VR-Trainings. Weiterhin unterstützt die TUD die Erstellung des Konzeptes für die KI-gestützten Softwarewerkzeuge – voraussichtlich in Form von Conversational Agents – unter didaktischen Gesichtspunkten. Darüber hinaus bringt die TUD ihre umfassende methodische Expertise ein, um Untersuchungsdesigns für die Durchführung von formativen und summativen User-Experience- und Wirksamkeitstests der entwickelten Lösungen zu konzipieren und führt solche Tests am Standort Dresden auch selbst durch. Diese Aktivitäten tragen maßgeblich zur Entstehung einer wissenschaftlich fundierten und empirisch erprobten, ganzheitlichen Lösung bei, welche die Kompetenzentwicklung und das Wissensmanagement zum Rückbau von kerntechnischen Anlagen mittel- und langfristig unterstützt, aufrechterhält und optimiert. Die dabei generierten Ergebnisse und Erkenntnisse werden sowohl wissenschaftlich verbreitet als auch in die Praxis der Fachkräftequalifikation transferiert.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Vorhaben ist in drei Fachmodule unterteilt:

- Community-Plattform mit mobiler VR-Trainingsstation (Modul 1): Die webbasierte Plattform integriert verschiedene, digital gestützte Lösungen für den Erhalt und die

Entwicklung von Fach- und Methodenkompetenz, wie beispielsweise Bildungsressourcen, Kollaborationsfunktionen und eine mobile VR-Trainingsstation.

- Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben (Modul 2): Die digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie unterstützt Rückbauvorhaben durch die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente Echtzeit-Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten.
- KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau (Modul 3): Werkzeuge für verschiedene Anwendungsfälle optimieren die Analyse und Aufbereitung von umfassenden Daten sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation

Die Synergie der drei Module, die jeweils einen eigenen Anwendungsschwerpunkt haben und in einzelne Arbeitspakete (AP) gegliedert sind, liegt im abgestimmten und weitmöglich vernetzten Einsatz der entwickelten Lösungen. Die TUD ist in die Entwicklungen in Modul 1 und Modul 3 eingebunden, fokussiert dabei insbesondere Aspekte der Didaktik, User Experience und Forschungsmethodik und unterstützt überdies durch die Anbindung von Qualifikationsmaßnahmen, wie z. B. die Ausbildung von pädagogischen Fachkräften für die berufliche Bildung und Promotionsvorhaben mit bildungstechnologischen Themen, einen Feldzugang.

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

Im Halbjahr I/2025 wirkte die TUD in Modul 1 maßgeblich und in enger Abstimmung mit den fachlichen Partnern an der Weiterentwicklung der mediendidaktischen Konzeption für die Community-Plattform (AP 1.1) mit. Eine wesentliche Optimierung gegenüber dem bisherigen Konzept lag darin, dass nicht länger von mehreren, themenspezifischen Wissenspools als Teile des lernbezogenen Bereichs (Learning Area) der Plattform ausgegangen wird. Stattdessen beinhaltet das überarbeitete Konzept einen zentralen Wissenspool als strukturierte Sammlung und Organisation aller Informationen und Medieninhalte, die für die gesamte der Plattform relevant sind und von allen ihren Elementen aufgerufen werden können (siehe Abbildung 1). Weiterhin beteiligte sich die TUD sehr aktiv an der Definition und Implementierung der Qualitäts- und Formatstandards (AP 1.2) für alle vier Ebenen der Plattform, d. h. Inhalte, Metadaten, Semantik und Zugriff. Auf der Inhaltsebene wurden beispielsweise konkrete Formate für Eigen- (wie z. B. Text, Grafik und Multimedia) sowie Fremdinhalte (wie Verweise und Abrufe) definiert. Zugriffe auf Informationen sollen wiederum über Such-, Empfehlungs- und Navigationsfunktionen erfolgen. Eine weitere, wesentliche Aktivität der TUD lag in der Durchführung von Tests und Evaluationen des entwickelten Konzepts zur Sicherstellung der Zielgruppenkompatibilität (AP 1.2). Eine Online-Befragung von 40 Akteurinnen und Akteuren aus dem Kernkraftbereich zeigte dabei, dass die primäre Zielgruppe vor allem die Bereitstellung von Bildungsressourcen, wie Lernmaterialien, Fachartikeln und Bildungsverzeichnissen als nützlich erachtet. Dagegen sehen sie insbesondere interaktive Kommunikations- und Informationsfunktionen wie einen personalisierten Feed sowie ein Eventmanagement- oder Nachrichtensystem – auch mit Verweis auf bereits bestehende und etablierte Lösungen – als weniger gewinnbringend an. Weiterhin wurde seitens der TUD ein Untersuchungsdesign für die Durchführung von Tests mit verschiedenen Zielgruppen zur Evaluierung der Plattform (AP 1.4) entwickelt. Es nutzt die qualitative Shadowing-Methodik, bei der die Testpersonen während der Durchführung von vorgegebenen Testaufgaben mit Prototypen der Plattform beobachtet und anschließend vertiefend dazu interviewt werden. Die teilstandardisierten Interviews helfen dabei, das Verhalten der Nutzenden besser zu verstehen und erleichtern dadurch seine Interpretation und sowie die Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Optimierung und Weiterentwicklung der entwickelten Prototypen.

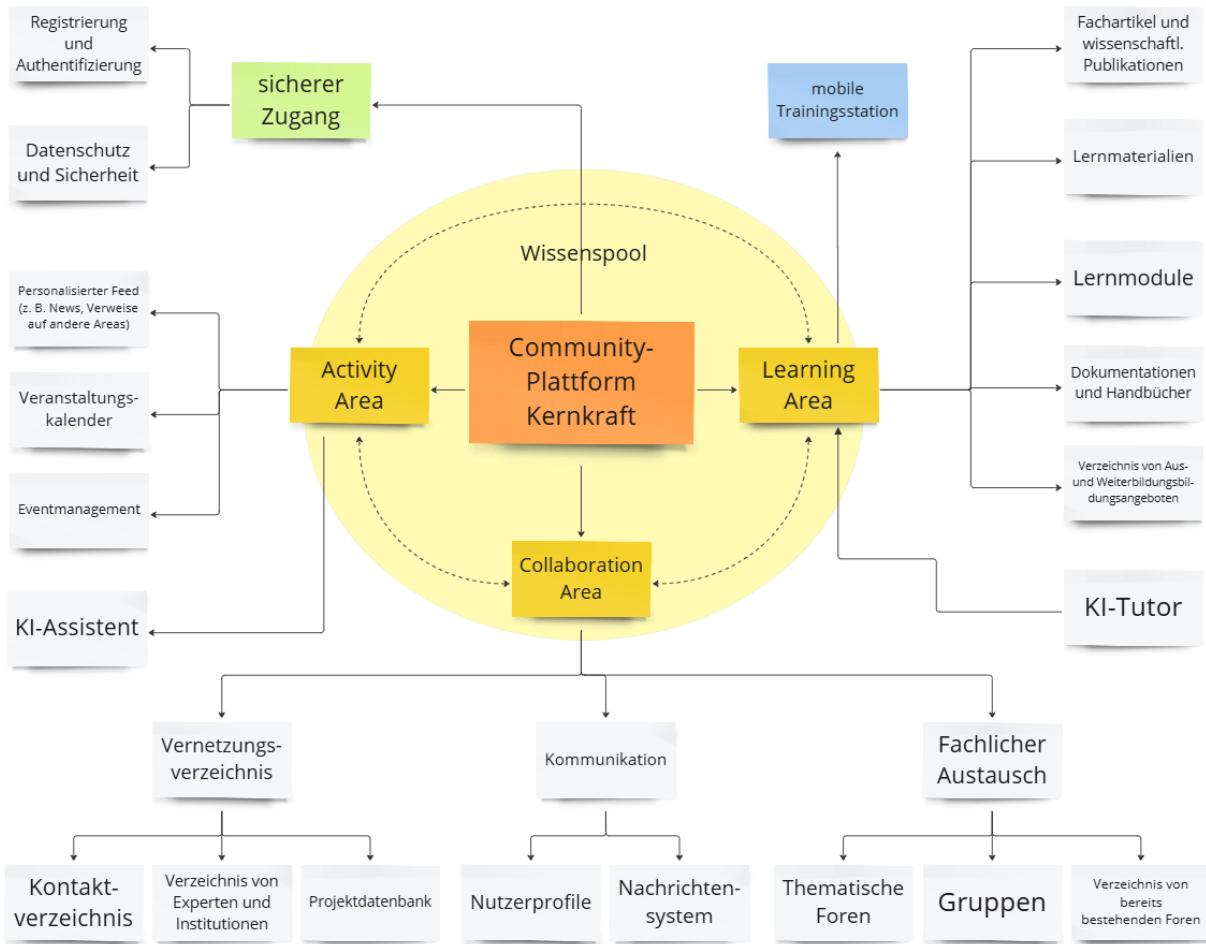


Abbildung 9: Weiterentwickeltes mediendidaktisches Konzept der Community-Plattform

Zur Entwicklung der mobilen VR-Trainingsstation trug die TUD durch die Bereitstellung von Best-Practice-Erfahrungen aus bisherigen Forschungsprojekten bei, um die Identifikation und Festlegung von geeigneten Technologien (AP 1.8) erfolgreich abzuschließen. Als Zugriffstechnologie wurde letztendlich die Meta-Quest-3-VR-Brille in Verbindung mit einem leistungsstarken Rechner gewählt. Diese Lösung zeichnet sich neben ihren technischen Stärken – wie der hohen Auflösung, präzisen Sensorik, des komfortablen Tragegefühls und der Möglichkeit zur Ausführung von komplexen VR-Simulationen mit stabiler Performance – auch durch ihre hohe Verfügbarkeit am Markt einschließlich Hersteller- und Community-Support und ihr angemessenes Preis-Leistungs-Verhältnis aus.

