

Fortschrittsbericht

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

Berichtszeitraum

1. Juli - 31. Dezember 2025

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Fortschrittsbericht

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

Berichtszeitraum
1. Juli - 31. Dezember 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.

Förderkenn- zeichen	Themenbereich	Seite
01.	Zerlege- und Dekontaminationsverfahren	
15S9439A	VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Prototypbau einer autonomen Anlage zur Dekontamination und radiologischen Messung	9
15S9439B	VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Autonome Laserablation und radiologische Vormessung	13
15S9440A	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekonta- mination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster	18
15S9440B	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekonta- mination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Durchführung experimenteller Versuche und Auswertung der Versuchsmuster	21
15S9440C	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekonta- mination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Detaillierung und Ausgestaltung der Versuchsmuster samt Einhausung mit Absaugung	24
15S9440D	VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekonta- mination in kerntechnischen Anlagen (EKont-2) TP: Praxisversuche und Verifizierung	28
15S9449A	VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Prozessautomatisierung	31
15S9449B	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	34
15S9449C	VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Inverterstromquelle"	37
15S9450A	VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung eines Laserablationsprozesses zur effektiven Zerstörung von Oberflächenschichten	40
15S9450B	VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung eines Demonstrators zur Laserablation	42
15S9458A	VP: Maßstabsvergrößerung und Optimierung eines Verfahrens zur Dekontamination von Beton aus kerntechnischen Anlagen mit Erprobung im Kontrollbereich eines KKW zur Verminderung des endzulagernden Anteils (BedeKon-2) TP: Upscaling und Optimierung des elektrochemischen Recyclings der flüssigen Prozessmedien	44
15S9458B	VP: Maßstabsvergrößerung und Optimierung eines Verfahrens zur Dekontamination von Beton aus kerntechnischen Anlagen mit Erprobung im Kontrollbereich eines KKW zur Verminderung des endzulagernden Anteils (BedeKon-2) TP: Upscaling und Optimierung des Betonaufschlusses mittels Schockwellentechnologie	46
15S9458C	VP: Maßstabsvergrößerung und Optimierung eines Verfahrens zur Dekontamination von Beton aus kerntechnischen Anlagen mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung einschließlich Kreislaufführung des Prozesswassers und Erprobung im Kontrollbereich eines KKW (BedeKon-2) TP: Standortlogistik, Genehmigungen und Strahlenschutz	48

02. Freigabeverfahren und konventionelle Entsorgungswege

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 qualitätsgesicherten 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 Ausbaupopf für Rohrleitungen in nicht zugänglichen Bereichen	53
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 Neutronenflussrechnungen 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	71
15S9455A	VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Weiterentwicklung und Optimierung vorhandener Detektionssysteme	76
15S9455B	VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Erprobung und Einsatz der Detektionssysteme in kerntechnischen Anlagen	79
15S9455C	VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Entwicklung eines neuen Detektionssystems mit verbesserten Eigenschaften	82
15S9455D	VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Softwareentwicklung der Detektionssysteme	85
15S9455E	VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Systematische Tests der Detektionssysteme	88
15S9456A	VP: Visualisierung von Gebäudestrukturen für die Freimessung und genaue Positionsbestimmung des Messgeräts in der Gebäudefreigabe (ViMPoG) TP: Erfassung und Visualisierung von Gebäudestrukturen und Störstellen für die Freimessung und genaue Positionsbestimmung des Messgeräts in der Gebäudefreigabe	91

		Seite
15S9456B	VP: Visualisierung von Gebäudestrukturen für die Freimessung und genaue Positionsbestimmung des Messgeräts in der Gebäudefreigabe (ViMPoG) TP: Ansätze zur Optimierung der Messgeometrien für eine effiziente Freimessung unter Berücksichtigung von Störstellen und Entwicklung eines Prozesses für eine digital unterstützte Gebäudefreigabe	94
03.	Behandlung radioaktiver Abfälle	
15S9442	Charakterisierung und Dekontamination von i-Grafiten (i-GraDe)	97
04	Abfalldeklaration und Zwischenlagerung	
15S9443	Aus- und Weiterbildung sowie Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen und Abfallprodukten aus Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen (EducTUM)	100
15S9446A	VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Konzeption, Bau des Demonstrators und Durchführung von Test- und Praxisphase	104
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	107
15S9446C	VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Planung und Projektberatung, sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik	110
05.	Umwelt- und Strahlenschutz	
15S9437A	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Einfluss von natürlichen nanopartikulären Phasen auf die Radionuklidverteilung im Wirkungsgefüge Boden-Pflanze	113
15S9437B	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Remobilisierung von Radionukliden [..], Charakterisierung mikrobieller Diversität im Boden und die Beeinflussung durch Radionuklide und Wurzelexsudate	116
15S9437C	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Einfluss der Bodenmikrobiologie auf den RN-Transfer und Verifizierung von Aufnahmemechanismen für RN in Pflanzen	119
15S9437D	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Radioökologische Modellierung	122
15S9437E	VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Geochemische Modellierung der in den Teilprojekten A und B untersuchten Systeme	125
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	127
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	130

		Seite
15S9445C	VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Wirtschaftliche Begleitung und Bewertung	132
15S9454A	VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse - Technische Entwicklung (ReNATE) TP: Tomographie von Desorptionsreaktionen: Positronen-Emissions-Tomographie für die Quantifizierung der Remediation kontaminierter Materialien	134
15S9454B	VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse: Technische Entwicklung (ReNATE) TP: Upscaling der Phytoremediation	136
15S9454C	VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse (ReNATE) TP: Technische Entwicklung	138
15S9454D	VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse: Technische Entwicklung (ReNATE) TP: Freilandversuche und Radiometrische Analysen	140
06.	Mensch und Organisation	
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	142
15S9448B	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	146
15S9448C	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Plattform ink1. KI-gestützter Prozessführung und Schulungsinhalte für sicherheitssensitive Genehmigungsverfahren	148
15S9448D	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Safeguards sowie Partitioning	154
15S9448E	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Kapazitätsaufbau durch virtuell erweitertes Training und Entwicklung einer Wissensgemeinschaft	156
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	161
15S9448G	VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Transformation im Strahlenschutz: Effizienzsteigerung durch int. Softwarelösungen	164
15S9452A	VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: KI-Entwicklung und Modellierung	167
15S9452B	VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Datenqualität und Community-Management	174
15S9452C	VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Intelligentes Tutoring und Human Performances	177

		Seite
15S9453A	VP: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung einer KI-gestützten Applikation für automatisierte Lizenzierungsprozesse	180
15S9453B	VP: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung von KI-Sicherheitskomponenten für auditable KI-Modelle	188

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9439A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: RWE Nuclear GmbH, RWE Platz 2, 45141 Essen		
Vorhabenbezeichnung: VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Prototypbau einer autonomen Anlage zur Dekontamination und radiologischen Messung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2023 bis 30.06.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 361.573,90€
Projektleiter/-in: Dipl.-Ing. Thomas Schubert		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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.

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 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 Arbeitsprogramm Punkten)

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

Die im Berichtszeitraum laufenden Arbeiten zum AP1 betrafen die Erweiterung des Projektes mit einem Fördersystem, das die mit Bauteilen bestückten Projektträgerplatten vollautomatisch der Bauteildekontamination und radiologischen Messung zuführen kann, mit dem Ziel, die Roboterlastung zu verbessern und den Bedienaufwand zu reduzieren. Die mechanische Fertigung beim Hersteller wurde nahezu abgeschlossen (s. Abbildung 1 und 2).

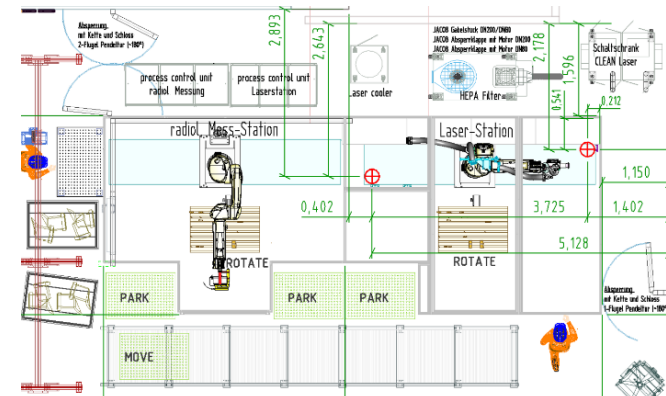


Abbildung 2: Planung des Fördersystems nach Anforderungsanalyse



Abbildung 1: Stand der mechanischen Fertigung

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

Seitens RWE wurde gemeinsam mit dem IGD die Laserscannertechnik konzipiert, insbesondere die Gehäuseform und das Kühlkonzept entwickelt. Ein Baumuster wurde als Prototyp 3D-gedruckt, optimiert und wird in Kürze in Betrieb genommen werden können. Die Fertigung des Adapters für den Laserscanners am Roboterarm wurde abgeschlossen.

AP3 – Laserdekontamination

Die Laseranlage wurde in Betrieb genommen und mit Tests der Anlage an Musterbauteilen begonnen. Am Fraunhofer IGD wurden gemeinsame Versuche zur optimalen Montage der Energiekette am Roboterarm und zur Anfertigung geeigneter Führungs- und Befestigungspunkte durchgeführt. Die Tests waren sehr vielversprechend, so dass geplant ist, das erarbeitete Konzept auf die Prototypanlage am Standort Biblis mit den gleichen Elementen zu übertragen. Die Absaugung für den Laserrauch wurde lokal am Laserwerkzeug und auch oberhalb des Laserarbeitsbereichs an der Kabinendecke verbaut und getestet. Die Abluftführung wurde über eine Filterstrecke direkt nach außen verlegt.

AP4 – Vormessung (Orientierungsmessung)

Die Sonden werden gegenwärtig einer Eingangsprüfung unterzogen. Es wurden verschiedene Entwürfe für die Adaptierung der Messsonden am Roboterarm geplant und in der virtuellen Simulationsumgebung getestet.

AP5 – Integration und Evaluation

Die Integration der Hauptkomponenten zu einer Gesamtanlage ist erfolgt. Zum Abschluss des Berichtszeitraumes wurde an der Feinabstimmung der Steuerungstechnik und am Prozessablauf gearbeitet, ferner an der Integration der der Zählrohre für den Messroboter.

AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

Im Vordergrund standen der finale Aufbau der Roboterzellen, die Fertigstellung der Ausführungsplanung für das Fördersystem und der Fertigungsbeginn dieses Systems beim Hersteller (s. Abbildungen).



Abbildung 3: Roboterzellen im finalen Aufbau für den Probebetrieb am Standort der Rückbauanlage

Die Energiekette und Verschlauchung wurde aufgelegt und mit der technischen Optimierung der Führungselemente begonnen (s. Abbildung 3). Die Sicherheitseinrichtungen, Not-Aus- und Schutztürfunktionen sowie die sonstigen Sensoren und Aktoren wurden komplettiert, getestet und QS-geprüft, ebenso wurden die Nebenaggregate mit ihren Steuereinheiten angeschlossen. Ein erheblicher Aufwand war ferner erforderlich, um die Anlagen-Komponenten steuerungstechnisch einzubinden. Dies betraf vor allem die Parametrierung der Robotercontroller, der Antriebsregler für die Linearachse und die Schnittstellen der Laseranlage zur zentralen PLC und zur Absauganlage, obwohl diese exakt nach den Herstellervorgaben vorbereitet und eingerichtet waren. Im Berichtszeitraum konnte dennoch die kinematische Ansteuerung für alle Roboterachsen fertiggestellt, getestet und letztlich auch die Laseranlage für einen kurzen Test in Betrieb genommen werden. Die Gesamtanlage und speziell auch die Laserzelle und deren Sicherheitskonzept wurde durch Gutachter der Berufsgenossenschaft und der Bezirksregierung erfolgreich abgenommen, sodass der Probe- und Entwicklungsbetrieb ohne Auflagen uneingeschränkt fortgeführt werden kann.

AP7 – Projektmanagement

Angesichts der angespannten Terminsituation waren in erhöhtem Maße Projektmanagement- und Koordinierungstätigkeiten mit den Projektpartnern und Projektbeteiligten: IGD, TSE, den Herstellerfirmen und den Standort-Fachabteilungen erforderlich. Es wurden die örtlichen Fachabteilungen und insbesondere der Arbeitsschutz und die BG vor Ort hinzugezogen. AP5 und AP6 erforderten intensive Abstimmungen aller Projektpartner.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Abnahme und Vorbereitung der CE-Zertifizierung der Anlage. Aufnahme des Probebetriebs und Tests der Laseranlage mit unterschiedlichen Bauteilgeometrien. Montage und Inbetriebnahme der Laserscanner zur Bauteilerkennung. Implementierung der Prozesssoftware für den automatischen Ablauf. Parallel dazu soll die Inbetriebnahme der Roboter-Messzelle, ebenfalls mit der Laserscantechnik zur Bauteilerkennung aber zusätzlich mit den radiologischen Sensoren ausgerüstet, erfolgen. Es ist geplant, die Messzelle mit radioaktiven Prüfpräparaten realitätsnah zu testen, insoweit dies mit dem Strahlenschutz für den Überwachungsbereich vereinbart

werden kann. Lieferung und Montage des Bauteilfördersystems Ende 1. Quartal 2026 und anschließende Integration in die Prozessablaufsteuerung. Optimierung der Bauteil-Spanntechnik.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Plenarvortrag auf der Kontec 2025 mit Ausblick auf die künftige Entwicklung von ARRIVE.
Webinar am 12.12.2025 auf Anfrage der OECD/NEA zur Robotik im Rückbau.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9439B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: 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		
Vorhabenbezeichnung: VP: Autonome robotergestützte Reinigung und Vormessung (ARRIVE) TP: Autonome Laserablation und radiologische Vormessung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2023 bis 30.06.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.601.161,45€
Projektleiter/-in: Dipl.-Ing. Thomas Schubert		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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.

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 Ausgangs-Qualitätskontrolle der freizugebenden 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 – Projektmanagemen

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

AP1 – Anforderungsanalyse und Systemdesign

Die im Berichtszeitraum laufenden Arbeiten zum AP1 betrafen die Erweiterung des Projektes mit einem Fördersystem, das die mit Bauteilen bestückten Projektträgerplatten vollautomatisch der Bauteildekontamination und radiologischen Messung zuführen kann, mit dem Ziel, die Roboterbelastung zu verbessern und den Bedienaufwand zu reduzieren. Die mechanische Fertigung beim Hersteller wurde nahezu abgeschlossen (Details s. Beschreibung Teilprojekt RWE).

Die am Fraunhofer IGD parallel aufgebaute Roboterzelle, die bis auf den Ablationslaser und die Absaugeinrichtung identisch ist zu den Roboterzellen in Biblis, ist mittlerweile einsatzbereit. Sie dient der parallelen Entwicklung der komplexen Bahnplanungsalgorithmik am Standort des Fraunhofer IGD, um die Entwicklung unabhängig zu machen von Prozessen/Einschränkungen in der Rückbauanlage Biblis, und Zeit einzusparen für Reisen zur Rückbauanlage RWE Biblis.

Die Roboterzelle am Fraunhofer IGD kam im aktuellen Berichtszeitraum bisher maßgeblich zum Einsatz zum Entwurf und Test neuartiger Ansätze der Kabelführung entlang des Roboterarms. Die Kabelführung im Projekt ARRIVE ist komplex, einerseits aufgrund komplizierter kinematischer Bewegungen des Arms zur Ermöglichung eines größtmöglichen Spielraums an Orientierungen des Endeffektor-Werkzeugs für beliebig orientierte Bauteiloberflächen, andererseits wegen der Führung eines sensiblen Kabelpakets entlang der gesamten Schleppkette der Linearachse sowie entlang des gesamten Roboterarms bis zum Werkzeug. Das Kabelpaket umfasst die sensible Hochenergielaserfaser mit Ummantelung, sensible Kamera-Datenleitungen für den 3D-Scanner, die zudem torsionssteif sind, sowie diverse Zu- und Abführungen von Kühlmittel für die Hochenergielaseroptik.

Kam beim Vorgängerprojekt ROBBE hierfür noch ein Pumpenschlauch mit Durchmesser 60 mm zum Einsatz, so ist bei ARRIVE (Laserablationszelle) ein Schlauchpaket mit Durchmesser 95 mm erforderlich, das entlang des Roboterarms geführt wird, und zusätzlich ein Schlauch zur Absaugung der bei der Laserablation entstehenden Aerosole und Dämpfe.

Wegen der sensiblen Kabel im Schlauchpaket, und aufgrund seiner umfangbedingten geringeren Flexibilität, wurden die verschärften Anforderungen an den erforderlichen Bewegungsspielraum ermittelt, und eine eigens entworfene Kabelentlastung mittels Führungsösen und Rollensystem realisiert und getestet (s. Fig. 1 und AP3).



Fig. 1: Kabelführung entlang Roboterarm (links, Mitte: Eigenentwicklung, rechts: zu statische Variante des Herstellers IGUS).

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

Die Konzeption des 3D-Laserscanners ist nahezu abgeschlossen, insbesondere die Gehäuseform und das Kühlkonzept standen im Fokus. Ein Baumuster wurde als Prototyp 3D-gedruckt, optimiert und wird in Kürze in Betrieb genommen. Die Fertigung des Adapters für den Laserscanners am Roboterarm ist abgeschlossen.

Die Erarbeitung der neuen Anforderungen an die Spezifikation der 3D-Sensorik durch das Fraunhofer IGD zusammen mit RWE Bibis und TSE ist abgeschlossen, das eingesetzte System zur 3D-Erfassung wird im Gegensatz zu den Anforderungen bei ROBBE mit einem schmalen 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.

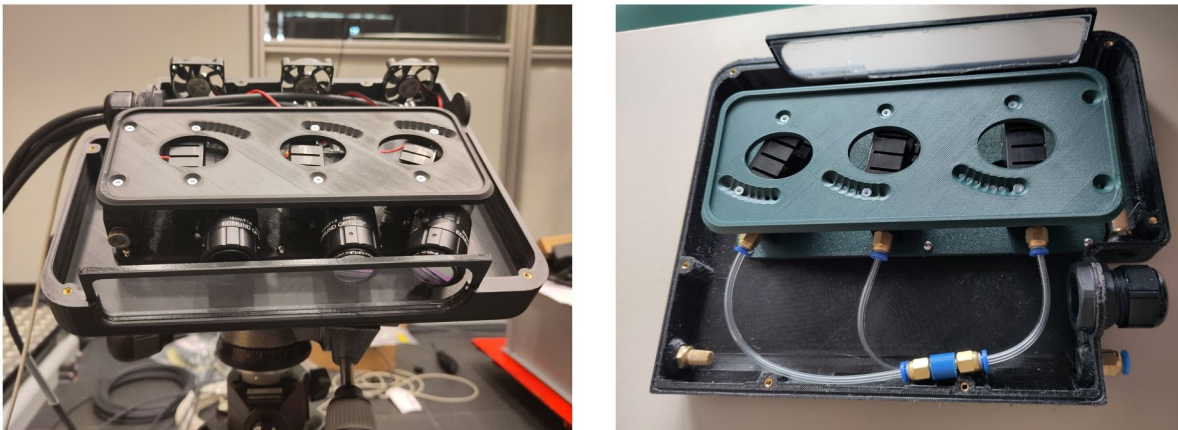


Fig. 2 Scankopf-Prototypen in überarbeiteter Kühlung. Links: Klassische Zwangslüftung, rechts: Pressluftkühlung mittels Sperrluft und Abluftfiltern.