In Modul 3 brachte die TUD ihre Expertise insbesondere bei der Bewertung und Auswahl geeigneter Sprachmodelle (AP 3.2) ein. Die Analyse bezog eine große Bandbreite von technischen Lösungen ein, die von international etablierten Large-Language-Models (LLMs) – wie z. B. GPT-4o und Gemini – bis hin zu Entwicklungen aus nationalen Forschungsprojekten, wie LeoLM und SauerkrautLM, reichten. Als Auswahlkriterien dienten hierbei neben Performance-Indikatoren auch Aspekte wie Aktualität und Datenschutzkonformität. Zudem begleitete und beriet die TUD beim Systementwurf und der Umsetzungskonzeption der KI-gestützten Werkzeuge für die Prozessführung beim Rückbau unter technisch-didaktischen Gesichtspunkten (AP 3.2). Weiterhin wurde – unter Einbezug von Studierenden des Lehramts für berufliche Bildung – konkretisiert, wie die entwickelten Lösungen in bestehende Aus- und Weiterbildungsprogramme bildungsadministrativ integriert werden können (AP 4.3). Dies betrifft sowohl formale Programme wie IHK-Zertifizierungen zur Strahlenschutz-Fachkraft als auch non-formale Angebote, wie den Kerntechnik-Competence-Hub des Partners Framatome.

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

Im Halbjahr II/2025 wird die TUD die iterative (Weiter-)Entwicklung der Prototypen für die Community-Plattform, die VR-Trainingsstation (Modul 1) und die KI-gestützten Softwarewerkzeuge (Modul 3) weiterführend unterstützen. In Bezug auf die Community-Plattform wird die TUD dabei bei der Durchführung von Tests von ersten Prototypen mit verschiedenen Zielgruppen mit dem Ziel unterstützen, diese zum Minimum Viable Product (MVP) weiterzuentwickeln (AP 1.4). Zudem wird die bereits bestehende Sicherheitsfachkräfte (SIFA)-Community um eine Fachgruppe für Strahlenschutz erweitert (AP 1.5). Hierfür wird zunächst ein Konzept erarbeitet und Community-Building mit dem perspektivischen Ziel angeregt, Synergien und Kollaborationen mit der Zielgruppe der entwickelten Kernkraft-Community-Plattform zu fördern. Weiterhin begleitet und berät die TUD auf Basis ihrer umfassenden Vorerfahrungen die Zusammenführung der einzelnen Komponenten, die besondere im Modul 1 des Vorhabens entwickelt und erprobt werden, zu einer Austausch- und Lernplattform für die Kernkraft-Community (AP 1.6). In Bezug auf die abschließende Testung der mobilen VR-Trainingsstation wird die TUD ein Untersuchungsdesign mit geeigneten Evaluationsmethoden entwickeln und auch selbst Testläufe mit spezifischen Nutzergruppen durchführen (AP 1.11). Adäquat dazu werden auch für die KI-gestützten Werkzeuge zur Erleichterung des Rückbauprozesses Strategien für Testläufe mit Prototypen in verschiedenen Stadien erarbeitet (AP 3.4). Zudem werden die erarbeiteten Konzepte für den Praxistransfer der entwickelten Lösungen in bestehende Aus- und Weiterbildungsprogramme bzw. Capacity-Building-Prozessen in Unternehmen weiter konkretisiert und präzisiert (AP 4.2 und 4.3), um den perspektivischen Praxistransfer vorzubereiten. Parallel erfolgt der Wissenschaftstransfer der bisherigen und weiteren Ergebnisse fortlaufend in Form von Publikationen auf Fachtagungen und in Fachzeitschriften.

#### 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Verbundes wurde der Austausch mit inhaltlich anknüpfenden Vorhaben fortgeführt und intensiviert. Dies betrifft insbesondere das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben KIKO, mit dem zur Entwicklung der KI-gestützten Bausteine sowie ihrer technisch-inhaltlichen Basis – einschließlich Ontologiebildung – eine enge Zusammenarbeit erfolgt. Weiterhin wurde ein regelmäßiger Austausch mit der Professur für Didaktik der Physik an der TUD etabliert. Einige Mitarbeitende dieser Struktureinheit forschen und entwickeln seit wenigen Jahren ebenfalls zur Gestaltung und zum Einsatz von VR-Trainings im Bereich der Strahlenphysik. Ihre hybriden Ansätze, die reale und virtuelle Experimente in diesem Fachgebiet miteinander verknüpfen, bieten wertvolle Anregungen für die Weiterentwicklung der Konzepte für den Transfer der mobilen VR-Trainingsstation in die Bildungspraxis (AP 4.3).

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Kettler, J., Wipper, D., Anthofer, A., Grauel, B., Koslowski, D., Göpel, C., Nester, A., Löwig, M., Hammoud, R., Ibeawuchi, P., Grahlmann, J., Wiesel, H., Rathaus, A., Möllerke, F., Seher, H., Mönig, H., Dierschow, F., Spanier, R., Dewald, M., Britz, S., Herb, J., ... Thomas, A. (2025). Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kerntechnischer Anlagen - Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „K.I.S.S.“. In *atw International Journal for Nuclear Power*, 70(1), 41–48.

Seher, H., Kettler, J., Anthofer, A., Aymanns, K., Britz, S., Dewald, M., Dierschow, F., Dyrna, J., Graul, B., Hammoud, R., Hoeborn, G., Imielski, P., Kantharajah, A., Koslowski, D., Mönig, H., Niemeyer, I., Spanier, R., & Wiesel, H. (2025). The K.I.S.S. project – an overview. Third interdisciplinary research symposium on the safety of nuclear disposal practices (safeND2025-7). Berlin, Germany, 17–19 Sep 2025. <https://doi.org/10.5194/safend2025-7>

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448F
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Advanced Nuclear Fuels GmbH, Am Seitenkanal 1, 49811 Lingen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Modernste Lernkonzepte und Didaktiken für nachhaltigen Kompetenzerhalt und Aufbau mit dem Competence.hub	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 155.116,99€
<b>Projektleiter/-in:</b> Felix Möllerke	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Felix.moellerke@framatom.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Projekts K.I.S.S. ist es, integrierte Plattformen für das effiziente Rückbau- und Genehmigungsmanagement von kerntechnischen Anlagen mit Fokus auf Kompetenzerhalt, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung zu entwickeln. Das Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt, die jeweils eine innovative Lösung für die Qualifizierung von Fachkräften, das Genehmigungsmanagement und die Prozessführung für den Rückbau darstellen. Die Plattform soll die Sicherheitskultur in der Kerntechnik stärken, den Wissensaustausch und -erhalt fördern, die Kommunikation und Transparenz zwischen den Beteiligten verbessern und die Position deutscher Akteure im internationalen Rückbaumarkt sichern.

Das Competence.hub der Advanced Nuclear Fuels GmbH wird innerhalb des Verbundprojektes (Modul 1) eine moderne hybride Lernplattform entwickeln, die Lerninhalte zu Themen rund um das K.I.S.S. Projekt on-demand zur Verfügung stellt. Die heutige "Generation Z" ist die erste Generation, die voll digitalisiert aufwächst bzw. aufgewachsen ist. Dementsprechend muss die Lernumgebung auf die Bedürfnisse und Erwartungen dieser und zukünftiger Generation angepasst werden, will man sicherstellen, dass Wissen auch effektiv transferiert wird. Es wird der Ansatz eines Multilevel-Lernkonzepts angestrebt: Eine Kombination aus Präsenzveranstaltungen und ein Mix aus verschiedenen Medienarten (Blended-Learning) wie z.B. e-learning Videos, Podcast und Animationsfilme. Gepaart wird dies mit Gamification- Elementen, die einen hohen Transfergrad an Informationen erwirken, gegenüber klassischen und traditionellen Tagesseminare. Des Weiteren werden neueste empirische und didaktische Erkenntnisse der Lehre berücksichtigt und teilweise übernommen, um die Wissensvermittlung nach State-of-the-art durchzuführen. Zudem werden für die Qualifizierung von Mitarbeitenden für Tätigkeiten im kerntechnischen Umfeld moderne Trainings- und Lernmanagementkonzepte entwickelt, die auf Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) basieren. Das Ziel des Vorhabens und des Arbeitspakets der Advanced Nuclear Fuels GmbH ist es, den Einsatz dieser Technologien so weit zu entwickeln, dass den Trainees ein möglichst realistisches Empfinden im Bereich des Strahlenschutzes und der Arbeit in Kontrollbereichen ermöglicht wird. Wir werden diese Technologie als zentralen Bestandteil (hybriden) Lernumgebung einsetzen. Das Lösungskonzept besteht aus einem Kursprogramm, das Online-Kurseinheiten und Präsenzseminare sinnvoll miteinander verknüpft.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das K.I.S.S. Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt:

1. Modul 1: Community-Plattform & mobile Trainingsstation - Ziel ist es, durch aufeinander abgestimmte und miteinander verknüpfte Lösungen (Digital Smart Campus, mobile Trainingsstation, Lernmanagementumgebung etc.) das Wissens- sowie Projektmanagement im Bereich Rückbau- und Genehmigungsverfahren von kerntechnischen Anlagen zu stärken.
2. Modul 2: Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben - Ziel ist es, eine digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie zu entwickeln, um die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente und in Echtzeit geführte Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten zur Beschleunigung der Projekte zu ermöglichen.
3. Modul 3: KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau - Ziel ist es, ein Managementsystem zur KI-gestützten Prozessführung für den Rückbau zu realisieren, damit die umfangreichen Daten besser aufbereitet werden können, sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation optimiert werden.

Jedes Modul hat für sich einen eigenen Anwendungsschwerpunkt, wobei die Synergie im abgestimmten Einsatz der Basistechnologien bzw. Softwarelösungen begründet ist.

Das Competence.hub der Advanced Nuclear Fuels GmbH wird im ersten Schritt ein gesamtheitliches Lernkonzept/-format in Verbindung mit einer digitalen Lernplattform zur digitalen Wissensvermittlung entwickeln. Dieses soll später an das Digital Smart Campus angedockt werden können. Dabei unterstützt das Competence.hub bei der Integration.

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

**AP1.1:** In regelmäßigen Arbeitsmeetings wurden die Eckpunkte des Arbeitspaketes 1 mit den entsprechenden Verbundpartnern abgestimmt. Anforderungen für die Integration des Competence.hubs in den Digital Smart Campus wurden diskutiert und abgestimmt. Das Arbeitspaket wurde im Berichtszeitraum seitens ANF abgeschlossen.

**AP1.2:** Es wurden sowohl externe als auch interne Wissenspools und Lernplattformen untersucht. Relevante Lerninhalte für bestimmte Wissenspools wurden definiert und als Grundlage für die Entwicklung von Inhalten genutzt. Durch den Austausch mit den weiteren Projektpartnern wurde die Festlegung von Standards zur Anknüpfung an den DSC unterstützt. Das Arbeitspaket wurde im Berichtszeitraum seitens ANF abgeschlossen.

**AP1.3:** Es wurde dabei unterstützt Inhalte für Wissenspools zu erstellen. Dazu wurden Inhalte aus bestehenden Lernplattformen (nukleare Sicherheitskultur, Sicherheitsdialog,...) als Grundlage verwendet und angepasst. Weiterhin wurde damit begonnen Lerninhalte zu den Themen: Strahlenschutz, Kritikalitätssicherheit, Feedbacktechniken, etc. zu erstellen und eine digitale Lernplattform aufzubauen, um die digitalen Inhalte später zu vermitteln. Hierbei wird Wert auf die Frontend und die User-Experience gelegt, damit das Lernerlebnis nachhaltig ist. Dazu werden moderne lernpsychologische Aspekte der Arbeits-, Lern- und Organisationspsychologie eingesetzt.

**AP1.4:** Teilnahme an Austauschen zu benötigten Inhalten und Ressourcen für Testläufe zur Integration von Wissenspools in den DSC. Weiterhin wurde begonnen eine digitale Lernplattform aufzubauen, welche zukünftig Wissenspools zur Verfügung stellen soll und in den DSC eingebunden werden könnte. Auf der Lernplattform werden verschiedene themenbezogene Wissenspools angelegt, welche später als eigenständige Lerninhalte fungieren können.

**AP1.5:** Start 10.2025.

**AP1.6:** Abgeschlossen in 2024.

**AP1.10:** Start 08.2025.

**AP4.2/4.3:** In wöchentlichen digitalen Arbeitsmeetings wurden unter anderem die Auswahl geeigneter VR-Szenarien, die Auswahl passender Hardware (Metaquest 3 -> mit Fokus auf Performance und Integration) sowie der Beginn einer Probephase mit der von der Firma NUSEC bereitgestellten virtuellen Umgebung erarbeitet. Darüber hinaus wurde der VR-Use-Case mit den Trainingskonzepten des Competence.hubs mit der TU Dresden abgestimmt, um zukünftige Anwendungsfälle zu entwickeln bzw. einzubinden. Seitens des Competence.hubs wurde entsprechende Hardware beschafft und die virtuelle Umgebung getestet. Feedback und Verbesserungsvorschläge wurden den Entwicklern zur Verfügung gestellt.

Darüber hinaus fand am 6. Mai 2025 ein Verbundtreffen bei der Actimondo EG mit allen Verbundpartnern und dem Projektträger statt. Während dieses Treffens wurden das Gesamtvorhaben organisatorisch und inhaltlich abgestimmt. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete wurden vorgestellt, um das Gesamtvorhaben zielgerichtet und koordiniert bearbeiten zu können.

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

Im weiteren Verlauf werden die Arbeitspakete AP1.1; AP1.2; AP1.3; AP1.4; AP1.5; AP1.10; AP4.2; AP4.3 weiter ausgeführt, mit den Partnern regelmäßig ausgetauscht, weiterentwickelt, mit konkreten Inhalten versehen und ganzheitlich mit den Partnern abgestimmt, so dass das spätere Ergebnis im Digital Smart Campus angeschlossen werden kann, gemäß der Vorhabensbeschreibung.

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

Keine

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

ATW, International Journal for Nuclear Power; Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kernteschnischer Anlagen – Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „K.I.S.S.“; ISSN: 1431-5254 (Print), Vol.70 (2025)

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.01.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9448G
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Dornier Hinneburg GmbH (ehemals Dornier Nuclear Services GmbH)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Transformation im Strahlenschutz: Effizienzsteigerungen durch int. Softwarelösungen	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.05.2024 bis 30.04.2027	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 124.208,70 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Anton Philipp Christoph Anthofer	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> anton.anthrofer@dornier-group.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Projekts K.I.S.S. ist es, eine integrierte Plattform für das effiziente Rückbau- und Genehmigungsmanagement von kerntechnischen Anlagen mit Fokus auf Kompetenzerhalt, Strahlenschutz und KI-gestützter Prozessführung zu entwickeln. Das Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt, die jeweils eine innovative Lösung für die Qualifizierung von Fachkräften, das Genehmigungsmanagement und die Prozessführung für den Rückbau darstellen. Die Plattform soll die Sicherheitskultur in der Kerntechnik stärken, den Wissensaustausch und -erhalt fördern, die Kommunikation und Transparenz zwischen den Beteiligten verbessern und die Position deutscher Akteure im internationalen Rückbaumarkt sichern.

Personell steuert DORNIER mit erfahrenen Projektingenieur:innen Perspektiven für die Realisierung des Vorhabens aus Dienstleistersicht bei. Dabei ist DORNIER an der Konzeption und Entwicklung aller drei Fachmodule für die Plattform beteiligt sowie an der modulübergreifenden Projektkoordination und dem Wissenstransfer des Projekts in Forschung und Praxis.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das K.I.S.S. Projekt ist in drei Fachmodule unterteilt:

1. Modul 1: Hybride und innovative Community-Plattform - Ziel ist es, durch aufeinander abgestimmte und miteinander verknüpfte Lösungen (Digital Smart Campus, mobile Trainingsstation, Lernmanagementumgebung etc.) das Wissens- sowie Projektmanagement im Bereich Rückbau- und Genehmigungsverfahren von kerntechnischen Anlagen zu stärken. DORNIER unterstützt die Entwicklung eines didaktischen Konzepts und Identifikation von geeigneten Trainingsszenarien und –inhalten für die mobile Trainingsstation..Bezüglich der Online Community wird DORNIER neben Fachwissen für inhaltliche Themen, die Definition und Ansprache von geeignetem Fachpersonal, für die Rolle der Community-Manager unterstützen.

2. Modul 2: Digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben - Ziel ist es, eine digitale Plattform für Genehmigungsvorhaben auf Basis der Blockchain-Technologie zu entwickeln, um die revisionssichere Übermittlung der Verfahrensunterlagen sowie die transparente und in Echtzeit geführte Kommunikation zwischen den Verfahrensbeteiligten zur Beschleunigung der Projekte zu ermöglichen. Durch DORNIER wird Erfahrung im Prozessablauf und mit bereits realisierten Softwarelösungen beigesteuert. Weitere Einblicke in Dokumentationsmanagement bereichern

das Portfolio. DORNIER liefert Reviews und Ergänzungen sowie Mitarbeit bei einzelnen Arbeitsschritten.

3. Modul 3: KI-gestützte Prozessführung für den Rückbau - Ziel ist es, ein Managementsystem zur KI-gestützten Prozessführung für den Rückbau zu realisieren, damit die umfangreichen Daten besser aufbereitet werden können sowie die Organisation und Strukturierung der Endlagerdokumentation optimiert werden. DORNIER bringt Erfahrungen ein, um die typischen Prozesse im Rückbau darzustellen und arbeitet bei der Gestaltung von Anwendungsfällen mit, bei denen KI den Prozess unterstützen kann. DORNIER beteiligt sich auch an der Bewertung und Prüfung möglicher Lösungen, die von den Partnern auf der Grundlage praktischer Daten und Erfahrungen mit dem Rückbau und der Entsorgung von kerntechnischen Anlagen angeboten werden.

4. Modul 4: Projektkoordination und Wissenstransfer – DORNIER übernimmt den Lead in den Bereichen Informationsmanagement und der Definition von Transferangeboten. Ziel ist es, Kommunikationsschnittstellen zwischen den beteiligten Unternehmen und Modulen zu koordinieren und Transferoptionen in Wissenschaft und Wirtschaft aktiv zu fördern.

Jedes Modul hat für sich einen eigenen Anwendungsschwerpunkt, wobei die Synergie im abgestimmten Einsatz der Basistechnologien bzw. Softwarelösungen begründet ist.

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

Übergreifend:

- Teilnahme an regelmäßigen JF und Projekttreffen
- Teilnahme am K.I.S.S.-Verbundtreffen

Modul 1:

- Durchführung von Nutztests und Evaluation des didaktischen Designs und der User Experience an den VR-Trainings
- Unterstützung bei der didaktischen Entwicklung des Integrationskonzepts (Pre-Training, Lernevaluation, Messinstrumente)
- Definierung von Wissenspools und Bereitstellung/Überarbeitung von eigenen Inhalten für die Community Plattform
- Unterstützung bei der Konzeption und Integration einer Fachgruppe für Strahlenschutz für die SIFA-Community

Modul 2:

- Zuarbeit zur Benutzeroberfläche der von FIR programmierten Umsetzung der digitalen Plattform
- QS der von FIR grafisch erstellten Zusammenhänge und Abhängigkeiten als Basis für das MVP
- Mitwirkung bei der Diskussion der Priorisierung bestimmter Aspekte bei der Umsetzung der Programmierung, mit Fokus auf der Qualität des Endergebnisses und auf der effizienten Nutzung der Arbeitszeit

Modul 3:

- Teilnahme an regelmäßigen JF und Projekttreffen
- Detaillierte Beschreibung des Use Case
- Erstellung einer strukturierten Liste mit Fragen und Antworten, um den Anwendungsfall den Projektpartnern zu erklären

- Bereitstellung Materialien z.B. Übergabebrett, Regelwerk, etc.
- Beantwortung aller Fragen von unseren Partnern

#### Modul 4:

- Durchführung der Summer School NewCLEAR vom 11.06.-13.06.2025 in Potsdam:
- 45 Teilnehmer bestehend aus Kerntechnik-Experten, Ausstellern und Studierenden von verschiedenen deutschen Hochschulen
- diesjähriger Themenschwerpunkt: Rückbau von Kernkraftwerken
- sieben Keynote-Lectures gehalten von eingeladenen Kerntechnik-Experten, sowie fünf Kurzvorträge, davon zwei Doktorandenvorträge von Promovierenden des SIDEC-Graduiertenkollegs
- abwechslungsreich gestaltet mit verschiedenen interaktiven Teilen zum Mitmachen
- am 3. Tag Besuch des Forschungsreaktors BERII in Berlin-Wannsee