Der Fokus im zweiten Halbjahr lag auf der Weiterentwicklung des physischen Prototypen, basierend auf den Ergebnissen aus dem 1. Halbjahr. Erste Tests hatten ergeben, dass die verwendeten Kameras eine größere Wärmeentwicklung verursachen, als durch unsere Erfahrungen in ROBBE zu erwarten war. Zwei neue, etwas größere Gehäuse wurden hierzu entwickelt, auch um die Biegeradien der finalen, allerdings deutlich dickeren Koaxialkabel zu berücksichtigen (Fig. 2).

Es wurden erste Versuche mit dem neuen Kalibrierungsansatz durchgeführt. Das Kalibrierungsverfahren erlaubt wie erhofft eine direkte Abschätzung der intrinsischen und extrinsischen Parameter, erreicht jedoch nicht die Genauigkeit von klassischen, aber auch

aufwändigeren Verfahren, wie zum Beispiel mittels bildfüllender Ringboardaufnahmen. Mittels Rückrotation ist es möglich, die Varianz der einzelnen Schätzungen zu ermitteln (Fig. 3). Nach dem aktuellen Stand sind diese für den Anwendungsbereich klein genug, da die schlussendlich verwendeten extrinsischen Parameter über alle Posen gemittelt werden. Die deutlich einfachere Handhabung des neuen Verfahrens stellt hingegen speziell im industriellen Umfeld einen Vorteil da, da diese weniger komplex ist als klassische Verfahren.

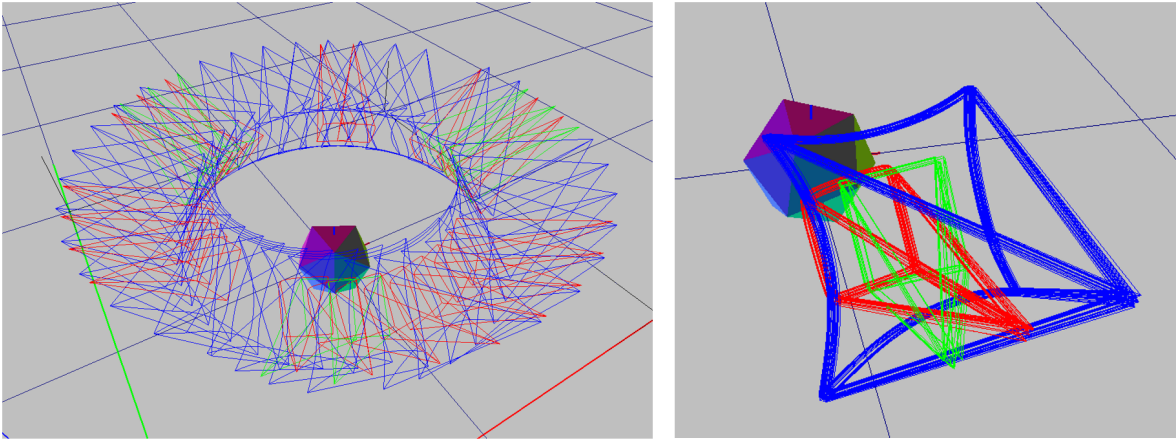


Fig. 3: Abweichung der Einzelschätzung der Kalibrierung mittels Rückrotation. Links: Geschätzte Position der drei Kameras (rot, grün, blau) in Relation zum Kalibrierobjekt (Icosaeder) nach Rotation des Drehtellers (+Kalibrierobjekts), rechts nach Rückrotation der Kamerapositionen (Ziel: exakte Überlappung).

Der letzte Schritt in der Kalibrierung ist die Abschätzung der Laserebene. Hierzu werden die Aufnahmen vom Ikosaeder sowohl mit ein- als auch mit ausgeschaltetem Laser durchgeführt. Hierdurch lässt sich ermitteln, wo auf dem Ikosaeder die Laserlinie sichtbar ist. Diese liefert auch deren Position im Raum. Über mehrere Aufnahmen kann so die Laserebene abgeschätzt werden. Die Torsionsproblematik der Koaxialkabel an den Anschlussstellen der Energiekette am Roboter konnte durch die Änderung der Energiekette zu einer durchgängigen gelöst werden. Die Torsion der Koaxialkabel wird durch Torsionslimitierung der einzelnen Energiekettenglieder über die gesamte Energiekette verteilt, was sehr zur Entlastung der Kabel beiträgt.

Der nächste Schritt im Bereich 3D Erfassung ist die Kalibrierung und erste Scans mit dem 3D-Scanner am Roboterarm, um die 3D Erfassung unter realen Bedingungen zu testen.

AP3 – Laserdekontamination

Die Laseranlage wurde in Betrieb genommen und mit Tests der Anlage an Musterbauteilen begonnen. Am Fraunhofer IGD wurden gemeinsame Versuche zur optimalen Montage der Energiekette am Roboterarm und zur Anfertigung geeigneter Führungs- und Befestigungspunkte durchgeführt. Die Tests waren sehr vielversprechend, so dass geplant ist, das erarbeitete Konzept auf die Prototypanlage am Standort Biblis mit den gleichen Elementen zu übertragen. Die Absaugung für den Laserrauch wurde lokal am Laserwerkzeug und auch oberhalb des Laserarbeitsbereichs an der Kabinendecke verbaut und getestet. Die Abluftführung wurde über eine Filterstrecke direkt nach außen verlegt.

AP4 – Vormessung (Orientierungsmessung)

Die Sonden werden gegenwärtig einer Eingangsprüfung unterzogen. Es wurden verschiedene Entwürfe für die Adaptierung der Messsonden am Roboterarm geplant und in der virtuellen Simulationsumgebung getestet. Die Implementierung des Protokolls zum Auslesen der Daten am

IPC und Integration in die Strategie zur Bahnplanung für die Freimess-Zelle erfolgt in Kürze, sobald die Messsonden am Fraunhofer IGD eingetroffen sind.

AP5 – Integration und Evaluation

Die Installation der Roboterzelle am Fraunhofer IGD ist mittlerweile bis auf kleinere Details abgeschlossen, das System ist einsatzbereit für die Entwicklung der Bahnplanungs- und 3D-Erfassungsalgorithmik für Ablation und Freimessung.

AP6 – Industrieller Anlagenprototyp

Nachdem mittlerweile die Installation der Roboterzelle am Fraunhofer IGD nach einigen Verzögerungen des Systemintegrators abgeschlossen ist, erfolgt aktuell die Erweiterung der Roboter-Software von Sechsbetriebsachsen auf die synchrone Ansteuerung von sechs Roboterachsen plus einer Linearverfahreinheit (auf der die Roboterbasis verfahren wird).

Eine Aufgabe der Roboter-Software ist die Bereitstellung von Echtzeit-Positionsdaten aller Sieben Gelenke, sowie deren synchroner Ansteuerung, für den Zugriff durch die bahnplanungs-Software auf dem IPC. Weiterer Aufgaben sind die Überwachung der Sicherheitsfunktionen und Sensoren sowie Einhaltung von Gelenkwinkeln, sowie Ansteuerung des Ablationslasers. Da bei ARRIVE eine neue Generation von Roboter-Steuerung sowie Handbediengerät zum Einsatz kommt, ist diese (Software-)Erweiterung umfangreich. Die Roboter-Steuersoftware wird auf allen drei Zellen in identischer Form zum Einsatz kommen (Fraunhofer IGD, sowie RWE Biblis Laserablation und Freimessung), die Entwicklung zielt also darauf ab, dass trotz unterschiedlicher Zellen (Laserablations-Simulation, Laserablation, Freimessung) eine identische Software genutzt werden kann, die sich entsprechend dynamisch auf die jeweilige Zelle einrichtet.

AP7 – Projektmanagement

Angesichts der angespannten Termsituation waren in erhöhtem Maße Projektmanagement- und Koordinierungstätigkeiten mit den Projektpartnern und Projektbeteiligten (IGD, TSE, den Herstellerfirmen und den Standort-Fachabteilungen) erforderlich. Es wurden die örtlichen Fachabteilungen und insbesondere der Arbeitsschutz und die BG vor Ort (RWE Biblis) hinzugezogen. AP5 und AP6 erforderten intensive Abstimmungen aller Projektpartner.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Entwicklung und Test des 3D-Scanners zur Bauteilidentifikation/Geometriemessung für Laserdekontaminations- und Messzelle, Entwicklung und Test der intelligenten Roboter-Bahnplanung zur autonomen Laserdekontamination beliebiger Bauteile sowie deren Freimessung.

Begleitung der Aufnahme des Probetriebs und Tests der Laseranlage mit unterschiedlichen Bauteilgeometrien am Standort RWE Biblis, zunehmend mit der Automatisierungslösung des Fraunhofer IGD. Test der Messzelle mit radioaktiven Prüfpräparaten soweit vereinbar mit Strahlenschutz für den Überwachungsbereich.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Plenarvortrag auf der Kontec 2025 mit Ausblick auf die künftige Entwicklung von ARRIVE. Webinar am 12.12.2025 auf Anfrage der OECD/NEA zur Robotik im Rückbau.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9440A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Hochschule Konstanz – Technik, Wirtschaft und Gestaltung HTWG, Labor für Produktentwicklung und Maschinenkonstruktion, Alfred-Wachtel-Str. 8, 78462 Konstanz		
Vorhabenbezeichnung: VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkanten-dekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Konzeption und Entwurf der Versuchsmuster		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 30.06.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 248.148,30€
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. Dr.sc.agr. Kurt Heppler		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 m² bis 450.000 m² 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 6: Versuche vor Ort / AP7: Optimierung der Versuchsmuster

Im Berichtszeitraum war ursprünglich die Durchführung von Versuchen vor Ort vorgesehen. Diese konnten jedoch aufgrund des ungeplanten Abzugs des Projektpartners SPIE SAT aus dem Kernkraftwerk Obrigheim nicht realisiert werden. SPIE SAT setzt alles daran, die Versuche baldmöglichst im Kernkraftwerk Isar durchzuführen.

Ungeachtet dessen wurde das weiterentwickelte Versuchsmuster im Rahmen des Projekttreffens Ende Juni erstmals praktisch erprobt. Diese Tests ersetzen keine Praxiserprobung, lieferten jedoch erste Erkenntnisse für die weitere Entwicklung.

Es zeigte sich, dass der bewegliche Gehäuseaufsatz während der Bearbeitung unbeabsichtigt in Kontakt mit den rotierenden Frässcheiben geraten kann, was eine stark verkürzte Standfestigkeit erwarten lässt (siehe Abbildung 3). Zur Vermeidung dieses Kontakts wurden im Sinne von AP7 mehrere konstruktive Ansätze untersucht und mit CONTEC diskutiert:

- Vergrößerung der Öffnung für die Frässcheiben, um mehr seitliches Spiel zu ermöglichen. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine Verbreiterung des gesamten Gehäuses sowie eine Anpassung der Scheibenaufnahme, um weiterhin eine mittige Ausrichtung der Frässcheiben sicherzustellen.
- Einsatz eines steiferen Materials für den Aufsatz, was jedoch aufgrund der bereits erreichten und weiterhin angestrebten Gewichtsreduktion nur eingeschränkt möglich ist.
- Geometrische Versteifung des Aufsatzes, insbesondere durch Rippenstrukturen.
- Reduzierung des Führungsspiels zwischen Aufsatz und Gehäuse, um eine stabilere Führung zu erzielen, wobei dies zu Lasten der Leichtgängigkeit des Mechanismus ginge.

Auf Basis dieser Bewertungen wurde für den nächsten Prototypen eine Kombination aus vergrößerter Frässcheibenöffnung und geometrischer Versteifung des Aufsatzes als bevorzugte Lösungsstrategie festgelegt. Damit konnten bereits wesentliche Vorarbeiten für die spätere



Gehäuseaufsatz

Umsetzung in AP 7 geleistet werden, obwohl die Praxistests noch ausstehen.

Durch die Verschiebung der Vor-Ort-Versuche ergibt sich aktuell eine terminliche Verzögerung von etwa vier Monaten gegenüber der ursprünglichen Projektplanung, da die Ergebnisse aus AP 6 als Grundlage für die anschließende Optimierung und Validierung dienen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP 6: Versuche vor Ort

SPIE SAT setzt alles daran, die Versuche vor Ort baldmöglichst durchzuführen. Ziel bleibt es, eine strukturierte Rückmeldung des Fachpersonals zu Handhabung, Leistungsfähigkeit und Robustheit des Systems einzuholen. Die Versuche sollen umfassend, insbesondere visuell, dokumentiert werden, um die gewonnenen Erkenntnisse systematisch auswerten zu können.

AP 7: Optimierung der Versuchsmuster

Auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 6 wird der Prototyp in eine abschließende Optimierungsphase überführt. Dabei sollen auch die bereits identifizierten konstruktiven Anpassungen umgesetzt werden. Weitere Anpassungen erfolgen bedarfsorientiert.

AP 8: Dokumentation und Evaluation des Projekts

Nach Abschluss der technischen Arbeiten ist die umfassende Dokumentation und Evaluation des Gesamtprojekts vorgesehen. Dies umfasst die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse, die Bewertung der erreichten technischen Ziele sowie eine abschließende Beurteilung der Praxistauglichkeit des entwickelten Systems. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung von AP 6 ist derzeit mit einer entsprechenden Verschiebung der nachgelagerten Arbeiten zu rechnen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

- KONTEC 2025, Kurzvortrag „Dekontamination von Betoninnenkanten: Weiterentwicklung von trockenmechanischen Werkzeugen“, 15.09. – 17.09.25, Dresden
- bauma, Ausstellung von Prototyp und Poster, 07.04. – 13. 04.25, München
- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2nd: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.24, www.kernd.de
- Kerntechnik Fachtagung 2024, Plenarvortrag „DEVELOPMENT OF A DECONTAMINATION TOOL FOR INNER EDGES AND CORNERS (EKONT-2)“, 11.06. – 13.06.24, Leipzig
- FORKA Statusseminar, Präsentation „Projektvorstellung EKONT-2, Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 09.04. – 11.04.24
- KONTEC 2023, Postervortrag: „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 30.08 – 01.09.23, Dresden
- SafeND Forschungssymposium, Plenarvortrag: „EKONT-2: Advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edge in nuclear facilities“, 13.09. – 15.09.23, Berlin
- ATW Journal, Magazinbeitrag: „Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination“, 01.11.23, www.kernd.de

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9440B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31, 76131 Karlsruhe		
Vorhabenbezeichnung: VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Durchführung experimenteller Versuche und Auswertung der Versuchsmuster		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 30.06.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 250.518,25 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. S. Gentes		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 100.000m² bis 450.000m² 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 6: Versuche vor Ort:

Das angesetzte Arbeitspaket konnte bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen werden. Der angesetzte Versuchszeitraum in AP6 musste aufgrund des ungeplanten Abzugs des Projektpartners SPIE SAT aus dem Kernkraftwerk Obrigheim zeitlich nach hinten verschoben werden.

In diesem Zeitraum wurde ein grober Rahmen eines Fragebogens erstellt, um Erkenntnisse der Mitarbeiter, die an den Versuchen in AP 6 teilgenommen haben, zu sammeln. Dabei wurden bestehende Themen, wie die Bediensicherheit, körperliche Belastung/ Handhabbarkeit, verschiedene Umweltinteraktionen auf Seiten der Anwender thematisiert. Zudem wird das Versuchsmuster untersucht, um Erkenntnisse bezüglich des Zustands und der Belastungsresistenz zu bewerten.

AP 7: Optimierung der Versuchsmuster:

Weitere Versuche wurden am Versuchsstand der KIT-TMB durchgeführt. Die durchgeführten Tests wurden in Bezug auf AP 7 evaluiert, dessen Ergebnisse in die Optimierung des Prototyps einfließen.

Daneben wurde Ende Juni wurde ein gemeinsamer Test des Versuchsmusters durchgeführt. Dabei zeigte sich ein Optimierungsbedarf, der im Abschnitt AP 7 zusammengefasst wird.

Dadurch, dass die Vor-Ort Versuche nicht wie geplant durchgeführt werden konnten, wird entgegen zur ursprünglichen Planung mit einer Verzögerung von ca. vier Monaten gerechnet. Dies liegt daran, dass die Ergebnisse als Grundlage für die Optimierung und Validierung dienen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP 6: Es ist geplant die genannten Versuche noch im Januar im Kernkraftwerk ISAR durchzuführen. Nach Abschluss der Versuche werden die gewonnenen Erkenntnisse u.a. mithilfe des erstellten Fragebogens gesammelt.

AP 7: Nach dem durchgeführten Test wurden mögliche technische Anpassungen mit den Projektpartnern diskutiert. Diese sind u.a.:

Eine Vergrößerung der Gehäuseöffnung

Einsatz eines steiferen Materials für den Aufsatz sowie eine Versteifung des Aufsatzes

Verbessertes Führungsspiel zwischen Gehäuse und Aufsatz

Dadurch konnten bereits erste wertvolle Erkenntnisse gesammelt werden, die zusammen mit den Erkenntnissen der Versuche genutzt werden um einen überarbeiteten Prototyp zu erstellen.

AP 8: Der letzte Schritt des Projektes umfasst die Evaluation der durchgeführten Untersuchungen und die Dokumentation des Gesamtprojektes, die in Zusammenarbeit mit allen Projektmitgliedern bearbeitet wird.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

KONTEC 2025, Kurzvortrag “Dekontamination von Betoninnenkanten: Weiterentwicklung von trockenmechanischen Werkzeugen“, 15.09. – 17.09.2025, Dresden

BAUMA 2025, Poster & Vorstellung des Forschungsprojektes, 07.04.2025 – 13.05.2025, München, CONTEC Messestand, Tyrolit Group

ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2nd: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.2024, 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

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9440C	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Contec GmbH, Hauptstraße 146, 57518 Alsdorf			
Vorhabenbezeichnung: 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			
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 30.06.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 118.107,87 €	
Projektleiter/-in: Johannes Greb		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 m² bis 450.000 m² 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.

CONTEC war im gesamten zweiten Halbjahr 2025 nur im Juli aktiv am AP 5 beteiligt (siehe Balkenplan). Es wurde ein breiteres Gehäuse entwickelt und die Führung des Gleitschuhs optimiert.

AP 6: Versuche vor Ort / AP7: Optimierung der Versuchsmuster

Im Berichtszeitraum war ursprünglich die Durchführung von Versuchen vor Ort vorgesehen. Diese konnten jedoch aufgrund des ungeplanten Abzugs des Projektpartners SPIE SAT aus dem Kernkraftwerk Obrigheim nicht realisiert werden. SPIE SAT setzt alles daran, die Versuche baldmöglichst im Kernkraftwerk Isar durchzuführen.

Ungeachtet dessen wurde das weiterentwickelte Versuchsmuster im Rahmen des Projekttreffens Ende Juni erstmals praktisch erprobt. Diese Tests ersetzen keine Praxiserprobung, lieferten jedoch erste Erkenntnisse für die weitere Entwicklung.

Es zeigte sich, dass der bewegliche Gehäuseaufsatz während der Bearbeitung unbeabsichtigt in Kontakt mit den rotierenden Frässcheiben geraten kann, was eine stark verkürzte Standfestigkeit erwarten lässt (siehe Abbildung 3). Zur Vermeidung dieses Kontakts wurden im Sinne von AP7 mehrere konstruktive Ansätze untersucht und mit CONTEC diskutiert:

- Vergrößerung der Öffnung für die Frässcheiben, um mehr seitliches Spiel zu ermöglichen. Dieser Ansatz erfordert jedoch eine Verbreiterung des gesamten Gehäuses sowie eine Anpassung der Scheibenaufnahme, um weiterhin eine mittige Ausrichtung der Frässcheiben sicherzustellen.
- Einsatz eines steiferen Materials für den Aufsatz, was jedoch aufgrund der bereits erreichten und weiterhin angestrebten Gewichtsreduktion nur eingeschränkt möglich ist.
- Geometrische Versteifung des Aufsatzes, insbesondere durch Rippenstrukturen.
- Reduzierung des Führungsspiels zwischen Aufsatz und Gehäuse, um eine stabilere Führung zu erzielen, wobei dies zu Lasten der Leichtgängigkeit des Mechanismus ginge.