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

##### Modul 1

- Lernzieldefinition der einzelnen Trainings und Entwicklung geeigneter Messinstrumente für Lernerfolg & -transfer
- Entwicklung eines Pre-Trainings für die VR-Trainings zur Reduktion von Technologiehemmnissen
- Durchführung einer wissenschaftlichen Studie zur praktischen Untersuchung theoretischer Annahmen über die Wirkungszusammenhänge von Lernen und der Gestaltung immersiver Medien
- Unterstützung bei der Entwicklung eines Train-the-Trainer Programms

##### Modul 2

- Teilnahme an regelmäßigen Jour fixe-Terminen
- Test und Validierung des MVP der digitalen Umsetzung der erstellten Plattform
- Test und Validierung des basierend auf dem MVP erarbeiteten Entwurfs für die digitale Plattform in Hinblick auf Schnittstellen und Integrationsfähigkeit mit vorhandener Software und allgemeine Anwendbarkeit im Kontext von Genehmigungsverfahren
- Unterstützung bei den abschließenden Interviews der Stakeholder, die das MVP erhalten sollen und anschließend Feedback geben werden
- Unterstützung bei der Ausarbeitung einer Präsentation der Ergebnisse auf der KONTEC 2025

##### Modul 3

- Bewertung des ersten Prototyps der Anwendungsfälle
- Unterstützung bei der Demonstration und Validierung der Ergebnisse des Anwendungsfalls
- Teilnahme an regelmäßigen Jour fixe-Terminen

##### Modul 4:

- Planung und Durchführung einer weiteren Summer School NewCLEAR im Jahr 2026 mit Exkursion zum Kernkraftwerk KGR in Lubmin sowie einem neuen Themenschwerpunkt und mehr interaktiven Formaten

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

Kontakt mit Verantwortlichen des Vorhabens EducTUM an der TU München und dem Forschungsprojekt KIKO wird fortgeführt sowie Daten zur Verfügung gestellt.

## **6. Berichte und Veröffentlichungen**

- R. Hammoud, D. Koslowski, P. Ibeawuchi, A. Anthofer, and V. Mechtcherine, “Sustainable Decommissioning in Germany: Innovations in Sampling and Virtual Radiation.”

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.03.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9452A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Fachhochschule Südwestfalen	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: KI-Entwicklung und Modellierung	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2025 bis 29.02.2028	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.126.566,98 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Thomas Kopinski	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> kopinski.thomas@fh-swf.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Die Stilllegung kerntechnischer Anlagen in Deutschland ist ein komplexer Prozess, der mit enormen Herausforderungen verbunden ist. Eine der größten Schwierigkeiten ist die Sicherstellung einer konstanten Verfügbarkeit von geschultem Fachpersonal. Angesichts eines bereits bestehenden Fachkräftemangels in vielen Branchen ist es entscheidend, innovative Methoden zu nutzen, um den Wissenserhalt und die Ausbildung neuer Spezialisten zu gewährleisten.

Das Verbundprojekt **KIKO (Kompetenzvermittlung und -konservierung mittels Methoden der Künstlichen Intelligenz)**, an dem die FH Südwestfalen, die actimondo eG und die TU München beteiligt sind, hat sich zum Ziel gesetzt, genau diese Probleme mithilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) zu lösen. KIKO zielt darauf ab, die Aus-, Fort- und Weiterbildung von Fachkräften zu verbessern und das kritische Wissen über die Stilllegung kerntechnischer Anlagen zu bewahren. Die FH Südwestfalen (**FH SWF**) hat in KIKO die Aufgabe, sich um die Datenaufbereitung, die Modellentwicklung und die das Intelligente Tutoring zu kümmern (AP 1-6, cf. Abb. 1).

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm umfasst 7 themenspezifische Module sowie eine projektspezifische KI-Server-Inbetriebnahme/-Instandhaltung. Das hier abgebildete Arbeitsprogramm fasst die Arbeitspakete einmal zusammen und gibt einen zeitlichen Überblick.

Paket	Q1	Q2	Q3	Q4	M1	Q1	Q2	Q3	Q4	M2	Q1	Q2	Q3	Q4	M3	Partner
AP 1.1: Datenaufnahme																Alle
AP 1.2: Datenqualität																Alle
AP 1.3: Datenpipeline																FHS
AP 2.1: LLM Modellauswahl																FHS
AP 2.2: LLM Feintuning																FHS
AP 2.3: LLM RAG-Indexing																FHS
AP 2.4: LLM Prompt Engineering																FHS (leitend), alle
AP 3: Intelligentes Tutoring																TUM, FHS
AP 4.1: Knowledge Vault / Wissenspool																TUM, FHS
AP 4.2: Autonome Agenten																FHS
AP 5: Klassische KI Systeme																FHS
AP 6: Human Performances																FHS, TUM
AP 7: Lernplattform / Software Entwicklung																ACT
AP 8: Summer School																Alle

Abb. 1: Arbeitspakete

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

#### AP 1: Datenbasis (Pipeline, Aufnahme, -qualität; FH SWF)

Die wichtigsten Teile der KIKO Datenpipeline wurden implementiert, wodurch die Pipeline um die Verarbeitung von PDF-zu-Markdown-Konvertierungen und eingebetteten Bildern erweitert wurde. Diese Verbesserung hat sowohl die Flexibilität als auch die Robustheit des Datenverarbeitungsprozesses erheblich gesteigert. Die Verwendung von Vision Language Models (VLMs) zur Qualitätssicherung der extrahierten Daten wurde ebenfalls abgeschlossen. Diese Modelle haben sich als nützlich für semantische Konsistenzprüfungen erwiesen, insbesondere bei der Arbeit mit Optische Zeichenerkennung (OCR) Ausgaben oder bei Texten in verrauschten bild- basierten Dokumenten.

Es wurden umfangreiche Untersuchungen und Bewertungen von Extraktionstools durchgeführt. Tools wie OCRmyPDF [10], olmOCR [11], EasyOCR [12], Docling [13] und Pymupdf4LLM [14] wurden unter verschiedenen Bedingungen getestet. Ihre Stärken und Schwächen wurden dokumentiert, um eine fundierte Toolauswahl für nachgelagerte Aufgaben zu ermöglichen. Die Einbettungsgenerierung wurde implementiert, um eine effiziente semantische Suche und nachgelagerte LLM Aufgaben zu ermöglichen. Dokumentenlader wurden integriert, um die flexible Erfassung verschiedener Dateiformate zu unterstützen. Ein weiterer Meilenstein ist der Beitrag zur Codebasis-Dokumentation und zum Projekt-Wiki, das nun einen strukturierten Überblick über Module, Workflows und technische Entscheidungen bietet. Diese Dokumentation unterstützt eine einfachere Einarbeitung und die langfristige Wartbarkeit des Systems.

#### AP 2: Large Language Models (FH SWF)

Ein domänenspezifischer Wissensgraph wird entwickelt, um als strukturierte Grundlage für ein GraphRAG-System zu dienen und LLMs mit überprüfbaren Fakten zu versorgen, um die sachliche Genauigkeit und Rückverfolgbarkeit zu verbessern.

Die Grundlage bildet eine modulare Ontologie, die unter Verwendung des Modular Ontology Modeling (MOMo) [15] Ansatzes erstellt wurde. Um übergeordnete Konzepte abzudecken, wurde die Common Core Ontology (CCO) [16] ausgewählt und erweitert. Das resultierende Modell wird mit Hilfe eines Pydantic-Konverters (OntologyParser in [17]) in ausführbaren Python-Code umgewandelt.

Basierend auf dieser Struktur extrahieren LLMs Informationen aus unstrukturierten Texten [LLM in [17]]. Die Ontologie liefert das Schema, um diesen Inhalt in einen Wissensgraphen mit definierten Entitäten und Beziehungen zu formalisieren. Open source Frameworks wie Neo4j [18], LlamaIndex [19] und LangChain [20] werden hinsichtlich ihrer Eignung für die Vorverarbeitung, Extraktion und Nachbearbeitung evaluiert.

Es wurde eine modulare Pipeline eingerichtet, die die Erstellung und Konvertierung von Ontologien sowie die LLM basierte Extraktion und Bewertung abdeckt. Während die Pipeline bereits eingerichtet ist, wird die Bewertung des Frameworks fortgesetzt und die Ontologieentwicklung iterativ weitergeführt.

Darüber hinaus erfolgte eine vorläufige Integration von LLMs, wodurch die Plattform in der Lage ist, kontextbezogene Fragen zu Datensätzen zu beantworten, die von Lehrkräften bereitgestellt werden. Diese Funktionalität dient als Proof-of-Concept für die KI-gestützte Lernumgebung von KIKO. Durch den Einsatz von Open-Source-LLMs ist das System derzeit in der Lage, Nutzeranfragen auf Basis zuvor eingegebener Inhalte zu interpretieren und zu beantworten und so intelligentes Tutoring-Verhalten zu simulieren. Diese Integration demonstriert nicht nur die Machbarkeit der Einbettung generativer KI in den Bildungsworkflow, sondern bildet zugleich die Grundlage für das in der nächsten Entwicklungsphase geplante Retrieval-Augmented-Generation-(RAG)-System.

### **AP 3: Intelligentes Tutoring (FH SWF)**

Durch die in Modul 2 entwickelten LLMs sind wir in der Lage, sie in die Position eines Tutors zu versetzen, der den Usern Feedback gib. Hierbei wurden verschiedene Modelle getestet und integriert und mit entsprechenden Prompts versehen. Derzeit kann das System die Antworten der User analysieren und diese auf Fehler bzw. Lücken hinweisen.

### **AP 4: Wissenspool (FH SWF)**

Der Wissenspool wurde, zusammen mit Modul 1, auf Basis von Dokumenten aus dem EducTUM Projekt aufgebaut und in das KIKO System integriert. Inhalte stehen als Kursmodule zur Verfügung und werden per Markdown eingepflegt. Dieses Format wird die Grundlage für die Erstellung weiterer Kursdokumente sein.

### **AP 6: Autonome Agentensysteme (FH SWF)**

Aufbauend auf den Daten aus AP 1 und AP 4 wurden erste Lehrkonzepte für die Messungen per EEG erstellt und als Grundlage für weitere Trainings- und Lehreinheiten in KIKO integriert.