Abbildung 4: Kontakt der Frässcheiben mit Gehäuseaufsatz

Auf Basis dieser Bewertungen wurde für den nächsten Prototypen eine Kombination aus vergrößerter Frässcheibenöffnung und geometrischer Versteifung des Aufsatzes als bevorzugte Lösungsstrategie festgelegt. Damit konnten bereits wesentliche Vorarbeiten für die spätere Umsetzung in AP 7 geleistet werden, obwohl die Praxistests noch ausstehen.

Durch die Verschiebung der Vor-Ort-Versuche ergibt sich aktuell eine terminliche Verzögerung von etwa vier Monaten gegenüber der ursprünglichen Projektplanung, da die Ergebnisse aus AP 6 als Grundlage für die anschließende Optimierung und Validierung dienen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP 6: Versuche vor Ort

SPIE SAT setzt alles daran, die Versuche vor Ort baldmöglichst durchzuführen. Ziel bleibt es, eine strukturierte Rückmeldung des Fachpersonals zu Handhabung, Leistungsfähigkeit und Robustheit des Systems einzuholen. Die Versuche sollen umfassend, insbesondere visuell, dokumentiert werden, um die gewonnenen Erkenntnisse systematisch auswerten zu können.

AP 7: Optimierung der Versuchsmuster

Auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 6 wird der Prototyp in eine abschließende Optimierungsphase überführt. Dabei sollen auch die bereits identifizierten konstruktiven Anpassungen umgesetzt werden. Weitere Anpassungen erfolgen bedarfsorientiert.

AP 8: Dokumentation und Evaluation des Projekts

Nach Abschluss der technischen Arbeiten ist die umfassende Dokumentation und Evaluation des Gesamtprojekts vorgesehen. Dies umfasst die Zusammenfassung der Versuchsergebnisse, die Bewertung der erreichten technischen Ziele sowie eine abschließende Beurteilung der Praxistauglichkeit des entwickelten Systems. Aufgrund der zeitlichen Verzögerung von AP 6 ist derzeit mit einer entsprechenden Verschiebung der nachgelagerten Arbeiten zu rechnen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

- KONTEC 2025, Kurzvortrag „Dekontamination von Betoninnenkanten: Weiterentwicklung von trockenmechanischen Werkzeugen“, 15.09. – 17.09.25, Dresden
- bauma, Ausstellung von Prototyp und Poster, 07.04. – 13. 04.25, München
- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2nd: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.24, www.kernd.de
- Kerntechnik Fachtagung 2024, Plenarvortrag „DEVELOPMENT OF A DECONTAMINATION TOOL FOR INNER EDGES AND CORNERS (EKONT-2)“, 11.06. – 13.06.24, Leipzig
- FORKA Statusseminar, Präsentation „Projektvorstellung EKONT-2, Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 09.04. – 11.04.24
- KONTEC 2023, Postervortrag: „Entwicklung eines innovativen, teilautomatisierten Geräts für eine trockenmechanische Ecken-, Kanten- und Störstellendekontamination in kerntechnischen Anlagen“, 30.08 – 01.09.23, Dresden
- SafeND Forschungssymposium, Plenarvortrag: „EKONT-2: Advancement of a demonstrator for dry-mechanical decontamination of corners and inner edge in nuclear facilities“, 13.09. – 15.09.23, Berlin
- ATW Journal, Magazinbeitrag: „Entwicklung eines Werkzeugs zur mechanischen Innenkanten- und Eckendekontamination“, 01.11.23, www.kernd.de

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: FKZ15S9440D
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: SPIE SAT GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Weiterentwicklung von Geräten für eine trockenmechanische Ecken- und Innenkantendekontamination in kerntechnischen Anlagen (EKONT-2) TP: Praxisversuche und Verifizierung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 30.06.2026	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 54.059,05	
Projektleiter/-in: Stefan Stemmle	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 m² bis 450.000 m² 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 Arbeitsprogramm Punkten)

AP 1-5: siehe oben

Die AP1-3 wurden bereits im Vorjahr 2024 abgeschlossen. Seitens SPIE SAT erfolgte Zuarbeit und Beratung aus der Anwendersicht. SAT war hier regelmäßig eingebunden und im Austausch mit den Projektpartnern.

Die AP 4-5 sind inzwischen ebenfalls abgeschlossen. In diesem Zusammenhang war SPIE SAT auf der KONTEC 2025 (17. - 20.09.2025) als Aussteller vertreten und hat das Thema Gebäudedekontamination thematisiert, insbesondere mit Bezug auf EKONT. Das Abstract für einen Fachvortrag wurde inhaltlich von der SAT überprüft. Die SAT ist dabei selbst als Co-Präsentator aufgetreten.

Am 15.01.25 fand das erste Projekttreffen im KIT statt, inkl. Besuch des Versuchsstandes. Weitere Projekttreffen per Teams fanden statt am 19.02.25, 05.03.25, 03.06.2025 und 18.12.2025

AP 6: Versuche vor Ort

Ab August 2025 sollten 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 Gebäudedekontamination durchführt. Zuletzt war der Fokus verstärkt auf dem Abtrag von kontaminierten Betonoberflächen, was perfekt zum Zeitplan unseres Projektes EKONT2 gepasst hätte.

Entsprechend wurden die Versuche vorbereitet. Die Prototypmaschine für Praxisversuche 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.

Inzwischen musste die SAT das Projekt im KWO (aus Budgetgründen) vorzeitig abbrechen und das Personal und die Werkzeuge wurden Ende August 2025 aus dem KWO abgezogen. Damit waren die bisherigen Planungen für die Praxisversuche im KWO leider gegenstandslos.

Am 01.09.2025 hat die SAT ein neues Projekt im Kernkraftwerk Isar (KKI1) gestartet. Neben diversen Demontagearbeiten ist auch Betonabtrag im BELB (Brennelementbecken) geplant. Nach ersten Gesprächen mit dem Betreiber PEL (PreussenElektra) ist man dort sehr daran interessiert, die Praxisversuche im KKI1 durchzuführen und sich aus erster Hand ein Bild über die Leistungsfähigkeit der Prototypmaschine zu machen.

Bevor die Fräsarbeiten im BELB (Brennelementbecken) starten können, muss zuvor die Edelstahlverkleidung an den Beckenwänden demontiert werden, was ab dem 12.01.2026 starten soll.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP 6: Versuche vor Ort

Wir setzen alles daran, die Praxisversuche im Januar 2026, abzuschließen und alles entsprechend zu dokumentieren. Den aktuellen terminlichen Rückstand hoffen wir dann im Verlaufe des AP7 wieder aufzuholen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

- ATW Journal, Magazinbeitrag: Best Presentation Award 2nd: Development of a decontamination tool for inner edges and corners (EKONT-2), 01.09.2024, 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
- Veröffentlichungen auf der BAUMA 2025 in München
- Präsentation auf der KONTEC 2025 in Dresden (17.09.2025).

Berichtszeitraum: 01.01.2025 bis 30.06.2025		Förderkennzeichen: 15S9449A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Leibniz Universität Hannover – Institut für Werkstoffkunde		
Vorhabenbezeichnung: VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Prozessautomatisierung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2024 bis 30.09.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.323.877,02 €
Projektleiter/-in: Dr.-Ing. Thomas Hassel		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Arbeitsprogramm Punkten)

- Im Berichtszeitraum wurde die geplanten Aufgaben zur Planung, Konstruktion und Fertigung der Versuchsanlage durchgeführt. Die konstruktive Ausarbeitung sämtlicher Anlagenkomponenten und die technische Detailplanung sind abgeschlossen. Die Schnittstellen rund um das Wasserbecken wurden vollständig konkretisiert und in umfassende Planungsunterlagen überführt. Die Auslegung der Führungsmaschine wurde finalisiert und mit den angrenzenden Systemen abgestimmt. Auf dieser Grundlage wurden die Ausschreibungsunterlagen erstellt, belastbare Bestellungen ausgelöst. Die Fertigung aller Komponenten ist abgeschlossen.
- Im Rahmen der Merkmalsidentifikation wurden Datensätze der bestehenden Anlagentechnik ausgewertet, um die ersten Arbeiten im Arbeitspaket B/3 durchzuführen. Aus den transienten Messsignalen konnten einzelne Lichtbogenereignisse eindeutig identifiziert und analysiert werden, um das Verhalten des Lichtbogens im Prozess besser zu verstehen. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass das bislang verwendete Prozessmodell unvollständig ist und erweitert werden muss. Dies ist entscheidend für eine zuverlässige Identifikation der Prozesssituation und die darauf aufbauende zukünftige Regelung.
- Unter Einbezug der Ergebnisse und Daten aus dem Vorgängerprojekt CAMGproFit konnten im Arbeitspaket B/3 in Kombination mit B/4 insgesamt vier Merkmale identifiziert werden, die für bestimmte Werkstoffgruppen mit dem Verschleiß der Elektrode korrelieren. Für Verbundwerkstoffe im Funktionsbereich der Werkzeugelektrode ließ sich eine belastbare Korrelation hingegen nicht nachweisen. Bei allen anderen untersuchten Werkstoffen ermöglichen die identifizierten Merkmale eine berührungslose Überwachung des Verschleißes im laufenden Prozess und bilden damit eine wesentliche Voraussetzung für eine automatisierte Anwendung.
- Im Arbeitspaket A/5 wurde die erforderliche Hardware beschafft. Sie verfügt im Vergleich zum Vorgängersystem über eine verdoppelte Datenaufnahmekapazität und ist nach der Installation des neuen Wasserbeckens betriebsbereit. Zur Steigerung der Messgenauigkeit wurden zudem verschiedene Anpassungen an der CAMG-Anlage vorgenommen. Zusätzlich zu den bestehenden Strom- und Spannungssensoren wurde ein dritter Sensor integriert, um eine erweiterte und präzisere Datenerfassung im CAMG-Prozess zu ermöglichen.
- Im Arbeitspaket A/6 wurden die vorhandenen Daten für das Vortraining des Algorithmus herangezogen. Die bislang erzielten Ergebnisse wurden aufbereitet, in einer wissenschaftlichen Publikation dokumentiert und veröffentlicht.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- Nach der Installation und der Inbetriebnahme der Anlage (A/1) werden im Rahmen von Arbeitspaket A/1 und A/5 die vollständige Montage und Integration aller Systemkomponenten abgeschlossen. Dazu zählen die Anbindung an Strom- und Wasserversorgung sowie die Integration und Kalibrierung sämtlicher Sensoren für Spannung, Strom, Temperatur und Drehzahl. Alle Messketten werden mit der Technik zur Datenerfassung harmonisiert, sodass eine durchgängige, synchronisierte und bandbreitengerechte Aufzeichnung gewährleistet ist. Ergänzend werden für alle vorgesehenen Mock-ups spezifische Halterungen konstruiert, gefertigt und in Betrieb genommen, um eine reproduzierbare Positionierung und belastbare Messbedingungen sicherzustellen. Im Anschluss werden neue Prozessdaten unter definierten Betriebsbedingungen erhoben.
- Diese Daten werden anschließend im Rahmen von Arbeitspaket A/6 mit dem entwickelten Algorithmus analysiert und mit den bisherigen Datensätzen verglichen, um eine detaillierte Auswertung zu ermöglichen. Für eine vertiefte Betrachtung der transienten Signale kommen ergänzende Auswerteverfahren zum Einsatz, darunter Häufigkeitsverteilungen, FFT-Analysen und Wavelet-Methoden. Ziel ist die robuste Extraktion relevanter Merkmale, die Verfeinerung des Prozessmodells sowie die Steigerung der Aussagekraft der Diagnose. Der Algorithmus wird iterativ weitertrainiert und validiert, um die Modellgüte und die Prozessstabilität nachhaltig zu verbessern.
- Des Weiteren werden Versuche mit unterschiedlichen Werkstoffen und Geometrien durchgeführt. Hierzu zählt insbesondere eine Welle aus einer neuen Legierung, deren Ergebnisse mit denen der aktuell verwendeten Referenzwelle verglichen werden. Auf diese Weise werden materialspezifische Effekte quantifiziert, die Übertragbarkeit der Merkmalsidentifikation geprüft und die Merkmalsselektion bei Bedarf angepasst. Die Ergebnisse fließen in die Weiterentwicklung der Regelungsstrategie sowie in ein zuverlässiges, kontaktloses Verschleißmonitoring ein.

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.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9449B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2024 bis 30.09.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 130.627,52 €
Projektleiter/-in: Dipl.-Ing. (FH) Torsten Wollermann		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: torsten.wollermann@ewn-gmbh.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Rückbau kerntechnischer Anlagen und Einrichtungen sind metallische Strukturen wie im Leistungsumfang des Reaktordruckbehälters mit Wandstärken größer als 100 mm zu schneiden bzw. thermisch zu trennen. Dabei können Konstellationen auftreten, bei denen reine Materialstrukturen (z.B. ferritische als auch austenitische Werkstoffe) als auch Materialkombinationen in Form von Oberflächenplattierungen bzw. Werkstoffkombinationen mit beiden Werkstoffarten zur Verbesserung der Materialstabilität unter den metallurgischen Einsatzbedingungen, der Betriebs- und Funktionssicherheit sowie den radiologischen und gesetzlichen Anforderungen.

Vor diesem Hintergrund werden für die anstehenden Rückbauprojekte in Deutschland und langfristig auch international sichere und robuste Technologien zum thermischen als auch mechanischen 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 Arbeitsprogramm Punkten)

- Weiterführung des Arbeitspakets A/1 bezüglich den Planungs- und Bewertungsansätzen mit dem Projektpartner Unterwassertechnikum Hannover (UWTH) zur Inbetriebnahme des Wasserbeckens, um mit der Manipulatoreinheit einschl. der linearen Verfah- und Antriebssystem den tatsächlich vorhandenen räumlichen Platzbedarf für die geplanten Mock-up's zu definieren. Entsprechende Konstruktionsausschnitte aus den geplanten Reaktorkomponenten werden dem örtlichen Arbeitsbereich unter Berücksichtigung der Raumkoordinaten im Wasserbecken maßstäblich angepasst bzw. modifiziert. Dazu wurden erste Bauteilbetrachtungen für die notwendigen Randbedingungen einer darstellenden Auslegung bzw. Darstellung der Konstruktionsdetails abgeglichen, um den Ist-Stand zu erfassen. Im Ergebnis werden somit die grundlegenden Anforderungen definiert, um in gemeinsamer Abstimmung mit der UWTH wichtige technische Details zum Anwendungsfall festzulegen. Wichtige Schnittstellenbewertungen bzw. Vorgaben hinsichtlich der verwendeten Netzwerktechnik, der notwendigen Auslegung geplanter Schalt- und Steuerungsequipment oder zu verbindende Konstruktionselemente werden weiterführend in der Projektarbeit betrachtet.
- Gemäß der internen EWN-Konzeptplanung zur Erstellung des Lastenheftes zum fernbedienten Einsatz eines geplanten Manipulators in der Zerlegehalle wurden die notwendigen Einsatzkriterien mit den derzeit vorliegenden Erfahrungen aus den EWN-Rückbauprojekten zum baulichen Einsatz einer CAMG/CAMC-Anlage als Planungskriterium erfasst. In dieser projektbegleitenden Bewertungsphase werden die grundlegenden Anforderungen und Spezifikationen zur Auslegungsgröße sowie Einsatzsicherung des Manipulators modelltechnisch dargestellt.
- Begleitende Planungsaufgaben in den Arbeitspaketen B/1 und C/1, zur Implementierung der zu realisierenden Prozesstechnik (z. B. Befestigungsmöglichkeiten des Gesamtequipments, Bedarf an erforderlichen Geräte- und Einrichtungen sowie der Betriebsmittel und Medienversorgung) sind in der Bearbeitung bzw. fließen in den Planungsumfang zur Bewertung mit ein.
- Im Ergebnis der Vorbetrachtungen und Vorplanungen zur Initialisierung von Mock-up's anlagenspezifischer Reaktorkomponenten (wie z. B. Reaktoreinbauten OKG, UKG usw.) wurden zur Simulation mit den realen Konstruktionen im fernbedienten/fernhandierten Einsatzfall, unter Berücksichtigung der vorgeplanten Arbeitsbereiche, der Aufstellungs- und

Schnittplanung sowie Kollisionsbetrachtung, entsprechende Modifizierungen und Geräteanpassungen an den CAMC-Elektrodenhaltern erarbeitet. Mit diesen Anpassungen wurden dann unterschiedliche Modellausführungen von CAMC-Elektrodenhalter für Rund- und Flachelektroden gefertigt, die im Rahmen der automatisierten Vorschubregelung mittels KI-Methoden zur Auswertung und Lichtbogensteuerung eingesetzt werden können. Entsprechend den wissenschaftlich/praktischen Ergebnissen werden fortlaufend die gerätetechnischen Anpassungen dokumentiert und konstruktive Änderungen ausgeführt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- Kontinuierliche Fortführung aller relevanten Projektthemen im Rahmen des Arbeitspakets A/1 zwischen allen beteiligten 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 zukunftsicheres Anlagenkonzept zu etablieren, das den Anforderungen und Erwartungen aller Beteiligten gerecht wird.
- Die Bewertung aller vorliegenden Ergebnisse aus den Arbeitspaketen A/4, B/5 und C/4 einschl. möglicher Modifizierungen am Materialequipment der CAMC/CAMG-Anlage werden kontinuierlich fortgesetzt, um sicherzustellen, dass alle relevanten Anforderungen und technischen Spezifikationen im Detail erfasst werden. Im Rahmen erforderlicher Projekt- und Anwendersgespräche 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 Geräteequipments von Stromquelle, Medienversorgung, Elektrodenhaltern und Verschleißelektroden einschl. eines geeigneten 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.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9449C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Kjellberg Finsterwalde Schweißtechnik und Verschleißschutzsysteme GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Automatisierte Vorschubregelung bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser durch Auswertung und Nutzung der Lichtbogenparameter mittels KI-Methoden (AutArc) TP: Inverterstromquelle		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2024 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 163.648,02 €
Projektleiter/-in: Dr.-Ing. Michael Schnick		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Schneidelektroden. Dies erhöht die Belastung der Stromquelle durch ein vermehrtes Auftreten von Kurzschlüssen 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:

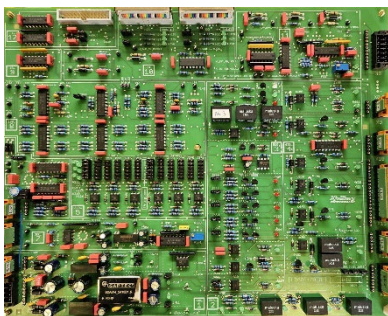
A/2 Auslegung der Stromquelle: Erstellung eines Lastenheftes sowie Entwicklung der benötigten Komponenten unter Berücksichtigung aller Randbedingungen für den CAMG- und den CAMC-Prozess

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

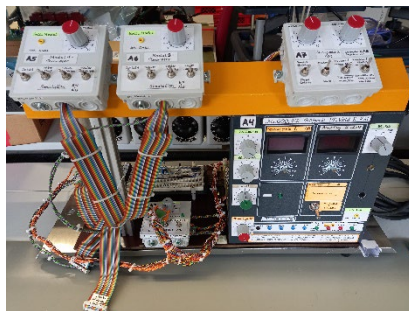
3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten A/2 und A/3)

Die im dritten Quartal 2025 geplanten Arbeiten im Arbeitsschwerpunkt A/2 – Auslegung der Stromquelle wurden erfolgreich abgeschlossen. Ein Schwerpunkt lag auf der Weiterentwicklung und dem Aufbau der Hauptsteuerleiterkarte, deren Montage und Integration planmäßig umgesetzt wurden. Gleichzeitig wurden umfassende Tests des Stromquellen-Gehäuses durchgeführt, bei denen die Robustheit unter Fall-, Wärme- und Feuchtigkeitsbelastung überprüft und die Einsatzfähigkeit der mechanischen Struktur bestätigt wurde. Ergänzend erfolgten erste Funktionstests der Stromquellenkomponenten (SQK), insbesondere hinsichtlich ihres Zusammenspiels innerhalb der Systemumgebung.