### **Modul 7: Softwareentwicklung (FH SWF)**

Weiterhin lag ein Schwerpunkt der Arbeit auf der Einrichtung der grundlegenden Infrastruktur und Funktionen der KIKO-Plattform in den Bereichen Frontend (FE), Backend (BE), Datenbank (DB) sowie Docker. Dazu gehörten die vollständige Einrichtung modularer Repository-Strukturen, die Entwicklung einer containerisierten Servicearchitektur mit Docker sowie die Implementierung einer rollenbasierten Zugriffskontrolle für die gesamte Plattform.

Im Bereich Frontend wurde die strukturelle Grundlage für die Anwendung geschaffen. Dazu zählen wiederverwendbare gemeinsame Komponenten (z. B. Seitenleiste, Chatbot, Profil, Einstellungen) sowie die Konzeption spezifischer Dashboards für verschiedene Benutzerrollen (Dozent, Administrator, Lernender). Wesentliche Funktionen wie An- und Abmeldeprozesse sowie Dashboards für Lehrkräfte wurden implementiert und mit einer detaillierten Dokumentation versehen, um die gemeinsame Weiterentwicklung zu unterstützen.

Für das Backend wurden RESTful-API-Endpunkte implementiert, die auf die jeweilige Benutzerrolle zugeschnitten sind. Die Authentifizierung und Autorisierung erfolgt mithilfe von JSON Web Tokens (JWT), wodurch ein hoher Sicherheitsstandard gewährleistet ist. Zudem wurden verschiedene Backend-Dienste (Admin, Instructor, Learner) entwickelt und getestet, um zuverlässige CRUD-Operationen (Erstellen, Lesen, Aktualisieren, Löschen) sicherzustellen. Darüber hinaus wurden Datenbankinteraktionen über ORM-Modelle realisiert sowie erste Q\&A-Funktionen mit Open-Source-LLMs integriert.

Auf Datenbankebene wurde ein containerisierter, umgebungskonfigurierbarer PostgreSQL-Dienst eingerichtet. Das Schema wurde gemäß den definierten UML-Diagrammen (Unified Modeling Language) initialisiert, und die Verfahren zur Verbindungseinrichtung wurden dokumentiert.

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

In Q3 und Q4 konzentrieren wir uns auf die Fertigstellung des MVP und den Ausbau des Systems hinsichtlich der geforderten Kriterien. In erster Linie betrifft das die Datenqualität, die Verbesserung der Modelloutputs, die Usability der Software und die Integration der Knowledge Graphen.

## 5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es wurde ein MoU mit dem KISS Projekt vereinbart und geschlossen, so dass die Projekte nun formal eine Grundlage für eine Zusammenarbeit haben und sich nun in engem Wissensaustausch befinden.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

## Appendix

- [1] Snowflake Inc. Streamlit. <https://streamlit.io>. 2019.
- [2] Sebastián Ramírez. FastAPI. <https://fastapi.tiangolo.com>. 2018.
- [3] PostgreSQL Global Development Group. PostgreSQL. <https://www.postgresql.org>. 1996.
- [4] Nathan Byron, Olaf Hartig u. a. „GraphQL: Data Query Language“. In: Proceedings of the 2018 World Wide Web Conference. International World Wide Web Conferences Steering Committee, 2018, S. 1451–1460. DOI: 10.1145/3178876.3186005.
- [5] Dirk Merkel. Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment. <https://www.docker.com>. 2014.
- [6] Nils Reimers und Iryna Gurevych. „Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks“. In: Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. 2019, S. 3982–3992. URL: <https://www.sbert.net>.
- [7] Reimers, Nils and Sentence-Transformers contributors. all-MiniLM-L6-v2: Sentence Transformers model. <https://huggingface.co/sentence-transformers/all-MiniLM-L6-v2>. Accessed: 2025-06-25. 2020.
- [8] Qwen Team. Qwen: A Family of Open Large Language Models. <https://huggingface.co/Qwen>. Accessed: 2025-06-25. 2023.
- [9] Mistral AI. Mistral 7B/8B: Open-Weight Language Models. <https://mistral.ai>. Accessed: 2025-06-25. 2023.
- [10] OCRmyPDF contributors. OCRmyPDF: Add an OCR text layer to scanned PDF files. <https://github.com/ocrmypdf/OCRmyPDF>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [11] Jake Poznanski u. a. olmOCR: Unlocking Trillions of Tokens in PDFs with Vision Language Models. 2025. arXiv: 2502.18443 [cs.CL]. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.18443>.
- [12] JaidedAI. EasyOCR: Ready-to-use OCR with 80+ languages. <https://github.com/JaidedAI/EasyOCR>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [13] Nikolaos Livathinos u. a. Docling: An Efficient Open-Source Toolkit for AI-driven Document Conversion. Techn. Ber. 2501.17887. Accessed: 2025-06-25. arXiv, 2025.
- [14] PyMuPDF contributors. PyMuPDF4LLM: Extracting PDF content for LLM and RAG.environments. <https://pymupdf.readthedocs.io/en/latest/pymupdf4llm/>. Accessed: 2025-06-25. 2024.
- [15] Sabrina Kirrane und Axel-Cyrille Ngonga Ngomo. „Modular Ontology Modeling“. In: Semantic Web Journal — (2022), S. —. DOI: 10.3233/SW-222886.

- [16] Mark Jensen u. a. The Common Core Ontologies.  
<https://www.utwente.nl/en/.../jensen-et-al-the-common-core-ontologies.pdf>.  
Accessed: 2025-06-25. 2024.
- [17] Ole Katzenberger. Knowledge Graph Construction Pipeline.  
<https://drive.google.com/file/d/16zVtKHBAJFcIm0G1jy7Ywugj8dWQuwRn/view>.  
Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [18] Neo4j, Inc. Neo4j Graph Database. <https://neo4j.com>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [19] Jerry Liu. LlamaIndex. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.1234.  
URL: [https://github.com/jerryliu/llama\\_index](https://github.com/jerryliu/llama_index).
- [20] LangChain contributors. LangChain: Framework for developing LLM-powered agents.  
<https://www.langchain.com>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [21] Amir Kazemzadeh und Sanjay Gupta. KIKO Platform Overview.  
<https://drive.google.com/file/d/1EeM6fC1zkTSpqW5FxFGXqzaowj6Bodrd/view?usp=sharing>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [22] Amir Kazemzadeh und Sanjay Gupta. KIKO System Architecture Diagram.  
[https://drive.google.com/file/d/1r9P7dRP5\\_Vgt\\_l68-nFG8o625hVp-T4x/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1r9P7dRP5_Vgt_l68-nFG8o625hVp-T4x/view?usp=drive_link). Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [23] Amir Kazemzadeh und Sanjay Gupta. Data Pipeline block diagram.  
<https://drive.google.com/file/d/1vVS6R3Hqd0noc3UgHaOahcx1VoGKvwpi/view?usp=sharing>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [24] Amir Kazemzadeh und Sanjay Gupta. LLMs Pipeline block diagram.  
[https://drive.google.com/file/d/1JAgAZEzgYt3h7YVPo6J9YhG03ufeMahA/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1JAgAZEzgYt3h7YVPo6J9YhG03ufeMahA/view?usp=drive_link). Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [25] Amir Kazemzadeh und Ole Katzenberger und Sanjay Gupta. Class diagram for DB schema.  
<https://drive.google.com/file/d/1DW-ig90gDK93ff9OA979Jar4A5I4Gb/.view?usp=sharing>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [26] Sanjay Gupta. KIKO UI Prototype.  
<https://www.figma.com/proto/ZOBvLJQyulax0M1Z1Utebv/KIKO-UI-Prototype?node-id=2-6>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [27] Ontotext. GraphDB. <https://graphdb.ontotext.com>. Accessed: 2025-06-25. 2025.
- [28] W3C. SHACL: Shapes Constraint Language. <https://www.w3.org/TR/shacl/>. Accessed: 2025-06-25. 2025.

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.03.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9452B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> actimondo eG	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Datenqualität und Community-Management	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2025 bis 29.02.2028	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 179.469,09 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. John Kettler	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> john.kettler@actimondo.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Projekt **KIKO** verfolgt das Ziel, eine KI-gestützte Lern- und Wissensplattform für den Rückbau kerntechnischer Anlagen zu entwickeln. Im Fokus steht die nachhaltige Sicherung und Vermittlung von Fachwissen durch den Einsatz moderner Large Language Models (LLMs). Die Plattform ermöglicht es, Lernprozesse individuell zu begleiten, Wissen bedarfsgerecht bereitzustellen und den Kompetenzaufbau gezielt zu fördern – insbesondere bei Nachwuchskräften, Quereinsteiger:innen und Fachpersonal. KIKO unterstützt so aktiv den Wissenserhalt, die Nachwuchsförderung und die Digitalisierung in einem sicherheitsrelevanten Technologiefeld. **actimondo** verantwortet dabei die Gestaltung der Nutzeroberfläche, die Integration der Inhalte in die Plattform und die Bereitstellung qualitätsgesicherter Daten. Zudem bringt actimondo Erfahrung im digitalen Wissensmanagement, in der Zusammenarbeit mit der Industrie und im Aufbau von Lern- und Community-Formaten ein.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Durchführungskonzept von KIKO sieht eine enge Verzahnung mit den laufenden FORKA-Projekten EducTUM und KISS vor. Gemeinsam wird eine qualitativ hochwertige Datenbasis aufgebaut, die durch Interviews, Lehrmaterialien und öffentlich zugängliche Inhalte gespeist wird. Auf dieser Grundlage werden spezialisierte KI-Modelle entwickelt, die das gesammelte Wissen zugänglich und lernwirksam machen. Die Lernprozesse werden dabei kontinuierlich auf ihre Wirksamkeit überprüft und durch ein Human-Performance-Konzept begleitet.

Das Arbeitsprogramm ist in sieben Module gegliedert:

1. Datenbasis: Aufbau und Kuration hochwertiger Inhalte für die KI-Verarbeitung.
2. LLMs: Entwicklung und Feintuning von Sprachmodellen für den Rückbau-Kontext.
3. Intelligentes Tutoring: Gestaltung adaptiver Lernpfade und Feedbackmechanismen.
4. Wissensspeicher & Agenten: Aufbau digitaler Dozenten auf Basis von Expertenwissen.
5. Klassische KI-Systeme: Integration weiterer Datentypen wie Bilder oder Zeitreihen.
6. Human Performance: Validierung der Lernprozesse mit Nutzertests und EEG-Analysen.
7. Frontend & Nutzerzugang: Entwicklung der interaktiven Plattformoberfläche und Anbindung an den Digital Smart Campus.