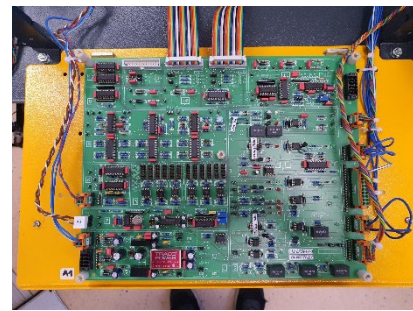
Im vierten Quartal 2025 wurden die Arbeiten fortgeführt und erfolgreich abgeschlossen. Neben den abschließenden Tests der Hauptsteuerleiterkarte wurde die Auslegung der relevanten Schnittstellen (konventionelle, BUS- und parallele Verbindungen) abgeschlossen, um die flexible Anbindung an das Gesamtsystem sicherzustellen. Darüber hinaus wurde die Option eines Parallelbetriebs analysiert und ausgelegt, wodurch die zukünftige Skalierbarkeit und Redundanz der Stromquelle bis 2000 A Arbeitsstrom technisch abgesichert wurde.



Hauptsteuerleiterplatte



Leiterplattenprüfgerät



Einbauumgebung Haupt-LP



Schutzgradprüfung Gehäuse



**EMV Prüfung Invertermodul
im Gehäuse**



Funktionstest Zusammenspiel SQK

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

Im ersten Quartal 2026 fand bereits ein fachlicher Abstimmungstermin mit den Projektbeteiligten statt, in dessen Rahmen die bisher erzielten Ergebnisse gemeinsam bewertet wurden. Auf Grundlage dieses Austauschs wurde das weitere Vorgehen festgelegt.

Für den weiteren Projektverlauf ist vorgesehen, im Herbst 2026 zwei Stromquellen an das IW zu überführen, um diese dort in eine Komplettanlage zu integrieren. Hierfür müssen in den ersten drei Quartalen 2026 zwei Stromquellen bei Kjellberg aufgebaut, geprüft und hinsichtlich der Parallelschaltung bis 2000 A, der EtherCAT-Schnittstelle sowie der schweißtechnischen Füge- und Trenneigenschaften getestet werden. Ziel ist die Durchführung von systemnahen Versuchen unter realitätsnahen Betriebsbedingungen im dritten Quartal 2026, um das Zusammenspiel der Stromquellen mit der Gesamtanlage zu überprüfen und wertvolle Erkenntnisse für die endgültige Anwendung zu gewinnen. Diese Aktivitäten markieren den Übergang vom Arbeitsschwerpunkt A/2 zur Herstellung und Überprüfung der Stromquelle (A/3) und bilden den letzten Schritt zur Absicherung der Einsatzfähigkeit der entwickelten Stromquellen.

Fazit:

Die Arbeiten zur Auslegung (A/2) sowie zur Herstellung und Überprüfung der Stromquelle (A/3) wurden planmäßig und erfolgreich umgesetzt. Alle vorgesehenen Prüfungen, Tests und Auslegungsmaßnahmen sind abgeschlossen und liefern eine belastbare Basis für die Integration der Stromquellen in eine Gesamtsystemumgebung. Die bevorstehenden systemnahen Versuche am IW stellen einen entscheidenden Meilenstein dar, um die Funktionalität, Integrationsfähigkeit und Einsatzreife der Stromquellen im vorgesehenen Anwendungskontext endgültig zu verifizieren.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Einen Bezug zu anderen Vorhaben gibt es derzeit nicht.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Es sind weder Berichte noch Veröffentlichung seitens Kjellberg geplant.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9450A	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik			
Vorhabenbezeichnung: VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung eines Laserablationsprozesses zur effektiven Zerstörung von Oberflächenschichten			
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2024 bis 31.10.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.053.573,45 €	
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Krause		E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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 m 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 Arbeitsprogramm Punkten)

- AP2: Die Konstruktion des Versuchsstandes und die Planung der Messtechnik wurden finalisiert. Aufgrund von Krankheit und Verzögerungen bei der Beschaffung einiger Komponenten konnte der Versuchsstand jedoch nicht vollständig aufgebaut und in Betrieb genommen werden.

- AP3: Für die Entwicklung des Arbeitskopfes wurden bereits zehn aufeinander aufbauende Designs erstellt, berechnet und ausgewertet. Durch die Vielzahl der Ergebnisse konnten die primären Einflussfaktoren in der Gestaltung des Designs in Hinsicht auf das Strömungsverhalten zuverlässig ermittelt werden.
- AP4: Die theoretische Betrachtung des Detektionsverfahrens wurde weitergeführt. Die Integration in den Versuchsstand zur Laserablation wurde begonnen. Aufgrund des Wechsels des Labors und von zeitlichen Verzögerungen durch Krankheit wurden die geplanten Versuche in den kommenden Berichtszeitraum verschoben.
- AP5: Aufbauend auf den Untersuchungen in AP3 wurde ein neues Design für den Arbeitskopf entwickelt. In ersten Absprachen erfolgte die Abstimmung von Schnittstellen zum Trägersystem sowie der Fertigung.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP2: Die Inbetriebnahme des Versuchsstandes ist im Januar 2026 geplant. Anschließend soll durch eine erste Versuchsreihe Optimierungspotential ermittelt und umgesetzt werden. Darauf aufbauend sind umfangreiche Untersuchungen zur Aufholung des zeitlichen Rückstandes geplant.
- AP3: Für die Entwicklung des Arbeitskopfes wird momentan noch der finale Designentwurf untersucht. Mit der Entwicklung des Detailmodells wird demnächst begonnen. Hierzu muss zunächst eine ausführliche Literaturrecherche zu vorhandenen Modellen und Möglichkeiten der Modellierung des Laserabtrages durchgeführt werden.
- AP4: Im Rahmen der Integration der IR-Kamera in den Versuchsstand können die Versuche zukünftig parallel zu den Versuchen zur Laserablation erfolgen. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Versuchsstandes sind ebenfalls umfangreiche Versuchsreihen zur Optimierung und Aufholung des zeitlichen Rückstandes geplant.
- AP5: Das finale Design des Arbeitskopfes muss entsprechend des Fertigungsverfahrens angepasst werden. Der entwickelte Arbeitskopf wird gefertigt und im Rahmen von ersten Versuchsreihen auf seine Eignung geprüft. Aufbauend auf den Ergebnissen der Tests erfolgt die Optimierung.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9450B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: WSM Weber Schweißmaschinen GmbH, Zeppelinstr. 4, 35418 Buseck		
Vorhabenbezeichnung: VP: Emissionsvermeidung durch Laser-Ablation beim Einsatz im nuklearen Rückbau (Emilia) TP: Entwicklung eines Demonstrators zur Laserablation		
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2024 bis 31.10.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 119.362,80 €
Projektleiter/-in: Dipl. Ing. Karl Martin Weber		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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

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

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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 arbeitskopfnah Filtertechnologie. Das System wird so kompakt aufgebaut, das 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 m 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)

- AP2: Die Konstruktion des Versuchsstandes und die Planung der Messtechnik wurden finalisiert. Aufgrund von Krankheit und Verzögerungen bei der Beschaffung einiger Komponenten konnte der Versuchsstand jedoch nicht vollständig aufgebaut und in Betrieb genommen werden.
- AP3: Für die Entwicklung des Arbeitskopfes wurden bereits zehn aufeinander aufbauende Designs erstellt, berechnet und ausgewertet. Durch die Vielzahl der Ergebnisse konnten die primären Einflussfaktoren in der Gestaltung des Designs in Hinsicht auf das Strömungsverhalten zuverlässig ermittelt werden.
- AP4: Die theoretische Betrachtung des Detektionsverfahrens wurde weitergeführt. Die Integration in den Versuchsstand zur Laserablation wurde begonnen. Aufgrund des Wechsels des Labors und von zeitlichen Verzögerungen durch Krankheit wurden die geplanten Versuche in den kommenden Berichtszeitraum verschoben.
- AP5: Aufbauend auf den Untersuchungen in AP3 wurde ein neues Design für den Arbeitskopf entwickelt. In ersten Absprachen erfolgte die Abstimmung von Schnittstellen zum Trägersystem sowie der Fertigung. WSM hat hier die Aufnahme für den Laserkopf verändert, damit andere Düsenformen leichter angebaut werden können.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP2: Die Inbetriebnahme des Versuchsstandes ist im Januar 2026 geplant. Anschließend soll durch eine erste Versuchsreihe Optimierungspotential ermittelt und umgesetzt werden. Darauf aufbauend sind umfangreiche Untersuchungen zur Aufholung des zeitlichen Rückstandes geplant.
- AP3: Für die Entwicklung des Arbeitskopfes wird momentan noch der finale Designentwurf untersucht. Mit der Entwicklung des Detailmodells wird demnächst begonnen. Hierzu muss zunächst eine ausführliche Literaturrecherche zu vorhandenen Modellen und Möglichkeiten der Modellierung des Laserabtrages durchgeführt werden.
- AP4: Im Rahmen der Integration der IR-Kamera in den Versuchsstand können die Versuche zukünftig parallel zu den Versuchen zur Laserablation erfolgen. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Versuchsstandes sind ebenfalls umfangreiche Versuchsreihen zur Optimierung und Aufholung des zeitlichen Rückstandes geplant.
- AP5: Das finale Design des Arbeitskopfes muss entsprechend des Fertigungsverfahrens angepasst werden. Der entwickelte Arbeitskopf wird gefertigt und im Rahmen von ersten Versuchsreihen auf seine Eignung geprüft. Aufbauend auf den Ergebnissen der Tests

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

Berichtszeitraum: 01.10.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9458A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: 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	
Vorhabenbezeichnung: VP: Maßstabsvergrößerung und Optimierung eines Verfahrens zur Dekontamination von Beton aus kerntechnischen Anlagen mit Erprobung im Kontrollbereich eines KKW zur Verminderung des endzulagernden Anteils (BedeKon-2) TP: Upscaling und Optimierung des elektrochemischen Recyclings der flüssigen Prozessmedien"	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 742.306,63 €
Projektleiter/-in: Dipl.-Chem. H.–J. Friedrich	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: hans-juergen.friedrich@ikts.fraunhofer.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Zuge des kerntechnischen Rückbaus fallen je Standort jeweils zwischen mehreren hundert und mehreren tausend t von radioaktiv kontaminiertem Beton an, der endzulagern ist. Hierdurch wird ein erheblicher Teil der ohnehin eng begrenzten Endlagerkapazität beansprucht, was zudem mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Im Vorläuferprojekt „BeDeKon“ konnte im Labormaßstab demonstriert werden, dass sich mittels geeigneter Dekontaminationstechnologie das Volumen der endzulagernden Betonfraktionen um mehr als 60% vermindern lässt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll das Verfahren in den Technikums-/Pilotmaßstab überführt und im Kontrollbereich eines KKW erprobt werden. Im Zuge dessen soll eine weitere Optimierung hinsichtlich Fraktionierung der erhaltenen mineralischen Fraktionen, Prozessmedienrecycling und nach-Dekontamination der Kiessandfraktion erfolgen.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

- AP010 Projektkoordination
- AP100 Standortlogistik und Genehmigungen
- AP200 Maßstabvergrößerung elektrohydraulisches Verfahren
- AP300 Internes Recycling der flüssigen Prozessmedien
- AP400 Untersuchungen zur Optimierung der Siebschnitte
- AP500 Anlagenerprobung im Kontrollbereich Blöcke 3 und 4 KKW Lubmin
- AP600 Untersuchungen zur Verbesserung der Dekontamination der Mineralphasen
- AP700 Bewertungen, Vorbereitung der Umsetzung in den Pilotmaßstab, Verwertungskonzept

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

- AP010: Das kick-off-Meeting fand am 10.12.2025 statt. Weiterhin gab es mehrere online-Meetings zu organisatorisch-technischen Fragen. Die Verbundpartner verständigten sich auf einen festen Termin für den monatlichen Austausch.
- AP100: Federführend in AP 100 ist die EWN GmbH. Von IKTS wurden Zuarbeiten zu technisch-organisatorischen Fragestellungen geleistet.
- AP200: Die Bearbeitung erfolgt durch den Verbundpartner impulstec GmbH.
- AP300: Die Bearbeitung wurde begonnen. Der größte Teil der Ausrüstungsbeschaffungen wurde eingeleitet und konnte z.T. abgeschlossen werden. Es wurden Konstruktions- und Fertigungsarbeiten für die benötigten elektrochemische Reaktoren durchgeführt.
- AP400: Die Bearbeitung ist entsprechend Arbeitsplanung erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.
- AP500: Die Bearbeitung ist entsprechend Arbeitsplanung erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.
- AP600: Über den Partner EWN GmbH wurde die Probengewinnung eingeleitet. Von IKTS wurde ein Versuchsplan erstellt.
- AP700: Die Bearbeitung ist entsprechend Arbeitsplanung erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP010: Die Bearbeitung wird planmäßig fortgesetzt. Das nächste Verbundmeeting ist im Sommer 2026 geplant.
- AP100: Die Bearbeitung erfolgt durch die EWN GmbH. IKTS liefert zu technische Angaben und Prozessbeschreibungen zu.
- AP200: Die Bearbeitung erfolgt durch die impulstec GmbH. Impulstec und IKTS tauschen sich zu auslegungsrelevanten technischen Aspekten aus.
- AP300: Geplant ist die Fertigstellung der Elektrodialyseure und deren Laborerprobung. Weiterhin wird der Anlagenaufbau für die Technikumsanlage in einem Container im Maschinenhaus der KKW-Blöcke 5 – 8 begonnen und größtenteils abgeschlossen.
- AP400: Im ersten Halbjahr 2026 sind hierzu noch keine Arbeiten vorgesehen.
- AP500: Die Bearbeitung beginnt erst im Jahr 2027.
- AP600: Vorgesehen sind die eingehende Charakterisierung von Betonproben aus dem KKW und die Identifikation von Mineralphasen, die für eine starke Adsorption von Cs-137 verantwortlich zeichnen.
- AP 700: Im ersten Halbjahr 2026 sind hierzu keine Arbeiten vorgesehen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

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

6. Berichte und Veröffentlichungen

-keine-

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9458B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: ImpulsTec GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Maßstabsvergrößerung und Optimierung eines Verfahrens zur Dekontamination von Beton aus kerntechnischen Anlagen mit Erprobung im Kontrollbereich eines KKW zur Verminderung des endzulagernden Anteils (BedeKon-2) TP: Upscaling und Optimierung des Betonaufschlusses mittels Schockwellentechnologie		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 474.392,04 €
Projektleiter/-in: Stefan Eisert		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: stefan.eisert@impulstec.com

1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Zuge des kerntechnischen Rückbaus fallen je Standort jeweils zwischen mehreren hundert und mehreren tausend t von radioaktiv kontaminierten Beton an, der endzulagern ist. Hierdurch wird ein erheblicher Teil der ohnehin eng begrenzten Endlagerkapazität beansprucht. Die Endlagerung ist mit sehr hohen Kosten verbunden. Im BMBF-/FORKA-Verbundprojekt BeDeKon konnte ein Verfahren im Labormaßstab entwickelt und an radioaktiven Betonproben aus dem biologischen Schild von Kernreaktoren erprobt werden, bei mittels sog. elektrohydraulischer Fragmentierung mit nachfolgender Fraktionierung und Kreislaufführung des Prozesswassers eine weitgehende Dekontamination der Kiessandfraktion nachgewiesen werden konnte. Dabei wird die Radioaktivität in der Feinfraktion, dem sog. Zementstein konzentriert. Dies lässt eine signifikante Reduktion der endzulagernden Residualfraktion um mehr als 50% erwarten. Es wird daher vorgeschlagen, eine Maßstabsvergrößerung vorzunehmen und das Verfahren im Kontrollbereich von EWN unter realen Einsatzbedingungen im Rückbau zu erproben. Um dies zu erreichen sind weitere Optimierungen nötig. So muss eine Umstellung auf eine Nassklassierung erfolgen, die Siebschnitte sind zu optimieren und die Behandlung des Prozesswassers und der weiteren flüssigen Prozessmedien (Waschlösungen) ist entsprechend weiterzuentwickeln. Zudem sind Untersuchungen zur Verbesserung der Cs-137 Abtrennung vorzunehmen, da sich dies als limitierender Faktor im Dekontaminationsprozess herausstellte. Das Verfahren bietet perspektivisch Potential für erhebliche Kostenersparnisse auch für die öffentliche Hand.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP200 Maßstabvergrößerung elektrohydraulisches Verfahren (ImpulsTec)
AP210 Entwicklung Pilotanlage
AP220 Aufbau und Inbetriebnahme Pilotanlage in Radebeul
AP230 Aufbau und Inbetriebnahme Pilotanlage in Maschinenhaus Block 7/8

AP400 Untersuchungen zur Optimierung der Siebschnitte
AP410 Optimierung, technologische Umsetzung (ImpulsTec)

AP500 Anlagenerprobung im Kontrollbereich Block 3/4 (alle Partner)
AP510 Umsetzung Schockwellenzerkleinerung in Kontrollbereich Block 1/2 und Anlagenbetreuung (ImpulsTec)

AP700 Bewertung und Verwertungskonzept (alle Partner)

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

AP210 Entwicklung Pilotanlage:

Die Arbeiten zur Auslegung der Pilotanlage wurden planmäßig begonnen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP210 Entwicklung Pilotanlage:

Weiterführung der Konzeptphase für die Pilotanlage, Festlegung auf ein Anlagendesign und Beginn mit Detailkonstruktion, parallel dazu sollen Ideen zur Analgenauslegung im Technikum erprobt werden

5. Bezug zu anderen Vorhaben

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

6. Berichte und Veröffentlichungen

-keine-

Berichtszeitraum: 01.10.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9458C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH Latzower Straße 1 17509 Rubenow		
Vorhabenbezeichnung: VP: Maßstabsvergrößerung und Optimierung eines Verfahrens zur Dekontamination von Beton aus kerntechnischen Anlagen mittels elektrohydraulischer Zerkleinerung einschließlich Kreislaufführung des Prozesswassers und Erprobung im Kontrollbereich eines KKW (BedeKon-2) TP: Standortlogistik, Genehmigungen und Strahlenschutz		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 182.943,66 €
Projektleiter/-in: Karsten Beier		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: karsten.beier@ewn-gmbh.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Im Zuge des kerntechnischen Rückbaus fallen je Standort jeweils zwischen mehreren hundert und mehreren tausend t von radioaktiv kontaminiertem Beton an, der endzulagern ist. Hierdurch wird ein erheblicher Teil der ohnehin eng begrenzten Endlagerkapazität beansprucht, was zudem mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Im Vorläuferprojekt „BeDeKon“ konnte im Labormaßstab demonstriert werden, dass sich mittels geeigneter Dekontaminationstechnologie das Volumen der endzulagernden Betonfraktionen um mehr als 60% vermindern lässt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll das Verfahren in den Technikums-/Pilotmaßstab überführt und im Kontrollbereich eines KKW erprobt werden. Im Zuge dessen soll eine weitere Optimierung hinsichtlich Fraktionierung der erhaltenen mineralischen Fraktionen, Prozessmedienrecycling und nach-Dekontamination der Kiessandfraktion erfolgen.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

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

- AP010 Projektkoordination
- AP100 Standortlogistik und Genehmigungen
- AP200 Maßstabvergrößerung elektrohydraulisches Verfahren
- AP300 Internes Recycling der flüssigen Prozessmedien
- AP400 Untersuchungen zur Optimierung der Siebschnitte
- AP500 Anlagenerprobung im Kontrollbereich Blöcke 3 und 4 KKW Lubmin
- AP600 Untersuchungen zur Verbesserung der Dekontamination der Mineralphasen
- AP700 Bewertungen, Vorbereitung der Umsetzung in den Pilotmaßstab, Verwertungskonzept

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

- AP010: Das kick-off-Meeting fand am 10.12.2025 statt. Weiterhin gab es mehrere online-Meetings zu organisatorisch-technischen Fragen. Die Verbundpartner verständigten sich auf einen festen Termin für den monatlichen Austausch.
- AP100: Federführend in AP 100 ist die EWN GmbH. Von IKTS wurden Zuarbeiten zu technisch-organisatorischen Fragestellungen geleistet.
- AP200: Die Bearbeitung erfolgt durch den Verbundpartner impulstec GmbH.
- AP300: Die Bearbeitung wurde begonnen. Der größte Teil der Ausrüstungsbeschaffungen wurde eingeleitet und konnte z.T. abgeschlossen werden. Es wurden Konstruktions- und Fertigungsarbeiten für die benötigten elektrochemische Reaktoren durchgeführt.
- AP400: Die Bearbeitung ist entsprechend Arbeitsplanung erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.
- AP500: Die Bearbeitung ist entsprechend Arbeitsplanung erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.
- AP600: Über den Partner EWN GmbH wurde die Probengewinnung eingeleitet. Von IKTS wurde ein Versuchsplan erstellt.
- AP700: Die Bearbeitung ist entsprechend Arbeitsplanung erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP010: Die Bearbeitung wird planmäßig fortgesetzt. Das nächste Verbundmeeting ist im Sommer 2026 geplant.
- AP100: Die Bearbeitung erfolgt durch die EWN GmbH. IKTS liefert zu technische Angaben und Prozessbeschreibungen zu.
- AP200: Die Bearbeitung erfolgt durch die impulstec GmbH. Impulstec und IKTS tauschen sich zu auslegungsrelevanten technischen Aspekten aus.
- AP300: Geplant ist die Fertigstellung der Elektrodialyseure und deren Laborerprobung. Weiterhin wird der Anlagenaufbau für die Technikumsanlage in einem Container im Maschinenhaus der KKW-Blöcke 5 – 8 begonnen und größtenteils abgeschlossen.
- AP400: Im ersten Halbjahr 2026 sind hierzu noch keine Arbeiten vorgesehen.
- AP500: Die Bearbeitung beginnt erst im Jahr 2027.
- AP600: Vorgesehen sind die eingehende Charakterisierung von Betonproben aus dem KKW und die Identifikation von Mineralphasen, die für eine starke Adsorption von Cs-137 verantwortlich zeichnen.
- AP 700: Im ersten Halbjahr 2026 sind hierzu keine Arbeiten vorgesehen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

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

6. Berichte und Veröffentlichungen

-keine-

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9444A	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB)			
Vorhabenbezeichnung: 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 qualitätsgesicherten Beprobungsverfahrens			
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2023 bis 30.09.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 739.596,87 (inkl. Projektpauschale) €	
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. Sascha Gentes		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Versuchstände 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, Abtragtiefe, 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 Arbeitsprogramm Punkten)

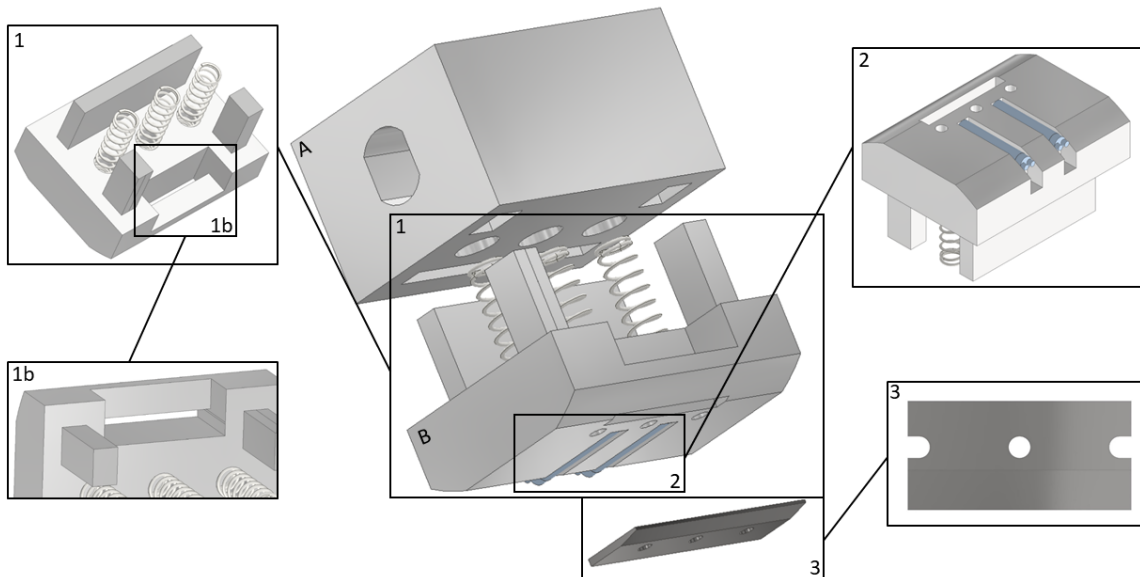


Abbildung 1: Skizze des am TMB konstruierten Beprobungswerkzeugs.

Die über mehrere Iterationsschritte erfolgten Verbesserung des am KIT-TMB konstruierten Beprobungswerkzeugs wurden abgeschlossen und getestet (siehe Abbildung 1). Zwischen die beiden ineinandergreifenden Teilen A und B können Druckfedern unterschiedlicher Härte eingespannt werden, wodurch Unebenheiten im Rohr ausgeglichen werden können. Die ineinandergreifenden Verbindungen zwischen den beiden Teilen sorgen dafür, dass Querkräfte während des Schneidvorgangs aufgenommen werden, da Testreihen zeigten, dass ein Verdrehen bei Werkzeugen mit geklemmter Klinge ein Problem darstellt (Rechteck 1). Die Aussparung direkt unterhalb der Schneidkante der Klinge (Rechteck 1b) behebt das Problem der kontrollierten Spanabfuhr und –sammlung. Zudem kann an dieser Stelle eine Druckluftzufuhr gelegt werden, die das Problem des Wärmestaus während des Schneidprozesses minimiert. Rechteck 2 zeigt zwei Kanäle für Heizelemente, welche die Klinge erwärmen. Erste Testreihen zeigten, dass durch eine erhitzte Klinge eine Verbesserung des Schnittbildes und eine Reduzierung der Schnittkräfte erreicht werden kann. Die Konstruktion ist dabei so ausgelegt, dass ein schneller Klingenwechsel (auch eine Variation der Klingen) möglich ist und die Fixierung über drei Schrauben ein Verdrehen verhindert (Rechteck 3). Die Klinge trifft dabei mit einem Winkel von 20° auf die Innenwand des Rohres und hat einen leichten Überstand. Vorherige Testreihen zeigten, dass dies die besten Ergebnisse liefert, da diese Geometrie sowohl ein zu tiefes Eindringen der Klinge verhindert als auch die Schnittqualität und Spanbildung verbessert. Trotz aller Optimierungen liefert die konstruierte Lösung nicht die gewünschten Ergebnisse. Durch die Größe des Teams am KIT konnten jedoch neben der Verfolgung dieses Prototypens noch weitere Verfahren und Möglichkeiten parallel getestet werden. Durch Versuchsreihen mit unterschiedlichen

Werkzeugen (wie Hobel, Fräser, Sägeblätter und Abstechschwerter) konnten die Grenzen und Probleme der jeweiligen Verfahren getestet und analysiert werden (Abschluss AP7). Hierbei konnten die Abstechschwerter als das vielversprechendste Verfahren identifiziert werden, weshalb die Konstruktion des finalen Beprobungskopfes (AP8) auf dieses Verfahren ausgelegt wird.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die Tests zum Ausbau der Rohrleitungen konnten bisher noch keine befriedigenden Lösungen erzielen, da der Haftverbund Beton-Polypropylen zu stark ist. Hier werden weitere Tests durchgeführt, sowie verschiedene Möglichkeiten analysiert. Zudem wird AP9 der Umbau des Versuchsstandes zum Anpassen an den Prototypen durchgeführt. Sobald dann der Prototyp fertiggestellt ist, werden dann am KIT Versuchsreihen zur Validierung durchgeführt (AP10).

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

KONTEC und Fachartikel Kerntechnik (eingereicht, Veröffentlichung erst 2026)

Berichtszeitraum: 01.08.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9444B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: IBASS GmbH & Co.KG		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2023 bis 30.09.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 117.903,69 €
Projektleiter/-in: Dipl.-HTL-Ing. Michael Strasser		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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, Abtragtiefe, 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 Ausbaupopf 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)

a. 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.

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.

Die Versuche mit beheizten Schneidklingen haben leider auch nicht das gewünschte Ergebnis gebracht, da auch hier die Kräfte zu groß waren und der Spanabtrag auch zu undefiniert erfolgte. Somit wurden weiter Optionen geprüft und Versuche vom KIT durchgeführt.

Schlussendlich fand das KIT Abstechstähle die geringe Kräfte für das zu konstruierende Drehmodul am Roboter erzeugen und somit geeignet erscheinen. Die damit erzeugten Drehspäne sind reproduzierbar und somit für die Probeentnahme geeignet.

b. Erfolgte Arbeiten im 2. Halbjahr 2025

Im zweiten Halbjahr 2025 hat IBASS auf den Input des KIT gewartet und bis auf diverse Besprechungen keine Arbeiten für das Projekt durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

IBASS hat am 05.01.2026 mit der Konstruktion für die Miniaturisierung des Roboters begonnen (AP8) und anhand der vom KIT durchgeführten Versuchsreihen und Ergebnisse (siehe hierzu HJB 2025 II KIT), das Arbeitsmodul mit Abstechstahl vorgesehen.

Die Konzeption wurde anhand der Erfahrungen und der Ergebnisse nun wie folgt angepasst:

- Roboter mit Abstechmeisel für die Probenentnahme im Rohr
- Roboter mit Absaugmodul für das Einsammeln der Probe im Rohr

Beide Roboter werden ähnlich, als Mittelmaschine, aufgebaut und ohne eigenen axialen Antrieb für den Abmessungsbereich von 85 bis 130mm ausgelegt. Der axiale Vortrieb soll mittels einer GFK-Schubstange erfolgen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Derzeit stehen dazu von Seiten IBASS keine Aktivitäten an.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9447A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V.		
Vorhabenbezeichnung: 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 Neutronenflussrechnungen und Experimenten		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2024 bis 30.09.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.355.099,91 €
Projektleiter/-in: Jörg Konheiser		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: j.konheiser@hzdr.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Verbundprojektes EBENE ist es, mit Hilfe von experimentell gestützten Neutronenflussrechnungen die zu erwartenden Aktivitäten durch Aktivierungsreaktionen, die im Leistungsbetrieb aufgetreten sein können, in den Räumen außerhalb des Tragschildes zu bestimmen. Das heißt, dass die Flussrechnung 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 Kreislafes 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 KOBKA 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: In das bestehende Modell des Vorkonvoi-Reaktors wurden die Wände, die Flurebenen und die großen Rohrleitungen der Primärkreislaufäume implementiert. Wegen der Aufnahme der Prüfringe in das Modell (notwendig für die Monitorvergleiche) musste die Eingabestruktur der Zellen im Bereich der großen Durchführungen verändert werden. Dieses hatte auch Auswirkungen auf die Erstellung der Oberflächenquelle, so dass das Konzept angepasst werden musste. Erste Testrechnungen wurden ausgeführt.

AP 3: Aus dem deutschen Referenz-KKW wurden aktivierte Metall- und Betonproben (20 Metallspanproben, 4 Betonbohrkerne, je 2 m lang, ca. 100 Betonmehlproben) entnommen und an das HZDR zur Analyse geliefert.

Die Probenvorbereitung für die Messungen von ^{36}Cl an aktivierten Betonproben mittels Beschleuniger-Massenspektrometrie (AMS) ist abgeschlossen. Die AMS-Messungen sind für Ende Februar 2026 vorgesehen. Die ausgelaugten Proben wurden vollständig charakterisiert, und es wurden zusätzliche Auslaugungsexperimente unter Verwendung von Pulver-Röntgendiffraktometrie durchgeführt. Um die Mikrotomographieergebnisse vor und nach der Auslaugung vergleichen zu können und strukturelle Veränderungen zu quantifizieren sind verschiedene Strategien untersucht worden. Im Rahmen eines Forschungspraktikums einer Masterstudentin wurden Trennmethode für die Analyse von ^{55}Fe und ^{63}Ni mit Flüssigkeitsszintillationszählung an Testproben untersucht und optimiert.

AP 4: Das Serpent-Modell als Zwilling des MCNP-Modells wurde weiterentwickelt und Testsimulationen zur Berechnung der Neutronenfluenzverteilungen wurden durchgeführt. Die Simulationen wurden in drei Schritten durchgeführt: 1. Berechnung der Gewichtungsfenster mit der globalen Varianzreduktionsoption von Serpent, 2. Erzeugung einer zylindrischen Oberflächenquelle entsprechend den radialen und axialen Kerngrenzen und 3. Berechnung der Fluenzverteilung mit Oberflächenquelle und Gewichtungsfenstern. Dieses Schema ermöglichte eine deutliche Beschleunigung der Rechnung. Technisch wurde für alle zukünftigen Arbeiten auch ein Übergang zur neuen Serpent-Version 2.2.3 durchgeführt.

Für die Erzeugung der statischen Verteilungen der Eingabeparameter, die Durchführung von Rechenläufen sowie der statistischen Auswertung wird das GRS-Codepaket SUSA genutzt. Alternativ wurden Funktionalitäten von SUSA auch in Python programmiert und stehen für eine skriptbasierte Durchführung der Unsicherheitsanalyse zur Verfügung. Entsprechend der Aufgabe werden die Radien bzw. die Betondichte des Tragschildes und des biologischen Schildes variiert.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP1: Abschluss der Erweiterung des bestehenden Modells des Vorkonvoi-Reaktors inklusive des Dampferzeugers und der Pumpe. Berechnung von Oberflächenquellen.

AP3: Die aktivierten Betonbohrkerne werden für die weitere Bearbeitung in Zusammenarbeit mit dem VKTA zerkleinert und anschließend für die Analyse aufbereitet.

AMS-Messungen werden durchgeführt. Entsprechende Aktivierungstiefenprofile für ^{36}Cl im Beton werden ermittelt und mit Rechnungen verglichen. Außerdem soll ein radiochemisches Trennverfahren für ^{41}Ca entwickelt werden (für die Messung mit AMS). Dafür stehen Testproben aus dem Kernkraftwerk Greifswald zur Verfügung. Das $^{55}\text{Fe}/^{63}\text{Ni}$ -Trennverfahren wird auf echte aktivierte Betonproben angewendet.

AP4: Im Serpent-Modell werden innerhalb des RDB die Komponenten systematisch aufgelöst und den realen Strukturen angepasst. Außerdem soll das Modell bis zur biologischen Abschirmung erweitert werden. In dem Zusammenhang werden verschiedene Oberflächenquellen und ihre Qualität untersucht, um auch im Bereich der biologischen Abschirmung statistisch abgesicherte Werte zu erreichen.

Für eine statistische Auswertung werden mindestens 93 MCNP-Rechnungen automatisiert durchgeführt und im Anschluss ausgewertet.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Rachamin, R.; Barkleit, A.; Konheiser, J.; Seidl, M.: Neutron activation analysis of metal foils placed inside an ex-core instrumentation channel of a Siemens/KWU PWR. *Nucl. Eng. Technol.* **58** (2026), 103966.

Konheiser, J., Rachamin, R.: Validation of neutron fluence and activation calculations based on activation measurements of German NPP's internal samples. *Eighteenth International Symposium on Reactor Dosimetry*, 18.-23.05.2025, Charleston, South Carolina, USA

Rachamin, R.; Barkleit, A.; Konheiser, J.; Seidl, M.: Evaluation of the in- and ex-vessel neutron fluence distributions in a Siemens/KWU PWR. *Nucl. Eng. Technol.* **57** (2025)12, 103846.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9447B	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Technische Universität Dresden			
Vorhabenbezeichnung: 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			
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2024 bis 30.09.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 265.774,84 €	
Projektleiter/-in: T. Kormoll		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Neutronen-fluenzwerte 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 reaktorkernfernen 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 einem deutschen ehemaligen Kernkraftwerk 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 einem ehemaligen Kernkraftwerk mit vergleichbarer Materialzusammensetzung wie die aktivierten 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)

AP 5.1 und AP 5.2 wurden erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurde sowohl experimentell als auch unter Nutzung einer Simulation die Neutronenquelle charakterisiert. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung miteinander.

In AP 5.3 sollen Betonproben aktiviert und die Aktivität experimentell bestimmt werden. Aufgrund des geringen Wirkungsquerschnitts der Betonbestandteile ist die zu erwartende Aktivität gering. Daher wurde ein Vorgehen entwickelt um die Detektionseffektivität zu erhöhen. Dabei werden die Aktivierungsquellen in einen Szintillator gegossen, sodass alle austretenden Elektronen von diesem erfasst werden. Weiterhin wurde die Oberfläche der eingegossenen Aktivierungsquellen strukturiert um die Anzahl der emittierten Elektronen zu erhöhen.

Der Einfluss der strukturierten Oberfläche auf das Messergebnis wurde experimentell und analytisch untersucht. Es zeigte sich, dass die Abmessungen der Strukturmerkmale im direkten Zusammenhang mit der im Detektor abgegebenen Energie steht. In sehr feinen Strukturen ist die Energiedeposition der zusätzlichen emittierten Elektronen gering und kann vom Detektor größtenteils nicht erkannt werden. Größere Strukturen hingegen führen zu einer signifikanten Erhöhung der Elektronenausbeute. In ersten Experimenten konnte die Elektronenausbeute um 20 % erhöht werden. Eine Analyse des Elektronentransports zwischen den Erhöhungen in der Struktur hat bereits weitere Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Zur Weiterführung von AP 5.3 wird aus der Analyse des Elektronentransports die optimale Struktur ermittelt, um die Effektivität in der Aktivitätsmessung von Beton zu steigern. Neben Aluminium trägt auch das ebenfalls kurzlebige Mangan zur Aktivität des Betons bei. Daher wird die Struktur sowohl an Aluminium als auch an Mangan getestet.