Das Konzept ermöglicht eine kontinuierliche Weiterentwicklung und praxisnahe Erprobung der Plattform, um den Kompetenzaufbau im Rückbau nachhaltig zu unterstützen.

Im Rahmen des Durchführungskonzepts übernimmt actimondo zentrale Aufgaben an der Schnittstelle zwischen Technologieentwicklung und Nutzeranwendung. Im Modul 1 ist actimondo

an der Kuration, Prüfung und Aufbereitung der Daten beteiligt und stellt sicher, dass nur qualitativ hochwertige Inhalte in die KI-Systeme einfließen. In Modul 7 verantwortet actimondo die Entwicklung und Integration der Benutzeroberfläche der Lernplattform, einschließlich UI/UX-Design, Nutzerinteraktion mit der KI und Anbindung an den Digital Smart Campus des KISS-Projekts. Darüber hinaus bringt actimondo seine Erfahrung im digitalen Wissensmanagement sowie im Aufbau von Community-Formaten und Lernumgebungen ein, um die Plattform praxisnah, zugänglich und nachhaltig nutzbar zu gestalten.

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

Seit dem offiziellen Projektstart im März wurde das KIKO-Vorhaben strukturell aufgesetzt. Im Rahmen des Kick-off-Termins wurde das Arbeitsprogramm gemeinsam mit allen Verbundpartnern bestätigt, präzisiert und abgestimmt. Parallel dazu wurde das Projektteam verstärkt und mit den ersten operativen Arbeitsschritten begonnen.

Ein Schwerpunkt lag auf der Recherche zum Design des Wissenspools, der in enger Abstimmung mit dem KISS-Projekt konzipiert wurde. Dabei wurde das ursprüngliche Konzept überarbeitet und angepasst, um eine möglichst enge technische und inhaltliche Verzahnung mit dem Digital Smart Campus zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang wurde ein erster Testlauf mit einer möglichen Datenbankstruktur – voraussichtlich auf Basis von Graph-RAG – durchgeführt, um die Eignung für den späteren Einsatz im KI-gestützten Lernsystem zu evaluieren. Diese Vorarbeiten schaffen die Grundlage für die Umsetzung der Datenpipeline (Modul 1) sowie die Integration in das KI-System.

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

In den kommenden Monaten liegt der Fokus auf der Umsetzung der ersten Meilensteine. Gemeinsam mit den Verbundpartnern wird ein erster Demonstrator entwickelt, der die Funktionalität der KI-gestützten Plattform exemplarisch abbildet. Zentrale Aufgabe ist dabei der Aufbau des initialen Wissenspools: Dafür werden relevante Inhalte identifiziert, mit Unterstützung assoziierter Partner wie der GRS gesichert, qualitätsgeprüft und in geeigneten Formaten aufbereitet. Die gewonnenen Trainingsdaten bilden die Basis für das spätere Feintuning der Sprachmodelle.

Parallel dazu erfolgt die technische Umsetzung des Frontends, das die Interaktion zwischen Anwender:innen und den KI-Komponenten ermöglicht. Ziel ist es, bereits in der ersten Projektphase zentrale Anwendungsfälle wie themenspezifische Abfragen, Feedback-Interaktion und einfache Lernpfade prototypisch zu realisieren. Die enge Abstimmung mit KISS und EducTUM wird fortgeführt, um die Anschlussfähigkeit und spätere Integration der Systeme sicherzustellen.

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

Wie im ursprünglichen Projektantrag vorgesehen, besteht ein enger fachlicher und konzeptioneller Austausch mit den parallelaufenden FORKA-Vorhaben EducTUM und KISS. Die Abstimmung betrifft insbesondere den Aufbau gemeinsamer Wissenspools, die Nutzung des Digital Smart Campus sowie die Verzahnung von Inhalten und Technologien.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.03.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9452C
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Intelligentes Tutoring und Human Performances (KIKO)	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.03.2025.bis 29.02.2028	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 343.814,16 €
<b>Projektleiter:</b> Dr. Thomas Bücherl	<b>E-Mail-Adresse des Projektleiters:</b> Thomas.buecherl@tum.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Vorhaben KIKO, ein Verbundprojekt der FH Südwestfalen, der actimondo eG und der TU München, hat die Aus-, Fort- und Weiterbildung von Fachkräften sowie die Wissensvermittlung und –konservierung mittels Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) im Rahmen einer zu entwickelnden interaktiven Wissens- und Kompetenzplattform zum Ziel. Es adressiert insbesondere den Kompetenzerhalt und die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, indem es mittels KI-Algorithmen effektiv Wissen aus dem Bereich der Stilllegung kerntechnischer Anlagen über natürlichsprachliche Interfaces bereitstellt und so an Interessierte weitervermittelt. Hierfür werden aktuelle Entwicklungen im Bereich der KI, speziell der Large Language Models (LLM), genutzt und diese entsprechend angepasst. Hierdurch sollen auf Grundlage eines umfangreichen und aktuell gehaltenen Datenpools die allgemeinen und spezifischen Informationen individuell am Bedarf der Anwender orientiert vermittelt werden.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Vorhaben ist in sieben Module unterteilt. Hiervon bearbeitet die TU München hauptsächlich die Module

- Modul 3: „Intelligentes Tutoring“ und
- Modul 6: „Human Performances“

Im Rahmen von Modul 3 werden Lehrpläne und Lehrprozesse definiert, um Personen mit heterogenem Hintergrund in die Lage zu setzen, sich ein Thema anzueignen. Darauf aufbauend wird die interaktive virtuelle Lernplattform inklusive Feedbackmechanismus für Anwender durch den Projektpartner FH SWF entwickelt. In Modul 6 erfolgt die Entwicklung eines Wissensaneignungs- bzw. Lernkonzepts. Dieses basiert auf einem sechsstufigen Prozessaufbau, der die folgenden Punkte berücksichtigt:

- Methoden zur korrekten Einschätzung des Wissensstandes des Anwenders durch LLMs,
- Methoden zur Generierung der erforderlichen Informationen,
- anzuwendende Methodik der Wissensvermittlung
- Beantwortung von Anwenderfrage und ggf. Anpassung der Methodik durch KI
- Überprüfung des Lernerfolgs des Anwenders durch KI
- Speicherung der Daten für spätere Wiederaufnahme des Lernprozesses.

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

Die ersten vier Monate des Vorhabens waren im Wesentlichen durch administrative Arbeiten und die Abstimmung mit den Vorhabenpartnern bestimmt. Die administrative Seite betraf die Erstellung der Kooperationsvereinbarung und das Agreement for Associated Partners sowie die Stellenausschreibungen und den daraus resultierenden Interviews. In einem hybriden Kickoff-Meeting aller Vorhabenpartner wurde der Status Quo der einzelnen Partner vorgestellt, die Möglichkeiten zur Durchführung von Laborexperimenten mittels Elektroenzephalographie (EEG) zur Überprüfung von Lernerfolgen bei Nutzung der KI diskutiert sowie die generelle Roadmap festgelegt.

Die weiteren Arbeiten bezogen sich auf Beiträge zum Modul 6 (Human Performances). Aus dem laufenden Vorhaben EducTUM (Förderkennzeichen 15S9443) wurden dort erarbeitete Lerninhalte aus dem Bereich „segmentiertes Gamma-Scanning (SGS)“ extrahiert und als experimentelle Lernbasis für die beim Vorhabenpartner FHSW in Entwicklung befindliche KI übermittelt. Neben der Nutzung von Wissen (Daten, in diesem Fall von Texten) für die Entwicklung der KI sollten hierdurch auch erste Rahmenbedingungen für die Art der Wissensbereitstellung durch RCM und andere ermittelt werden, d. h. Informationen bezüglich des Umfangs, des Formats, der Gliederung etc. gewonnen werden.

Für die Demonstration der prinzipiellen Nutzbarkeit einer KI-basierten Wissensplattform Ende des Jahres einigten sich die Vorhabenpartner auf den Themenbereich Strahlenschutz. Mögliche Wissenspools hierzu (d. h Lehrpläne) wurden hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert.

In weiteren (virtuellen) Treffen wurde auch die geplante Durchführung von Laborexperimenten mittels Elektroenzephalographie (EEG) zur Überprüfung von Lernerfolgen bei Nutzung der KI diskutiert.

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

Die Arbeiten für das zweite Halbjahr 2025 werden sich auf die Erarbeitung der Lehrpläne zum Thema Strahlenschutz und die erforderlichen Lehrprozesse fokussieren (Modul 3 und 6) mit dem Ziel, die für den Demonstrator erforderlichen Informationen bereitzustellen.

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

keiner

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

keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.02.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9453A
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> <b>Fachhochschule Südwestfalen</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung einer KI-gestützten Applikation für automatisierte Lizenziierungprozesse	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 02/2025 bis 01/2028	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 1.127.176,94€
<b>Projektleiter/-in:</b> Prof. Dr. Thomas Kopinski	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> kopinski.thomas@fh-swf.de

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen bringt in vielerlei Hinsicht Herausforderungen mit sich, die beim Bau oder Betrieb der jeweiligen Anlage häufig eine untergeordnete Rolle gespielt haben. In der Regel stehen dabei technische Aspekte im Vordergrund, jedoch können in Anlagen, die keine Kernkraftwerke sind, auch ganz andere Probleme, beispielsweise administrative Themen, relevant werden. So stellen zunehmend Regelwerksanforderungen und rechtliche Aspekte in der aufsichtlichen Überwachung der Betriebsgenehmigung beim Rückbau ein Problem dar, da diese Anforderungen auf Kernkraftwerke zugeschnitten sind und nicht direkt auf den Rückbau sonstiger Anlagen übertragbar sind.

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer KI-gestützten Software zur Beschleunigung von Antrags-, Arbeits- und Genehmigungsprozessen im Kontext des Rückbaus am Beispiel des Radiochemischen Labors (Bau 34) der Framatome GmbH.