Eine weitere Maßnahme zur Steigerung der Effektivität besteht darin, die Lichtausbeute des Szintillators zu erhöhen. Dabei ist es wichtig, dass möglichst wenig Szintillationsphotonen von der Probe absorbiert werden. Insbesondere Beton reflektiert Licht sehr ineffizient. Um dies zu kompensieren, wird eine reflektierende Farbe auf die Probe aufgetragen. Dabei ist zu beachten, dass die Dicke der Farbschicht deutlich kleiner sein muss als die Reichweite der Elektronen, um Beeinträchtigungen der Elektronen zu vermeiden.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

KOBEKA, EMPRADO

6. Berichte und Veröffentlichungen

Determination of Absolute Activities and Neutron Fluence Rates Using a Coincidence Method, Shokhrukh Mirzo Bakhodirov, Anja Seifert, Dirk Döhler, Pia Kahle, Thomas Kormoll, EPJ Web Conf. 338 07003 (2025) DOI: 10.1051/epjconf/202533807003

Simulation of Activation Experiments in an Irradiation Stand in the Context of Nuclear Decommissioning, Benjamin Keßler, Shokhrukh Mirzo Bakhodirov, Pia Kahle, Steffen Taut, Jörg Konheiser, Thomas Kormoll, EPJ Web Conf. 338 07005 (2025) DOI: 10.1051/epjconf/202533807005

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9447C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: PreussenElektra GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Experimentell gestützte Berechnungen von Neutronenfeldern und den daraus resultierenden Aktivitäten in reaktorfernen Räumen (EBENE) TP: Probenahme und Bewertung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2024 bis 30.09.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 34.376,54 €
Projektleiter/-in: Marcus Seidl		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 KOBKA 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: Alle geplanten Beprobungen wurden durchgeführt (Kernbohrungen, Bohrmehlproben, Stockerproben) und den Projektpartnern übergeben.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Sobald die Auswertung aus den anderen Arbeitspaketen vorliegt, erfolgt eine Bewertung hinsichtlich des praktischen Nutzens für die Rückbauplanung und Entsorgung eines ehemaligen Kernkraftwerks. Sofern seitens der Projektpartner noch Interesse besteht, können weitere Proben genommen werden.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine Veröffentlichungen im Berichtszeitraum.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9451A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)		
Vorhabenbezeichnung: VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Systemkonzept, Test, Optimierung, Validierung und Transfer (ZfP-Rückbau)		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2025 bis 31.12.2027	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 453.537,25 €	
Projektleiter/-in: Dr. Ernst Niederleithinger	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 2×32-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 2×32-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: Projektergebnisse 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 Arbeitsprogramm Punkten)

AP2.1: Die Konzeption des Laborprobekörpers ist abgeschlossen. Das Vergabeverfahren an der BAM für den Bau durch eine externe Firma wurde im Dezember 2025 gestartet. Ein Angebot liegt inzwischen vor und die fachliche Zustimmung zur Beauftragung wurde erteilt.

AP2.2: Die Inbetriebnahme des Halbkugelscanners (Abbildung 1) zur Bestimmung der Abstrahlcharakteristik der 25 kHz Einzelsensoren von ACS wurde erfolgreich abgeschlossen. Mit der Vermessung eines Einzelsensors an einer Polyamidhalbkugel sowie der Auswertung der gemessenen Ultraschallsignale wurde begonnen (Abbildung 1). Abbildung 2 zeigt die Abstrahlcharakteristik der Scherwelle für einen Einzelsensor entlang der beiden orthogonalen Hauptachsen (x- und y-Richtung) in einem Polardiagramm. Das Schallfeld ist in der y-Achse polarisiert.

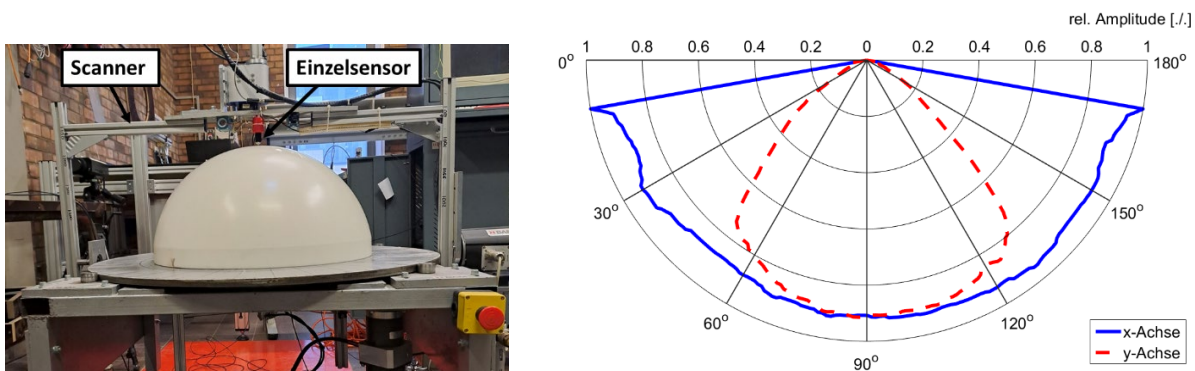


Abbildung 5: Bestimmung der Abstrahlcharakteristik der 25 kHz Einzelsensoren von ACS. Links: Halbkugelscanner mit Polyamidhalbkugel und Einzelsensor (in der roten Halterung); Rechts: Berechnete Abstrahlcharakteristik der Scherwelle in einem Polardiagramm.

Das Ultraschallscannersystem für die vollautomatische Messdatenaufnahme mit den zwei 32-Kanal-Arrays wurde vollständig konzipiert (Abbildung 2). Mit dem System werden sowohl Linien- als auch Flächenmessungen an den Seitenwänden des Laborprobekörpers möglich sein. Das Scannersystem ist auch für horizontale Messungen ausgelegt. Die Vergabeverfahren an der BAM für die Konstruktion des Scanners sowie für die Programmierung der Steuerungssoftware durch externe Firmen wurden im Dezember 2025 gestartet. Ein Angebot für die Software liegt inzwischen vor; die fachliche Zustimmung zur Beauftragung wurde erteilt.

AP2.3: Die Prototypen des Ultraschallsensorsystems konnten bislang noch nicht getestet werden, da sie vor Ort an der BAM derzeit noch nicht verfügbar sind. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf den Zeitplan oder die Zielerreichung des Vorhabens.

AP4.1 - 4.3: Keine signifikante Tätigkeit.

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.

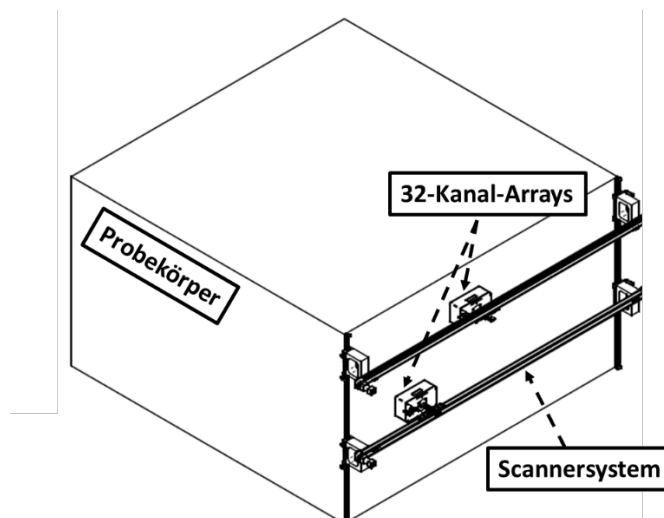


Abbildung 6: Konzipiertes Ultraschallscannersystem für Linien- und Flächenmessungen an den Seitenwänden des Laborprobekörpers.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP2.1: Der Bau des Laborprobekörpers soll im März 2026 auf dem Testgelände der BAM in Horstwalde abgeschlossen werden.

AP2.2: In einem nächsten Schritt sind die Vermessung einer Vierer-Sensorreihe sowie die Untersuchung der Abstrahlcharakteristiken an einer Betonhalbkugel vorgesehen. Parallel dazu erfolgen die Konstruktion des Scannersystems sowie dessen Inbetriebnahme am Laborprobekörper. Darüber hinaus ist die erfolgreiche Abnahme der Steuerungssoftware geplant.

AP2.3: Es sind Messungen am Laborprobekörper mit den 32-Kanal-Arrays geplant. Diese erfolgen zunächst in Form von Handmessungen und anschließend mittels automatisierter Scannermessungen.

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 ist ein Konferenzbeitrag und für 2026 mindestens eine wissenschaftliche Publikation geplant.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9451B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Mondaic AG	
Vorhabenbezeichnung: VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Innovative bildgebende Verfahren für die Ultraschalltomographie	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2025 bis 31.12.2027	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 293.579,11 €
Projektleiter/-in: Dr. Christian Böhm	E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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 25 kHz DPC-Wandler und darauf basierender 2×32-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 2×32-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: Projektergebnisse 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 Arbeitsprogramm Punkten)

Der detaillierter Projektplan für AP3 ist in Abbildung 1 gegeben.

Arbeitspaket		Aufgabe	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Verbundpartner			Einbindung RWE
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	BAM	Mondaic	ACS	
AP3	Auswertungs- und Abbildungsverfahren	AP3.1 Entwicklung eines digitalen Zwillings der Array-Prüfköpfe und des Ultraschall-Messsystems				M3.1										x	x	
		AP3.2 Methodenentwicklung anhand simulierter Daten: FWI und Migration													x	x		
		AP3.3 Methodenoptimierung anhand von Labormessdaten								M3.2					x	x		
		AP3.4 Test der Auswertemethodik an realen Daten (Daten aus AP2.4)													x	x	x	x
		AP3.5 Finale Optimierung der Auswertemethodik											M3.3		x	x		

Abbildung 7 Gantt-Chart von Arbeitspaket AP3

AP3.1 konnte das Quellsignal der Prüfköpfe erfolgreich für die Simulation kalibriert werden. Dabei wurde Messungen mit einem Laser-Doppler-Vibrometer an einem Block aus Polyamid von der BAM zur Verfügung gestellt. Zudem wurden Methoden zur numerischen Gittergenerierung von Bauteilen mit Leitungen in stark streuendem und stark bewehrtem Beton mit verschiedenen Tiefenlagen weiterentwickelt und die Geometrie für erste digitale Testkörper auf Grundlage von AP2.1 erfolgreich aufgesetzt. Hierbei wurde insbesondere mit unterschiedlichen Bewehrungsdichten experimentiert und das Streuverhalten des Ultraschallfeldes simuliert. Durch die Kalibrierung der Schallkopfcharakteristik und der elastischen Eigenschaften anhand von Zwischenergebnissen aus AP1.2 und AP2.1 konnte Arbeitspaket **AP3.1** erfolgreich abgeschlossen werden.

In **AP3.2** wurden mehrere Testkonfigurationen des Probekörpers erfolgreich validiert. Hierbei konnte die Wellenforminversion zuverlässig die Lage und den Durchmesser von Bohrungen identifizieren (Abbildung 2). Die Ergebnisse beziehen sich bislang auf einen vereinfachten Aufbau ohne Bewehrung. Der Workflow für das bildgebende Verfahren konnte weitgehend automatisiert werden.

In einer Sensitivitätsanalyse wurden unterschiedliche Messanordnungen und Polarisierung der Ultraschallgeber getestet. Dies ist für die Erarbeitung einer Prüfanweisung relevant, da hierdurch der Einfluss der Polarisierung (x-line vs in-line) und die Rotation des Messsystems relativ zum Verlauf der Rohrleitung analysiert werden kann (Abbildung 3).

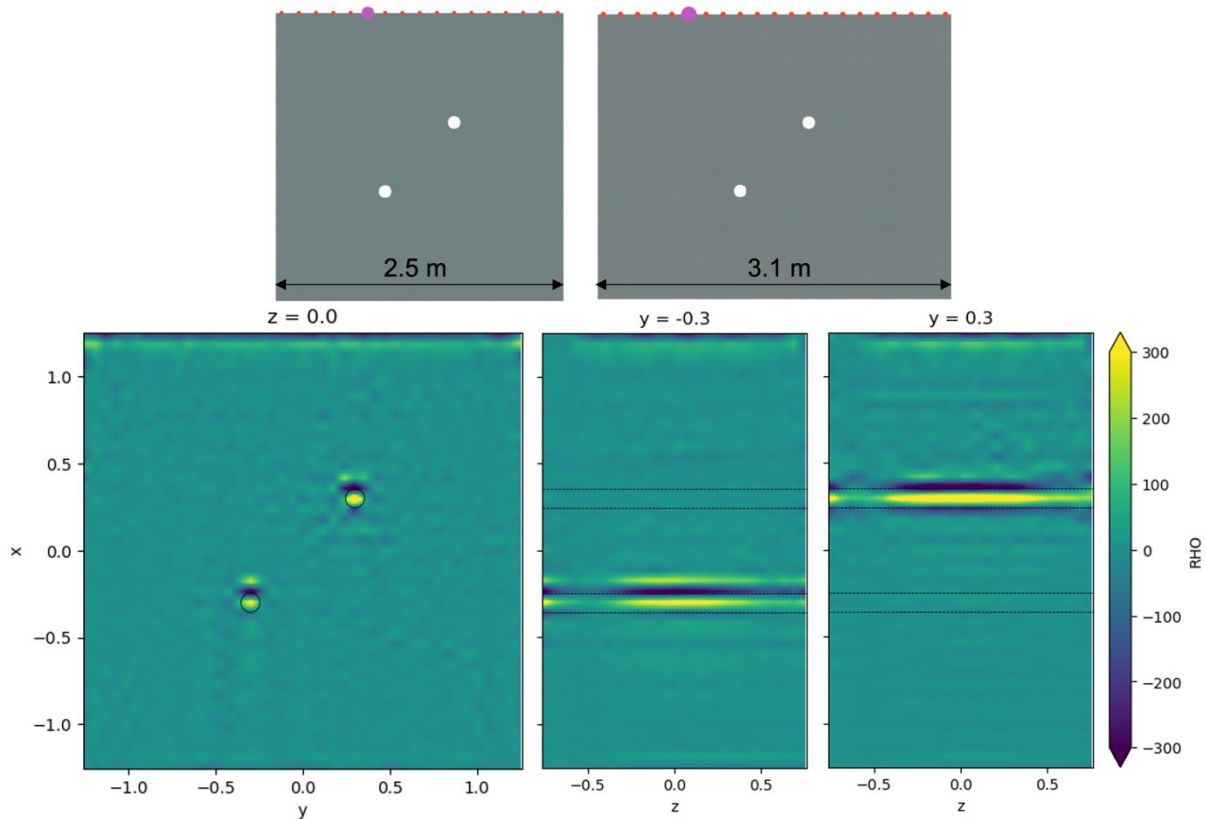


Abbildung 8 Rekonstruktion der Bohrungen mittels Wellenforminversion. Lage, Durchmesser und Impedanzkontrast lassen sich mit guter Genauigkeit bestimmen.

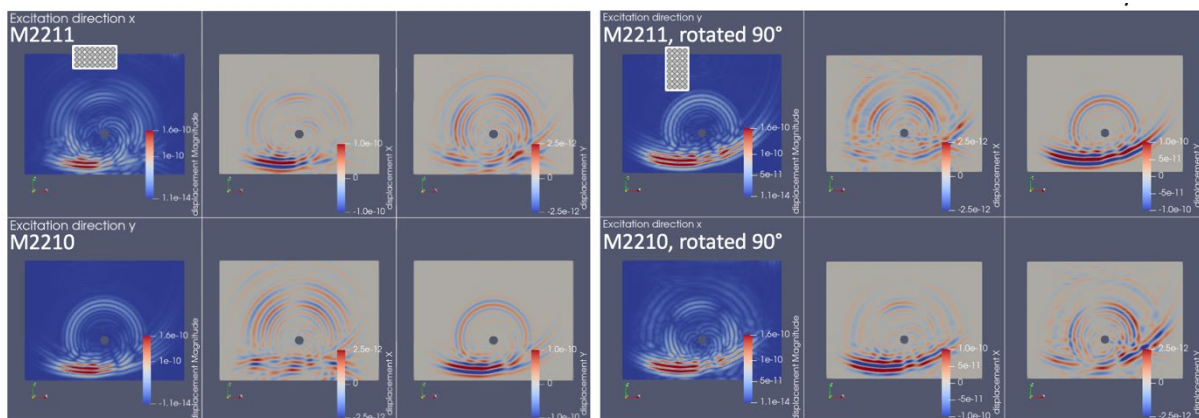


Abbildung 9 Sensitivitätsanalyse für unterschiedliche Messanordnungen und Polarisation M2210 (S-xline) und M2211 (S-inline).

In **AP3.3** konnten bereits erste Ergebnisse mit Labormessungen des Mira 3D Pro erzielt werden.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP3.2: In erweiterten synthetischen Tests sollen mithilfe der Wellenforminversion Kenngrößen für die Zustandsermittlung (z.B. Geometrie der Einbauteile, Materialdichte, Wellengeschwindigkeit) abgeleitet und identifiziert werden.

AP3.3: Die Erkenntnisse aus AP2.2 werden auf Labormessdaten aus AP1.4 angewendet und die Auswertemethoden verifiziert und weiter angepasst. Dies beinhaltet:

- Anpassung der digitalen Zwillinge an reale Labormessungen aus AP1.4 (inklusive Quell-Charakteristik) zur realitätsnahen Simulation.

- Auswertung der Labormessdaten anhand des in AP2.2. entwickelten Schemas mit FWI, Migrationsmethoden, Kombination sowie Vergleich mit herkömmlichen ZfP Verfahren (M3.2).
- Ableitung von Kenngrößen für die Zustandsermittlung (für AP3.1) und Verifizierung durch bekannte Parameter der Laborprobekörper (aus AP1.2 / AP1.3).

AP3.4: Für die Tests der Auswertemethoden an realen Daten wird zunächst auf historische Daten des Mira 3D Pro zurückgegriffen bis neue Messungen mit dem Prototyp auf dem Testgelände der BAM zur Verfügung stehen.

AP4.1/4.2/4.3: Zur Bewerbung der im Projekt entwickelten Technologie sowie für den wissenschaftlichen Austausch ist im Jahr 2026 die Teilnahme and mindestens zwei Fachtagungen bzw. Messen geplant.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9451C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: ACS-Solutions GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Zerstörungsfreie Prüfung für einen effektiven Rückbau massiver Betonbauwerke kerntechnischer Anlagen (ZfP-Rückbau) TP: Innovatives Prüfsystem für die Ultraschalltomographie an massiven Betonbauwerken		
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2025 bis 31.12.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 344.243,87 €
Projektleiter/-in: Dr. Andrey Bulavinov		E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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 2×32-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 2×32-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: Projektergebnisse 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 Arbeitsprogramm Punkten)

Abbildung 1 stellt die im Berichtszeitraum durchzuführende Arbeiten gemäß Projektplan dar.