Die Software ist in der Lage, Stakeholder bei der Erstellung von nicht-wesentlichen Änderungen zu unterstützen. Sie erkennt insbesondere Widersprüche und Fehler in der Antragstellung basierend auf eingepflegten Datensätzen, unterbreitet Vorschläge und optimiert die innerbetriebliche Kommunikation, Abstimmung und Entscheidungsfindung.

Darüber hinaus findet eine Wissenskonservierung in der Software statt, so dass Erfahrungen zurückliegender Maßnahmen und das Wissen fachkundiger Experten bei deren Austreten aus der Organisation in KI-Modellen innerhalb der Software manifestiert und Wissensabfluss vorgebeugt werden kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm umfasst 5 themenspezifische Module sowie eine projektspezifische KI-Server-Inbetriebnahme/-Instandhaltung.

(Verweis auf Framatome Zwischenbericht)

Module	2025				M1	2026				M2	2027				2028	M3	
	Q1	Q2	Q3	Q4		Q1	Q2	Q3	Q4		Q1	Q2	Q3	Q4			
M1: Datenaufnahme																	
M1: Datenqualität																	
M1: Datenanreicherung																	
M2: LLM Integration																	
M2: LLM Feintuning																	
M2: RAG Indexing																	
M2: Prompt Engineering																	
M3: KI Sicherheitsmodellierung																	
M3: KI Sicherheitsschirm																	
M4: Autonome KI Systeme																	
M4: Redundanzfilterung																	
M4: Autonomous Dokumentensupport																	
M5: Softwareentwicklung Backend																	
M5: Softwareentwicklung Frontend																	

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

#### Modul 1: Datenbasis (Framatome GmbH & FH Südwestfalen)

##### Einsatz von GraphRAG

GraphRAG erweitert den Ansatz der Retrieval-Augmented Generation (RAG) durch die Einbindung strukturierter Wissensrepräsentationen in Form von Knowledge Graphs. Ziel ist es, die Faktentreue und Nachvollziehbarkeit von Antworten großer Sprachmodelle (LLMs) signifikant zu erhöhen.

Die Integration des Knowledge Graphs ermöglicht es, gezielt relevante Entitäten und Relationen abzurufen, anstatt ausschließlich auf unstrukturierte Textquellen zurückzugreifen. Eine zentrale Rolle übernehmen dabei Ontologien. Sie definieren die zulässigen Entitäten, Relationen und Eigenschaften, stellen eine konsistente und semantisch präzise Struktur des Graphen sicher und ermöglichen, mithilfe von LLMs aus unstrukturierten Textdaten robuste und inhaltlich konsistente Graphen zu konstruieren. Im Projektkontext wurden hierfür spezifische Ontologien entwickelt, die die Domänenanforderungen präzise abbilden und so eine passgenaue Wissensintegration unterstützen.

Damit bietet GraphRAG einen systematischen Ansatz, die Qualität von LLM-basierten Antworten durch strukturierte Wissensintegration nachhaltig zu verbessern.

Es wurde eine auf Basis von Framatome spezifische Ontologie gebaut und implementiert, die mittels Knowledge Graphs das Information Retrieval der LLMs verbessern soll.

Ein domänenspezifischer Wissensgraph wird als strukturierte Grundlage für ein GraphRAG-System entwickelt. Die Grundlage bildet eine modulare Ontologie, die mit dem Ansatz des Modular Ontology Modeling (MOMo) erstellt wurde. Um übergeordnete Konzepte abzudecken, wurde die Common Core Ontology (CCO) ausgewählt und erweitert. Das resultierende Modell wird mithilfe eines Pydantic-Konverters in ausführbaren Python-Code konvertiert.

Basierend auf dieser Struktur extrahieren LLMs Informationen aus den unstrukturierten PDFs. Die Ontologie liefert das Schema zur Formalisierung dieser Inhalte in einem Wissensgraphen mit definierten Entitäten und Beziehungen. Open-Source-Frameworks wie Neo4j, LlamaIndex und LangChain werden auf ihre Eignung für die Vorverarbeitung, Extraktion und Nachverarbeitung evaluiert.

Eine modulare Pipeline wurde eingerichtet, um die Erstellung, Konvertierung, LLM-basierte Extraktion und Evaluierung der Ontologie abzudecken. Während die Pipeline vorhanden ist, wird die Rahmenbewertung fortgesetzt und die Ontologieentwicklung iterativ fortgesetzt.

### **Modul 2: Large Language Models (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)**

Im Projektverlauf wurden mehrere technische Erweiterungen umgesetzt, die die Effizienz und Robustheit der Verarbeitung deutlich verbessert haben. Das Konfigurationssystem wurde durch eine zentrale AppConfig-Klasse vereinheitlicht, wodurch Hyperparameter-Tests deutlich reibungsloser ablaufen. Für das Pfad- und Cache-Management wurde ein Hash-System für die FAISS-Indizes eingeführt, das Cold-Starts um rund 33 Prozent beschleunigt.

Die OCR-Lösung wurde so erweitert, dass je nach Dokumenttyp adaptiv zwischen Tesseract, EasyOCR und PaddleOCR gewählt wird. Parallel dazu ermöglicht PyMuPDF eine zuverlässige Extraktion von Metadaten wie Titel, Autoren und Inhaltsverzeichnis, selbst bei inkonsistenten Dokumentenstrukturen. Zur Entlastung der Speicherressourcen wird die Verarbeitung großer PDFs blockweise im Streaming-Modus durchgeführt, was insbesondere bei umfangreichen Bänden mit mehr als 500 Seiten den Arbeitsspeicher erheblich schont.

Für die Tabellenverarbeitung wurde eine spezialisierte Pipeline entwickelt: Mithilfe von OpenCV werden Liniensstrukturen erkannt, die tabellarischen Inhalte anschließend zellweise per OCR erfasst und schließlich als ASCII-Tabellen exportiert. Zudem wurde eine VLM-Integration umgesetzt, bei der Modelle wie Donut und TrOCR insbesondere für die Erkennung von Formeln eingesetzt werden. Dadurch konnte die Informationsdichte der Ergebnisse um etwa 14 Prozent gesteigert werden.

Abschließend wurde der Vector Store mit FAISS und LangChain optimiert. Mit einem MAP@5-Wert von rund 0,88 erreicht das System eine hohe Präzision bei der Informationswiedergewinnung.

### **Modul 3: KI-Sicherheit und kausale Modellierung (Schwerpunkt: Framatome GmbH)**

Um sichere und transparente KI-Entscheidungen zu gewährleisten, werden KI-Systeme entwickelt, die interpretierbar und deren Entscheidungen quantifizierbar sind. Kausale KI-Modelle, die hier entwickelt werden, erlauben die Funktionalität, Entscheidungen zurückzuführen, und somit eine Interpretation dieser zu erhalten.

### **Modul 4: Autonome Agentensysteme (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)**

Im Rahmen der Arbeiten wurde das im ICECER-Paper vorgestellte *AgentFusion*-Konzept auf Alisa34 übertragen und weiterentwickelt. Das Grundprinzip umfasst drei spezialisierte Agentenrollen:

1. **Retrieval-Agent** – Identifiziert und extrahiert relevante Informationen.
2. **Optimization-Agent** – Optimierte Prompts sowie die Größe der Textsegmente (Chunks).
3. **Validation-Agent** – Bewertet die Qualität und Plausibilität der Ergebnisse.

Für Alisa34 erfolgte eine gezielte Adaption mit Fokus auf Dokumentendestillation anstelle von Texterzeugung:

- Der **Retrieval-Agent** nutzt eine Vektorsuche basierend auf *FAISS* in Kombination mit dem *mpnet*-Modell.
- Der **Optimization-Agent** steuert die Chunk-Größe. Nach umfangreichen Experimenten (Trial-and-Error über mehrere Wochen) zeigte sich eine optimale Größe von ca. 800 Tokens, insbesondere für Dekommissionierungsberichte.
- Der **Validation-Agent** kombiniert eigens entwickelte Heuristiken mit Rouge-Metriken, um die Ergebnisqualität zuverlässig abzusichern.

Die im Originalpaper berichtete Genauigkeit von **92 %** konnte mit unserem Benchmark erfolgreich repliziert werden – trotz der stark heterogenen Dokumentlayouts. Dieses Ergebnis bestätigt die Übertragbarkeit und Robustheit des Ansatzes in der praktischen Anwendung.

### **Modul 5: Softwareentwicklung (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)**

In Modul 5 wird eine Software entwickelt, bestehend aus Backend (alles, was im Hintergrund zum Betreiben der Software erforderlich ist) und Frontend (alle Komponenten zur Interaktion mit Daten, KIs, sonstigen Elementen im Backend). Sie ermöglicht die Umsetzung der in den Modulen 1-4 beschriebenen KI-Systeme und Datensysteme.

Die entwickelte Systempipeline verarbeitet eingehende Daten in mehreren aufeinander abgestimmten Schritten. Im Ingestion-Layer werden zunächst PDFs und Bilder entgegengenommen. Anschließend erkennt der Pre-Processor den jeweiligen Dokumenttyp und extrahiert die relevanten Metadaten. Darauf folgt die Routing-Unit, die OCR- und VLM-Jobs je nach Anforderung gezielt verteilt.

Im nächsten Schritt übernimmt der Chunker die Zerlegung der Texte. Derzeit erfolgt dies noch statisch, perspektivisch ist jedoch eine dynamische Segmentierung vorgesehen. Der Embedding-Service generiert anschließend Vektoren, die in *FAISS* abgelegt werden. Für die Informationsabfrage kombiniert der Retrieval-Agent verschiedene Filtermechanismen mit Dense Search, bevor schließlich der Validation-Agent die Konsistenz der Ergebnisse überprüft.

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

Die aktuellen Pläne für Q3 und Q4 des Jahres konzentrieren sich auf die Entwicklung eines integrierten, funktionierenden Alpha-Produkts, mit dem die ersten, internen Benutzertests durchgeführt werden können. Dieser erste Prototyp soll den Test-Benutzern durch die Erforschung der Wissensdatenbank und das kollaborative Schreiben über die Graph-RAG-Anwendung bereits erste Arbeitsoptimierungen ermöglichen.