Arbeitspaket		Aufgabe	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3				Verbundpartner			Einbindung RWE
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	BAM	Mondaic	ACS	
AP1	Ultraschall-Messgerät: Elektronik & Software	AP1.1 Entwicklung von spezialisierten DPC Wandlern (Transversallwelle, Mittenfrequenz 25 KHz)																x
		AP1.2 Konstruktion und prototypischer Aufbau des Ultraschall-Sensorsystems aus zwei Array-Prüfköpfen				M1.1									x		x	
		AP1.3 Entwicklung und Design der 2 x 32-kanaligen Datenaufnahme-Elektronikmodule inklusive Entwicklung von Kanalleiterplatten und Gerätegehäuse													x		x	
		AP1.4 Implementierung Steuerungs- und Datenaufnahmesoftware								M1.2								x
		AP1.5 Implementierung der Applikationssoftware für den praktischen Einsatz inkl. Datenverarbeitung und Digitalisierung													x	x	x	
		AP1.6 Inbetriebnahme und Test der entwickelten Ultraschall-Messgeräte (Hardware/Software)												M1.3	x	x	x	

Abbildung 10. Arbeitsplanung im AP1

3.1 Ausführung des Arbeitspakets AP1.2

Im Rahmen des Arbeitspakets „AP1.2 Konstruktion und prototypischer Aufbau des Ultraschall-Sensorsystems aus zwei Array-Prüfköpfen“) wurden zwei passive (extern ansteuerbare) Sensor-Arrays mit jeweils 32 DPC-Wandlern konstruiert und hergestellt. Folgende Arbeiten wurden im Rahmen des Arbeitspaketes ausgeführt und erfolgreich fertiggestellt:

- Entwicklung neuer Wandlerarrays auf Basis der Erfahrungen mit dem LAUS-System mit verbesserter Signal- und Richtcharakteristik
- Bau zweier passiver niederfrequenter Array-Prototypen zu integriertem 32-Kanal-Messsystem (Meilenstein M1.1)
- Generierung erster Messdaten zur Überprüfung der angestrebten Abstrahl- und Empfangscharakteristik und Nutzung in AP2 und AP3 mithilfe des Ultraschallprüfgerätes A1220 MONOLITH, noch im passiven Modus



Abbildung 11. Zwei neugebaute 32-kanalige passive Sensorarrays auf der Basis der 25 kHz DPC-Wandler im Vergleich zu den „alten“ 50 KHz Wandlern

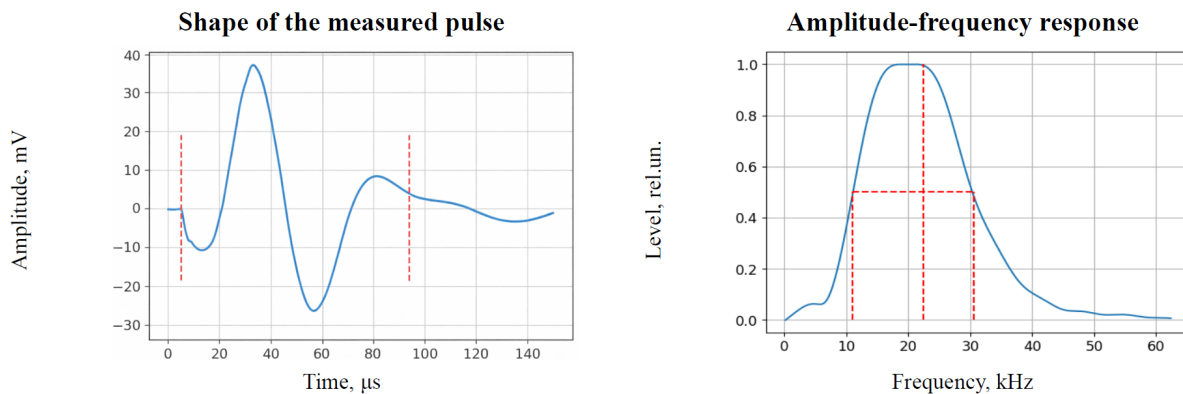


Abbildung 12. Impuls- und Frequenzcharakteristiken der 32-kanaligen Wandler-Arrays

3.2 Ausführung des Arbeitspakets AP1.3

Im Rahmen des Arbeitspakets „AP1.3 Entwicklung und Design des 2 x 32-kanaligen Datenaufnahme-Elektronikmodule“ wurde mit der Entwicklung der zwei aktiven 32-Kanalgeräten mit automatischer Messung und Datenaufzeichnung sowie kompatibler Hardware und kompaktem Gerätegehäuse angefangen. Folgende Arbeiten wurde im Rahmen des Arbeitspaketes angefangen:

- Entwicklung des „Full-Matrix-Capture“ Messprinzips für die in AP1.2 entwickelten 4 x 8 Sensoranordnung
- Entwicklung der aktiven Sende-Empfang-Kanalplatinen, sowie Weiterentwicklung bzw. Modifikation weiterer Elektronikmodule wie Cross-Platine, Systemplatine, Netzwerkplatine, Powerplatine.
- Design und Herstellung von analogen Kanalleiterplatinen, die mit den neuen Ultraschallwandlern kompatibel sind
- Konstruktion und Herstellung der Gerätegehäusen für zwei 32-kanalige Wandlerarrays inklusive neuer DPC-Sensoren und Kanalleiterplatten

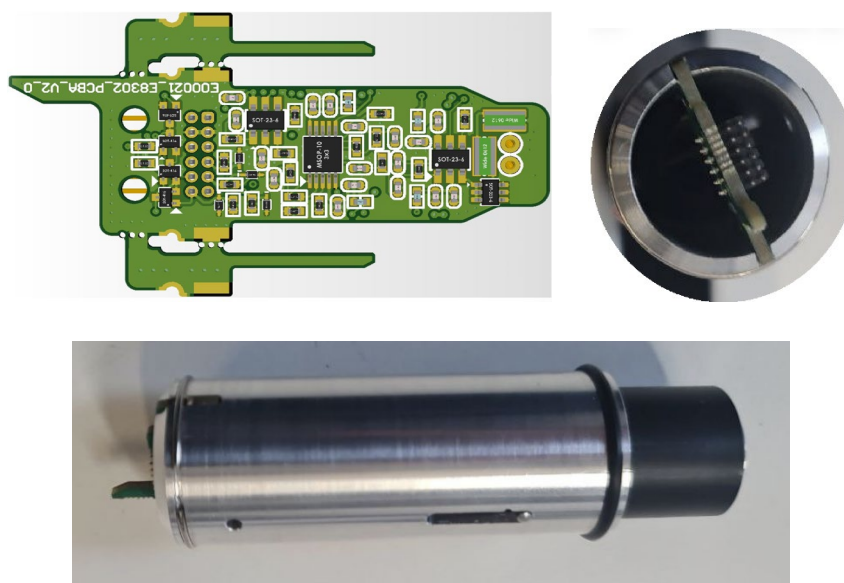


Abbildung 13. Aktive Sende-Empfang-Kanalleiterplatine eingebaut in das neue Sensorgehäuse



Abbildung 14. Entwickelte und Hergestellte Cross-Platine zum Anschließen von 32 Kanalleiterplatten

Im Berichtszeitraum wurden im AP1.3 die zwei oben angeführte Elektronikmodule fertiggestellt. Die Entwicklung weiterer Elektroniken wird fortgesetzt und soll gemäß Projektplanung am Ende des 2. Quartals 2026 fertiggestellt werden.

Des Weiteren wurde Berichtszeitraum mit der Entwicklung des Gerätegehäuse begonnen. Diese wird im 1. und 2. Quartal 2026 fortgesetzt und fertiggestellt.

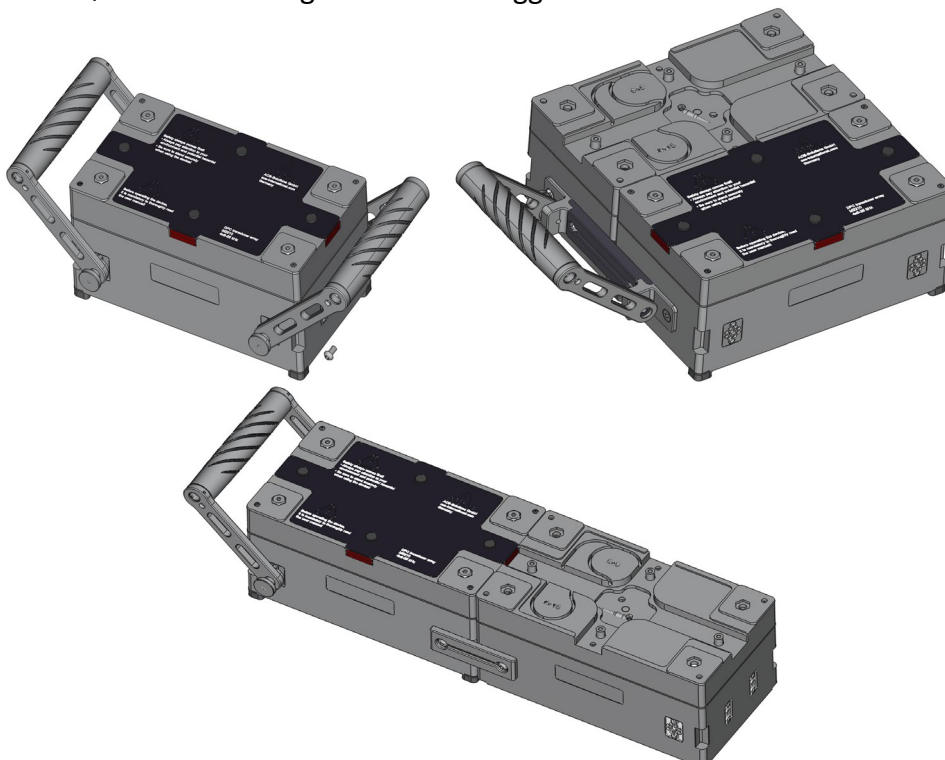


Abbildung 15. Gehäuse-Designs des in verschiedenen Apertur-Varianten

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP1.3: Entwicklung und Fertigstellung der 2 x 32-kanaligen aktive Datenaufnahmeeinheiten inklusive im p. 3.2. genannte Elektronikmodule.

AP1.4: Entwicklung der Steuerungs- und Datenaufnahmesoftware für die Datenaufnahmegeräte.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Für den aktuellen Berichtszeitpunkt liegen keine Veröffentlichungen vor.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9455A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Hellma Materials GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Weiterentwicklung und Optimierung vorhandener Detektionssysteme		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 505.058,21 €
Projektleiter/-in: Dr. Sibylle Petrak		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: Sibylle.Petrak@hellma.com

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, Detektionssysteme für Aufgaben der radiologischen Charakterisierung im Rückbau kerntechnischer Anlagen bis hin zu den Entscheidungs-messungen zu entwickeln, zu erproben und für Bedarfsträger anwendbar zu machen. Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit werden systematisch getestete, normenkompatible Messgeräte auf Basis von Szintillationsdetektoren entwickelt. Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt bei Entscheidungsmessungen für die Gebäudefreigabe. Die Funktionalität der Geräte wird in ausgewählten Fallbeispielen in enger Zusammenarbeit mit Bedarfsträgern demonstriert, beginnend mit Use Case 1, einer 10 m²-Standardmessung in der Gebäudefreigabe.

Vorhandene Detektionssysteme werden von Hellma Materials weiterentwickelt und optimiert. Die Detektionssysteme stehen dem Projektverbund zur Durchführung systematischer Tests und für den Einsatz und Erprobung in Rückbauprojekten zur Verfügung. 12 Monate nach Projektbeginn wird anhand der Ergebnisse des Forschungsvorhabens ein optimiertes Gerät entworfen und gebaut.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP1: Detektor- und Gerätebau
 AP2: Softwareentwicklung
 AP3: Systematische Tests
 AP4: Einsatz in kerntechnischen Anlagen
 AP5: Lösungsorientierte Technikbewertung
 AP6: Integration in Rückbau-Prozesse und Validierung
 AP7: Wirkungsorientierte Maßnahmen und Standardisierung

Meilensteine im Berichtszeitraum:

M1: 20.12.25 – Use Case 1 (Gebäudefreigabe) spezifiziert

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

Die Projektpartner haben eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen.

Am 13.-14. November 2025 fand das Kick-off-Meeting für das scintLaCHARM-Projekt bei der Hellma Materials GmbH in Jena statt.

Im Rahmen der Arbeiten zu den Fallbeispielen wurde der Use Case 1 für die 10 m²-Standardmessung der Gebäudefreigabe spezifiziert. Damit wurde Meilenstein 1 aus dem Arbeitsplan erreicht.



Abb 1. ScintLaCHARM-Projektgruppe beim Kick-off-Meeting am 13.-14.11.25
bei der Hellma Materials GmbH in Jena.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP 1: In Absprache mit den Projektpartnern wird ein vorhandenes Detektionssystem auf die Anforderungen bzgl. der geplanten Arbeitsaufgaben angepasst. In der Datenakquisitionsoftware wird ein neuer Trigger programmiert, der die Menge an aufgezeichneten Daten (speziell der Koinzidenzdaten) vergrößert. Ferner wird das Detektionssystem mit einem Laptop ausgestattet, der von allen Projektpartnern genutzt werden kann.

Hellma Materials GmbH hat von der Projektgruppe am Fraunhofer-Institut FKIE einen Digitalen Multikanalanalysator (GammaStream) erhalten. Dieser wird in Verbindung mit einem CeBr₃-Detektor genutzt und unterstützt geplante Arbeiten für ein CeBr₃ In-situ-Gammaspektrometer. Es ist geplant, die Daten des Gammaspektrometers in ein iPhone/iPad zu streamen und ein Echtzeit-Indoor-Tracking durchzuführen. Die Echtzeit-Positionsbestimmung ermöglicht ein Indoor Mapping gammaspektrometrischer Daten. Diese Funktionalität soll genutzt werden, um 3D-Strahlungskataster von kerntechnischen Anlagen zu erstellen.

AP 2, 3: Die Arbeiten zum Use Case 1 (10 m²-Messung Gebäudefreigabe) werden fortgesetzt. Im nächsten Berichtszeitraum (01.01.2026 – 30.06.2026) sollen folgende Meilensteine erreicht werden:

M2: 01.03.26 – Testverfahren zum Use Case 1 ausgearbeitet

M3: 01.05.26 – Software für Use Case 1 liegt vor

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Hellma Materials GmbH hat zuvor das Projekt 15S9431 A ausgeführt.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Berichte und Veröffentlichungen zum Vorgängerprojekt 15S9431 A:

- Für die von der Zeitschrift *Kerntechnik* geplante Sonderausgabe zu den FORKA-Forschungsprojekten wurde ein Manuskript mit dem Titel „Development of a Compton camera supporting the decommissioning of nuclear facilities with advanced radiological measurements“ eingereicht.
- In Zusammenarbeit mit Transition Technologies PSC S.A. wurde ein [Bericht](#) über die 3D-Visualisierung von Daten der Detektionssysteme mit einer Augmented-Reality-Applikation veröffentlicht.
- Auf Einladung des Projektpartners Brenk Systemplanung GmbH wurden die vorhandenen Detektionssysteme der Hellma Materials GmbH in Form einer [Videopräsentation](#) auf dem KONTEC-Symposium 2025 in Dresden vorgestellt.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9455B	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Brenk Systemplanung GmbH			
Vorhabenbezeichnung: VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Erprobung und Einsatz der Detektionssysteme in kerntechnischen Anlagen			
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 65.053,74 €	
Projektleiter/-in: Dr. Stefan Wörten		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: s.woerlen@brenk.com	

1. Zielsetzung des Vorhabens

Der Projektname scintLaCHARM ist ein Akronym für „Scintillation detector-based Localization and Characterization of Radioactive Material“. Es sollen Szintillationsmessgeräte entwickelt werden, die einen neuen Stand der Technik bezüglich der Detektortechnologie und der eingesetzten Verfahren darstellen und klare wirtschaftliche Vorteile für den Rückbau besitzen. Im Projekt werden zwei Gerätetypen betrachtet:

- a) In-situ-Gammaspektrometer
- b) Gammakameras

Gammakameras schließen üblicherweise die Funktionalität eines Spektrometers ein; sind darüber hinaus aber auch bildgebende Geräte, die eine Aktivitätsverteilung räumlich abbilden können.

1. Vorhandene Detektionssysteme aus dem Verbundprojekt Projekt 15S9431A werden von der Hellma Materials GmbH weiterentwickelt und optimiert. Die Detektionssysteme stehen dem Projektverbund zur Durchführung systematischer Tests und für den Einsatz und Erprobung in Rückbauprojekten zur Verfügung.
2. Es sollen Szintillationsmessgeräte mit folgenden Funktionalitäten entwickelt werden:
 - Gammaaktivitätsbestimmungen radioaktiver Materialien und Reststoffe,
 - Gammakameras für die radiologische Charakterisierung und Entscheidungsmessung von Gebäuden in der Rückbauplanung und Erfolgskontrolle,
 - Detektormodule als Grundbausteine für Gammakameras und Gammascanner mit flexiblen Gestaltungs- und Verwendungsmöglichkeiten.
3. Die Geräte sollen professionell nach standardisierten Vorschriften getestet werden bzw. in Anlehnung an die Anforderungen einschlägiger Normen charakterisiert werden. Insofern geeignete Vorschriften oder Normen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht verfügbar sind, werden Entwürfe für Tests, Prüfungen oder zur Bestimmung von Kennzahlen im Projektverbund erarbeitet und in einer Erstversion formuliert.
4. Die Funktionalität der Geräte soll in ausgewählten Fallbeispielen in enger Zusammenarbeit mit Bedarfsträgern aus dem Rückbau demonstriert und kontinuierlich verbessert werden, beginnend mit Use Case 1, einer 10 m²-Standardmessung in der Gebäudefreigabe.
5. Es werden Maßnahmen durchgeführt, um die Zielgruppe aus dem Rückbau über Einsatzmöglichkeiten von Szintillationsmessgeräten zu informieren, die Akzeptanz für Szintillationsmessgeräte zu erhöhen und deren Verankerung im für den Rückbau relevanten Normenwerk zu festigen.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm des Verbundvorhabens ist in sieben Arbeitspakete untergliedert:

AP 1: Detektor- und Gerätebau

AP 2: Softwareentwicklung

AP 3: Systematische Tests

AP 4: Einsatz in kerntechnischen Anlagen

AP 5: Lösungsorientierte Technikbewertung

AP 6: Integration in Rückbau-Prozesse und Validierung

AP 7: Wirkungsorientierte Maßnahmen und Standardisierung

Die Brenk Systemplanung GmbH (BS) ist hauptsächlich für die folgenden Aspekte zuständig.

- AP 1, AP 2, AP 3, AP 5 und AP 7:
Beratung der Projektpartner in Bezug auf praxisrelevante Aufgabenstellungen und Anforderungen.
- AP 4: Koordination und Durchführung des Einsatzes in kerntechnischen Anlagen
Die aus dem Forschungsvorhaben QGRIS bereits bei dem Projektpartner Hellma vorhandenen Gammakameras, das im Projekt neu angefertigte CeBr_3 In-situ-Gamma-spektrometer und die im Projekt neu entwickelte Gammakamera werden in der Praxis, geprüft, d. h. Messungen in kerntechnischen Anlagen oder Anlagen mit Strahlenschutzgenehmigung durchgeführt und die Geräte in der Praxis zu prüfen. Die Einsätze werden mit den Projektpartnern koordiniert, um die Verfügbarkeit der Geräte für die anderen APs, den Erfahrungsrückfluss an die Projektpartner und die Ausbildungsmöglichkeiten der Doktoranden der Projektpartner sicherzustellen.
- AP 6: Integration in Rückbau-Prozesse und Validierung
Um sicherzustellen, dass die Geräte in die Rückbau-Prozesse integriert werden können und dort ihren Platz im Prozessablauf finden, wird BS eine Liste von Use Cases erstellen und dafür typische Messaufgaben (z.B. Messgeometrie, Abstand, relevante Nuklide, Verteilung der Aktivität, Messzeit, erforderliche Nachweisgrenze und Winkelauflösung) definieren. Die Use Cases behandeln konkrete Aufgabenstellungen und Erwartungen von Akteuren aus dem Rückbau an die Funktionalität der Geräte.

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

- AP 1, AP 2, AP 3:
Beratung der Projektpartner ist erfolgt, mit Schwerpunkten auf die Definition von Use Case 1 und Input zu den Anforderungen an die Softwareentwicklung. Dazu erfolgte auch die Teilnahme am Kick-off-Meeting 13.-14.11.2025.
- AP 6:
Die Ausarbeitung von Use Case 1 ist termingerecht zum 20.12.2025 erfolgt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP 1, AP 2, AP 3, AP 5 und AP 7:
Die Beratung der Projektpartner in Bezug auf praxisrelevante Aufgabenstellungen und Anforderungen wird weitergeführt (AP 1, AP 2, AP 3) bzw. begonnen (AP 5 und AP 7).
- AP 4:
Für das Jahr 2026 sind je nach Verfügbarkeit 1 bis 2 Testreihen bei Anlagenbetreibern vorgesehen.
- AP 6:
Die Ausarbeitung von Use Cases wird weitergeführt.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Ein Partner des Verbundprojekts (Hellma Materials GmbH) hat zuvor das Projekt 15S9431 A ausgeführt. Es haben sich im Berichtszeitraum keine relevanten Bezüge zu anderen Forschungsvorhaben ergeben.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Es sind im Berichtszeitraum keine relevanten Berichte und Veröffentlichungen der Brenk Systemplanung GmbH entstanden.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9455C	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Physik			
Vorhabenbezeichnung: VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Entwicklung eines neuen Detektionssystems mit verbesserten Eigenschaften			
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.25 bis 30.09.28		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 626.440,56 €	
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Uwe Oberlack		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: oberlack@uni-mainz.de	

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, Detektionssysteme für Aufgaben der radiologischen Charakterisierung im Rückbau kerntechnischer Anlagen bis hin zu den Entscheidungs-messungen zu entwickeln, zu erproben und für Bedarfsträger anwendbar zu machen. Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit werden systematisch getestete, normenkompatible Messgeräte auf Basis von Szintillationsdetektoren entwickelt. Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt bei Entscheidungsmessungen für die Gebäudefreigabe. Die Funktionalität der Geräte wird in ausgewählten Fallbeispielen in enger Zusammenarbeit mit Bedarfsträgern demonstriert, beginnend mit Use Case 1, einer 10 m²-Standardmessung in der Gebäudefreigabe.