Dazu muss das derzeit getrennte OG-KG-Modul und das RAG-Modul vereint werden, wobei die RAG-Module gleichzeitig in ein Graph-RAG-Modul umgewandelt werden. Dies muss auch auf dem AI-Server konfiguriert und gehostet werden. Tatsächlich wird das Alpha-Produkt auch die von-Grund-auf Entwicklung einer Frontend-Schnittstelle erfordern, sowie die Entwicklung des Backend-Service. Auch auf der Roadmap ist die erste Iteration von GRAIL. Das Ziel wäre hier die automatische Welt/Kausale Modellkonstruktion und die Erkennung der "einfach zu erledigenden Aufgaben" mit klassischen Graphmethoden, wie etwa kreisförmigen Abhängigkeiten.

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

Keiner.

## 6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

<b>Berichtszeitraum:</b> 01.02.2025 bis 30.06.2025	<b>Förderkennzeichen:</b> 15S9453B
<b>Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:</b> <b>Framatome GmbH</b>	
<b>Vorhabenbezeichnung:</b> VP: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung von KI-Sicherheitskomponenten für auditierbare KI-Modelle	
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 02/2025 bis 01/2028	<b>Gesamtförderbetrag des Vorhabens:</b> 555.949,54 €
<b>Projektleiter/-in:</b> Dr. Alexander Baumann	<b>E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in:</b> alexander.baumann@framatome.com

## 1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Rückbau kerntechnischer Anlagen bringt in vielerlei Hinsicht Herausforderungen mit sich, die beim Bau oder Betrieb der jeweiligen Anlage häufig eine untergeordnete Rolle gespielt haben. In der Regel stehen dabei technische Aspekte im Vordergrund, jedoch können in Anlagen, die keine Kernkraftwerke sind, auch ganz andere Probleme, beispielsweise administrative Themen, relevant werden. So stellen zunehmend Regelwerksanforderungen und rechtliche Aspekte in der aufsichtlichen Überwachung der Betriebsgenehmigung beim Rückbau ein Problem dar, da diese Anforderungen auf Kernkraftwerke zugeschnitten sind und nicht direkt auf den Rückbau sonstiger Anlagen übertragbar sind.

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer KI-gestützten Software zur Beschleunigung von Antrags-, Arbeits- und Genehmigungsprozessen im Kontext des Rückbaus am Beispiel des Radiochemischen Labors (Bau 34) der Framatome GmbH.

Die Software ist in der Lage, Stakeholder bei der Erstellung von nicht-wesentlichen Änderungen zu unterstützen. Sie erkennt insbesondere Widersprüche und Fehler in der Antragstellung basierend auf eingepflegten Datensätzen, unterbreitet Vorschläge und optimiert die innerbetriebliche Kommunikation, Abstimmung und Entscheidungsfindung.

Darüber hinaus findet eine Wissenskonservierung in der Software statt, so dass Erfahrungen zurückliegender Maßnahmen und das Wissen fachkundiger Experten bei deren Austreten aus der Organisation in KI-Modellen innerhalb der Software manifestiert und Wissensabfluss vorgebeugt werden kann.

## 2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm umfasst 5 themenspezifische Module sowie eine projektspezifische KI-Server-Inbetriebnahme/-Instandhaltung.

Im Rahmen des Projektes wird ein dedizierter KI-Server mit aktuellen Tensor GPUs in die bestehende IT-Infrastruktur der Framatome GmbH eingebunden. Hierbei muss die Integration entsprechend den hohen Sicherheitsanforderungen der Framatome IT-Security erfolgen. Aufgrund der projektgebundenen Exklusivnutzung des KI-Servers wird die Inbetriebnahme sowie die Instandhaltung durch die IT der Framatome GmbH während des gesamten Projektes gesondert betreut. Zusätzlich ist eine Zurverfügungstellung von Framatome Notebooks für den sicheren Zugriff auf die IT-Infrastruktur (Entwicklungsumgebung, DevOps Tools etc.) durch den Verbundpartner FH Südwestfalen geplant. Die zur Verfügung gestellten Notebooks werden projektbegleitend von der Framatome GmbH betreut.

## Modul 1: Datenbasis (Framatome GmbH & FH Südwestfalen)

In Modul 1 wird für die Grundlage aller funktionierenden KI-Systeme, die Datenbasis, gesorgt. Das Fundament bilden zwei zentrale Komponenten: relevante Textdokumente und Prozesswissen. Die siloartige Datenhaltung der Gesetze, Verordnungen, Normen und Richt- und Leitlinien wird aufgebrochen, um die Dokumente in Datenbanken, die aufgesetzt werden, zusammenzuführen.

## Modul 2: Large Language Models (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)

Ziel von Modul 2 ist die Entwicklung eines Chatbots, der, basierend auf den Daten aus Modul 1, als allwissender Assistent agiert und die Fragen der Stakeholder beantwortet.

## Modul 3: KI-Sicherheit und kausale Modellierung (Schwerpunkt: Framatome GmbH)

Um sichere und transparente KI-Entscheidungen zu gewährleisten, werden KI-Systeme entwickelt, die interpretierbar und deren Entscheidungen quantifizierbar sind. Kausale KI-Modelle, die hier entwickelt werden, erlauben die Funktionalität, Entscheidungen zurückzuführen, und somit eine Interpretation dieser zu erhalten.

## Modul 4: Autonome Agentensysteme (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)

In Modul 4 werden Autonome KI-Agenten entwickelt, die es erlauben, Prozesse direkt zu beschleunigen. Autonome KI-Systeme werden so programmiert, dass sie in der Lage sind, eigenständig Teilprozesse zu planen.

## Modul 5: Softwareentwicklung (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)

In Modul 5 wird eine Software entwickelt, bestehend aus Backend (alles, was im Hintergrund zum Betreiben der Software erforderlich ist) und Frontend (alle Komponenten zur Interaktion mit Daten, KIs, sonstigen Elementen im Backend). Sie ermöglicht die Umsetzung der in den Modulen 1-4 beschriebenen KI-Systeme und Datensysteme.

Module	2025				M1	2026				M2	2027				M3	2028
	Q1	Q2	Q3	Q4		Q1	Q2	Q3	Q4		Q1	Q2	Q3	Q4		
M1: Datenaufnahme	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M1: Datenqualität	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M1: Datenanreicherung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M2: LLM Integration	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M2: LLM Feintuning	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M2: RAG Indexing	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M2: Prompt Engineering	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M3: KI Sicherheitsmodellierung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M3: KI Sicherheitsschirm	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M4: Autonome KI Systeme	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M4: Redundanzfilterung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M4: Autonomous Dokumentensupport	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M5: Softwareentwicklung Backend	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
M5: Softwareentwicklung Frontend	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

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

Der dedizierter KI-Server wurde erfolgreich in die Framatome IT Infrastruktur eingebunden und in Betrieb genommen. Framatome Workstations wurden dem Verbundpartner FH Südwestfalen übergeben. Die Framatome-interne Entwicklungsumgebung wurde eingerichtet und wird kontinuierlich an die Bedürfnisse des Projektes angepasst.

Zu Beginn des Projektes wurden Kompetenzfragen von Experten gesammelt, um die Ontologie zu konstruieren. Eine Ontologie definiert, welche Arten von Entitäten in einem Wissensgraphen existieren werden und welche Arten von Beziehungen sie zueinander haben können. Kompetenzfragen zielen darauf ab, Experten fachspezifische Fragen zu stellen, um die Ontologie-Konstruktion zu unterstützen. Es wurde zudem mit Ontologieexperten diskutiert, um sicherzustellen, dass die Informationen bestmöglich genutzt werden.

Der Ontology Graph (OG) ist das Framework, mit dem wir dann unseren Knowledge Graph (KG) erstellen, um unsere Daten zu destillieren und zu strukturieren. Es wurde ein erster, funktionierender Prototyp für das OG-KG System generiert. Die KG wird dann das Rückgrat der Graph-RAG Applikation und des GRAIL Moduls bilden.

Das Modul Graph Reasoning from AI Learning (GRAIL) wurde ebenfalls neu geprägt. Dies erfordert keine Umstrukturierung der etablierten Module 1-5, sondern ist im Grunde ein Name für das System oder die Gruppe von Systemen, die

- 1) klassische und maschinelle Lernmethoden/KI verwenden, um die KG für verschiedene Funktionen zu analysieren, wie z. B. Kennzeichnen von zirkulären Abhängigkeiten, problematische Anwendungen, und andere logische Probleme,
- 2) unsere Datenbank von AI-generierten Weltmodellen erstellen und speichern und
- 3) das AI-Lernprotokoll zur iterativen Verbesserung unseres AI-Agentensicherheitssystems implementieren.

In Bezug auf die definierten Module 1-5 kann man GRAIL als Kapselung der Module 3 & 4 sehen. Darüber hinaus wurde auch eine RAG-Anwendung entwickelt, die mit einer hochgradigen Inhaltsquellindizierung und optischen Zeichenerkennungsfunktionen (OCR) aufwartet. Benutzer können Dokumente hochladen und mit einem LLM deren Inhalte abfragen. Die App beantwortet nicht nur Anfragen mit Dokumentendetails, sondern gibt auch Schnapschüsse der Inhaltsquelle und eine Vertrauenswürdigkeitseinstufung aus.

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

Die aktuellen Pläne für Q3 und Q4 des Jahres konzentrieren sich auf die Entwicklung eines integrierten, funktionierenden Alpha-Produkts, mit dem die ersten, internen Benutzertests durchgeführt werden können. Dieser erste Prototyp soll den Test-Benutzern durch die Erforschung der Wissensdatenbank und das kollaborative Schreiben über die Graph-RAG-Anwendung bereits erste Arbeitsoptimierungen ermöglichen.

Dazu muss das derzeit getrennte OG-KG-Modul und das RAG-Modul vereint werden, wobei die RAG-Module gleichzeitig in ein Graph-RAG-Modul umgewandelt werden. Dies muss auch auf dem AI-Server konfiguriert und gehostet werden. Tatsächlich wird das Alpha-Produkt auch die von-Grund-auf Entwicklung einer Frontend-Schnittstelle erfordern, sowie die Entwicklung des Backend-Service. Auch auf der Roadmap ist die erste Iteration von GRAIL. Das Ziel wäre hier die automatische Welt/Kausale Modellkonstruktion und die Erkennung der "einfach zu erledigenden Aufgaben" mit klassischen Graphmethoden, wie etwa kreisförmigen Abhängigkeiten.

**5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Keiner.

**6. Berichte und Veröffentlichungen**

Keine.

**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)