Die Winkelauflösung von Compton-Kameras hängt von der Energie- und Positionsauflösung der Wechselwirkungspunkte ab. CeBr₃ ist ein sehr lichtstarker Szintillationskristall mit hoher Effizienz für Gammadetektion aufgrund seiner hohen effektiven Ladungszahl und Dichte. Plastiksintillatoren sind weniger lichtstark aber dafür sehr schnelle Szintillatoren, deren geringe effektive Ladungszahl sie als Streudetektor geeignet machen. Die bisherigen Modelle aus dem Vorläuferprojekt QGRIS bestanden aus Kombinationen von 3“-Detektoren aus Plastik- und CeBr₃-Szintillatoren, die von jeweils einem einzigen PMT einseitig ausgelesen wurden. Zwar waren diese Kameras aufgrund ihrer Modulgröße sehr effizient, sie waren aber durch ihre grobe Positionsauslösung in der Winkelauflösung stark limitiert, und haben einen Teil ihrer Effizienz durch Vielfachstreuung in den Detektormodulen eingebüßt. Ein modifizierter Ansatz mit Vielkanalauslese von Silizium-Photomultipliern (SiPMs) auf beiden Seiten der Szintillatoren soll die Positionsauflösung um mehr als zwei Größenordnungen verbessern, und damit die Winkelauflösung der Kamera in die Nähe der durch die Energieauflösung und Dopplerverbreiterung gegebenen physikalischen Grenze zu bringen. Angesichts der hohen Zeitauflösung der Plastiksintillatoren aber auch von CeBr₃ wollen wir zudem versuchen, eine Unterscheidung der Flugrichtung der Gammaphotonen zu erzielen.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

- AP1: Detektor- und Gerätebau
- AP2: Softwareentwicklung
- AP3: Systematische Tests
- AP4: Einsatz in kerntechnischen Anlagen
- AP5: Lösungsorientierte Technikbewertung

AP6: Integration in Rückbau-Prozesse und Validierung
 AP7: Wirkungsorientierte Maßnahmen und Standardisierung

Meilensteine im Berichtszeitraum:

M1: 20.12.25 – Use Case 1 (Gebäudefreigabe) spezifiziert

Die JGU Mainz verantwortet das AP 1.3 Detektorneuentwicklung und partizipiert in AP 2.2, AP 3 und AP 4. Geplant sind die folgenden Teilaufgaben (TA):

1. Detektoroptimierung mit Monte-Carlo-Simulationen

- a) Optimierung der Größe und Geometrie sowie des Ausleseprinzips von neuen Detektormodulen hinsichtlich Lichtausbeute und Zeitauflösung.
- b) Optimierung der Geometrie des gesamten Compton-Kamera Setups hinsichtlich Winkelauflösung und Effizienz (in Kollaboration mit JMU Würzburg / AP 2.2).

2. Detektorauslese

- a) Ausarbeitung des Konzepts zur Detektorauslese.
- b) Acquisition und Test der Detektorausleseelektronik.
- c) Entwicklung des Datenaquisitionssystems einschl. Software
- d) Entwicklung und/oder Acquisition der Detektorausleseelektronik.

3. Entwicklung von Detektormodul-Prototypen

- a) Studie und Akquisition geeigneter SiPMs
- b) Charakterisierung der SiPMs
- c) Design und Konstruktion CeBr_3 Testmodul
- d) Design und Konstruktion Plastikszintillator Testmodul
- e) Kalibrierung und Performance-Messungen der Testmodule

4. Compton-Kamera

- a) Design und Konstruktion der Kamera
- b) Bau weiterer Detektor-Module (ggf. Optimierung des Designs)
- c) Kalibrierung und Performance-Messungen der Testmodule (mit Fraunhofer FKIE (INT))
- d) Montage der Compton-Kamera
- e) (in AP 3) Test der Compton-Kamera (mit Fraunhofer FKIE (INT))

5. (in AP4) Feld-Messungen mit der Compton-Kamera (mit Brenk/Kollaboration)

- a) Durchführung der Feld-Messungen (Brenk)
- b) Analyse der Feldmessungen (mit Kollaboration) in AP 3

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

Allgemein:

- Die Projektpartner haben eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen.
- Am 13.-14. November 2025 fand das Kick-off-Meeting für das scintLaCHARM-Projekt bei der Hellma Materials GmbH in Jena statt.

Ansonsten wurde an der JGU Mainz bisher ausschließlich an AP 1.3 gearbeitet.

- TA 1a: Der Schwerpunkt lag auf TA 1a. Hieran arbeitet der Doktorand mit einem Fokus auf Entwicklung der Simulationssoftware, welche weitgehend fertiggestellt ist. Der Doktorand analysiert die CeBr_3 -Simulationen, die erste studentische Hilfskraft die Plastikszintillator-

Simulationen. Eine weitere studentische Hilfskraft soll die Simulationen systematisch mit der existierenden Software für verschiedene Geometrien durchspielen und analysieren. Der Postdoc übersieht die Arbeiten und untersucht Optionen, die x-y-Auflösung unterhalb der optischen Modulgröße mit Methoden des Machine Learnings zu verfeinern.

- TA 2: a) Es fanden Diskussionen mit der Firma CAEN über die Funktionsweise des in Entwicklung befindlichen Auslesemodus FERS A5204 und seine Verfügbarkeit statt.
- b) Akquisition eines Testboards mit dem ASIC Weeroc RadioROC2. Der Doktorand wird hieran erste Messungen gemeinsam mit einem Elektronik-Ingenieur des PRISMA Detektorlabors durchführen.
- TA 3 a): Es wurde eine vergleichende Marktstudie von verfügbaren SiPMs und SiPM arrays durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Der Fokus der Mainzer Gruppe bleibt auf AP 1.3.

- TA 1a: Vollendung der Simulationen und zusammenfassende Analyse.
Ggf. Messungen von optischen Eigenschaften von CeBr_3 mit Hellma.
- TA 1b: Beginn der Optimierung der Geometrie des gesamten Compton-Kamera Setups hinsichtlich Winkelauflösung und Effizienz (in Kollaboration mit JMU Würzburg / AP 2.2).
- TA 2
 - a) Wir werden an der Ausarbeitung des Konzepts zur Detektorauslese weiterarbeiten.
 - b) Messungen mit dem Testboard.
- TA 3:
 - a) Akquisition von SiPMs
 - b) Beginn Charakterisierung mit Testboard und ggf. Adapterboards
 - c) Design eines CeBr_3 Testmoduls
 - d) Design eines Plastiksintillator-Testmoduls

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Ein Partner des Verbundprojekts (Hellma Materials GmbH) hat zuvor das Projekt 15S9431 A ausgeführt. Es haben sich im Berichtszeitraum keine relevanten Bezüge zu anderen Forschungsvorhaben ergeben.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Pressemitteilung der Julius-Maximilians-Universität Würzburg zum scintLaCHARM-Projekt vom 02.12.2025: „Vom Weltall ins Kernkraftwerk“:

<https://www.uni-wuerzburg.de/aktuelles/einblick/single/news/weltall-kernkraftwerk/>

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9455D
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Astronomie		
Vorhabenbezeichnung: VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Softwareentwicklung der Detektionssysteme		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.25 bis 30.09.28		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 351.184,91 €
Projektleiter/-in: Dr. Thomas Siegert		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: thomas.siegert@uni-wuerzburg.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, Detektionssysteme für Aufgaben der radiologischen Charakterisierung im Rückbau kerntechnischer Anlagen bis hin zu den Entscheidungsmessungen zu entwickeln, zu erproben und für Bedarfsträger anwendbar zu machen. Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit werden systematisch getestete, normenkompatible Messgeräte auf Basis von Szintillationsdetektoren entwickelt. Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt bei Entscheidungsmessungen für die Gebäudefreigabe. Die Funktionalität der Geräte wird in ausgewählten Fallbeispielen in enger Zusammenarbeit mit Bedarfsträgern demonstriert, beginnend mit Use Case 1, einer 10 m²-Standardmessung in der Gebäudefreigabe.

Die Software zur Datenanalyse von Gammastrahlendetektoren für den Rückbau kann aus der entsprechenden Software für astronomische Gammastrahlenbeobachtungen geformt werden. Methoden aus der Astronomie, wie etwa bildgebende Verfahren und spektrale Analysen sind bereits für „weit entfernte Objekte“ vorhanden. Die Auswertung von Gamma-Daten sind für astronomische und terrestrische Messungen fast identisch:

- Die geometrische Modellierung von astronomischen Objekten (z.B. expandierende Sternüberreste) kann direkt in die Modellierung von radioaktiven Objekten (Wände, Fässer) übernommen werden.
- Gamma-Detektoren oder -Kameras können nicht direkt einen „Schnappschuss“ der Radioaktivität machen. Bilder müssen zuerst „rekonstruiert“ werden, d.h. aus den Rohdaten (Zählraten in einzelnen Detektoren) werden Bilder. Hier wird das Fernfeld auf das Nahfeld angepasst.
- Des Weiteren wird eine spektrale Entfaltung entwickelt, sodass einzelne Isotope visualisiert und über optische Bilder eines Raumes überlagert werden können.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP1: Detektor- und Gerätebau

AP2: Softwareentwicklung

AP3: Systematische Tests

AP4: Einsatz in kerntechnischen Anlagen

AP5: Lösungsorientierte Technikbewertung

AP6: Integration in Rückbau-Prozesse und Validierung

AP7: Wirkungsorientierte Maßnahmen und Standardisierung

Die JMU ist hauptsächlich für die Aspekte in AP 2 (Softwareentwicklung) zuständig:

AP 2.2: Modellierung von Geräten und Objekten:

Optische Aperturen für Gammastrahlen sind nicht realisierbar. Daher wird eine sogenannte Compton-Kamera benutzt, die bereits aus dem Forschungsvorhaben QGRIS des Projektpartners Hellma vorhanden ist. Dieser Prototyp soll nun gemäß einer „state-of-the-art“-Handhabung der Astronomie für terrestrische Zwecke nutzbar gemacht werden. Dazu müssen sowohl die Kamera selbst, als auch zu messende Objekte simuliert werden. Dies geschieht im besten Fall ein einziges Mal, um genug Statistik für die anschließende Datenauswertung zu sammeln.

Um die Simulationen dann mit der Realität zu vergleichen, wird der Prototyp an die JMU ausgeliehen und dort einer Kalibrationskampagne unterzogen. Somit werden Winkelauflösung, Energieauflösung und Unterschiede zwischen nahen und fernen Quellen bestimmt.

AP 2.3: Algorithmen für die Datenauswertung:

Gamma-Photonen, die nicht nur in einem Detektor registriert werden, sondern quasi gleichzeitig von einem anderen Detektor gemessen werden, haben dies über Compton-Streuung gemacht. Über die Compton-Streu-Formel können so die gesamte deponierte Energie des Photons und ein Einfallswinkel bestimmt werden. Über mehrere Photonenmessungen, d.h. über einen Zeitraum hinweg, können dann die Strahlungsherde über der natürlichen Radioaktivität identifiziert werden. In diesem Projekt wird auf die Endnutzer-Software „cosipy“ aus der Astronomie zurückgegriffen, die für Gammastrahlen-Teleskope entwickelt wird.

cosipy wird in diesem Projekt weiterentwickelt für den Einsatz auf der Erde. Das Grundgerüst der Software bleibt aber identisch, da es keine Rolle spielt, ob das Gerät im Weltraum oder in einem Labor steht. Es gibt nur einen Unterschied, wenn die strahlenden Objekte zu nah an der Kamera stehen, da dann die Photonen nicht parallel auf das Instrument treffen. Diese Unterschiede werden hier auch bestimmt.

AP 2.4: Visualisierung:

Eine Gammakamera sieht nicht nur „geradeaus“, sondern in alle Richtungen gleichzeitig. Außerdem ist durch die wesentlich gröbere Auflösung einer Gammakamera im Vergleich zum menschlichen Auge nicht sofort erkennbar, was genau in einem Raum strahlt, wie stark es strahlt, und welches Isotop dafür verantwortlich ist.

Zum Einen wird hier eine Modellierung des realen 3D-Raums vorbereitet. D.h. die „Pixel“ in einem Bild sind nicht gleichmäßig verteilt, sondern basieren auf echten Objekten, wie z.B. vier Wände aus jeweils zehn Einzelflächen. Dies hebt die Stärken des Prototypen, eine relativ große effektive Fläche für Photoneninteraktionen, hervor und lässt Schlüsse auf Strahlungsherde zu. Außerdem können so Unsicherheiten auf die Messungen bestimmt werden, die für die Freigabe wichtig sind.

Zum Anderen werden raumunabhängige Bilder erzeugt, was ebenfalls mit cosipy möglich ist, um diese in einer virtuellen Realität im Vergleich mit der sichtbaren Welt darzustellen.

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

Allgemein:

- Die Projektpartner haben eine Kooperationsvereinbarung abgeschlossen.
- Am 13.-14. November 2025 fand das Kick-off-Meeting für das scintLaCHARM-Projekt bei der Hellma Materials GmbH in Jena statt.

Arbeitspakete:

- AP 2.2: Ein Computer-Cluster wurde bestellt und Ende Dezember 2025 angeliefert. Die Installation läuft. Für die Simulationen wurden bisher Desktop-Computer benutzt, was nur eine grobe Charakterisierung ermöglicht, aber bereits Einblicke in den Prototypen gewährt. Durch das bisherige Datenakquisesystem ist die Effizienz u.U. um einen Faktor 2 reduziert, da nur Koinzidenzen mit dem zentralen CeBr3-Detektor verarbeitet werden. Werden auch andere Koinzidenzen berücksichtigt und auch Dreifachstreuungen, könnte die benötigte Messzeit deutlich verkürzt werden.
- Es wird für Februar 2026 ein HiWi eingestellt, der die Kalibrationskampagne durchführen soll. Dafür sind an der JMU Labore und Strahlungsquellen vorhanden.
- AP 2.3 & 2.4: Eine erste Antwortfunktion des Prototypen, d.h. wie sieht das Instrument Gamma-Photonen aus verschiedenen Richtungen mit beliebiger Energie, wurde erstellt und charakteristische Objekte (vier Wände, Boden und Decke als natürlicher Untergrund; ein Fass als Strahlungsquelle) simuliert. Über die Funktionalität von cosipy konnte dann ein erster simulierter end-to-end-Test vollzogen werden.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)**AP 2.2: Kalibrationskampagne**

Im Februar 2026 wird ein HiWi angestellt, der mittels zweier radioaktiver Isotope (^{137}Cs und ^{60}Co) die Kamera aus verschiedenen Winkeln bestrahlen lässt und die Antwortfunktion dadurch real bestimmt. Damit die simulierte Antwortfunktion darauf abgestimmt wird, gibt es ein Modul, das Detektoreffekte, wie etwa Temperaturschwankungen, berücksichtigt. Auch wird der natürliche Hintergrund sowohl im Allgemeinen, als auch im Detail für verschiedene Räume, gemessen.

AP 2.2: Datenakquise und Konvertierung zu cosipy

Sobald die vollständige Software zur Datenakquise von beliebigen Detektoren und Koinzidenzen vorhanden ist, wird eine Konvertierung des nativen Formats in das cosipy-Format vollzogen, wodurch alle Messungen direkt in cosipy ausgewertet werden können.

AP 2.2 & 2.3: Sobald der Computer-Cluster verfügbar ist, wird eine hochaufgelöste Antwortfunktion simuliert, die für jegliche Datenauswertung des Instruments benutzt werden kann.**AP 2.4: Sobald die ersten echten Daten genommen sind, wird mit cosipy jeweils ein Modell des Laborraumes erstellt und Einzelobjekte vermessen und Unsicherheiten abgeschätzt, sowie raumunabhängig Bilder erzeugt. So können die verschiedenen Herangehensweisen verglichen und möglichen Systematiken abgeschätzt werden.****5. Bezug zu anderen Vorhaben**

Ein Partner des Verbundprojekts (Hellma Materials GmbH) hat zuvor das Projekt 15S9431 A ausgeführt. Es haben sich im Berichtszeitraum keine relevanten Bezüge zu anderen Forschungsvorhaben ergeben.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Pressemitteilung der Julius-Maximilians-Universität Würzburg zum scintLaCHARM-Projekt vom 02.12.2025: „Vom Weltall ins Kernkraftwerk“:

<https://www.uni-wuerzburg.de/aktuelles/einblick/single/news/weltall-kernkraftwerk/>

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9455E
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. - ausführende Stelle Fraunhofer-FKIE (bis 31.12.2025: Fraunhofer INT, dann Institutsintegration)		
Vorhabenbezeichnung: VP: Lokalisierung und Charakterisierung von radioaktivem Material mit modernen bildgebenden und spektrometrischen Verfahren der Szintillationsmesstechnik (scintLaCHARM) TP: Systematische Tests der Detektionssysteme		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 328.593,72 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Sebastian Chmel		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: sebastian.chmel@fkie.fraunhofer.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist es, Detektionssysteme für Aufgaben der radiologischen Charakterisierung im Rückbau kerntechnischer Anlagen bis hin zu den Entscheidungsmessungen zu entwickeln, zu erproben und für Bedarfsträger anwendbar zu machen. Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit werden systematisch getestete, normenkompatible Messgeräte auf Basis von Szintillationsdetektoren entwickelt. Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt bei Entscheidungsmessungen für die Gebäudefreigabe. Die Funktionalität der Geräte wird in ausgewählten Fallbeispielen in enger Zusammenarbeit mit Bedarfsträgern demonstriert, beginnend mit Use Case 1, einer 10 m²-Standardmessung in der Gebäudefreigabe.

Dem Fraunhofer FKIE – bis zum 31.12.2025: Fraunhofer INT – kommt die Aufgabe zu, die neuen Detektoren systematisch zu testen, hierzu geeignete Verfahren zu konzipieren, und die Qualität der Messergebnisse mit Blick auf die geplante Anwendung zu evaluieren.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm des Verbundvorhabens ist in sieben Arbeitspakete untergliedert:

- AP 1: Detektor- und Gerätebau
- AP 2: Softwareentwicklung
- AP 3: Systematische Tests
- AP 4: Einsatz in kerntechnischen Anlagen
- AP 5: Lösungsorientierte Technikbewertung
- AP 6: Integration in Rückbau-Prozesse und Validierung
- AP 7: Wirkungsorientierte Maßnahmen und Standardisierung

Das Fraunhofer FKIE (INT) ist hierbei hauptsächlich an AP3, AP5 und AP7 beteiligt.

In AP3 wird das QuTeSt System adaptiert, die Testverfahren entwickelt sowie statische und dynamische Tests der QGRIS Kameras durchgeführt. Im Anschluss hierzu finden zudem Tests des CeBr₃ Spektrometers mit an ISO 11929 angelehnten Verfahren statt. In AP5 wird an der lösungsorientierten Technikbewertung gearbeitet und in AP7 an wirkungsorientierten Maßnahmen und der Standardisierung zur Etablierung von Szintillationsmessgeräten als gammaspektrometrische und bildgebende Messgeräte mitgewirkt.

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

Allgemein:

Fraunhofer FKIE (INT) hat die Kooperationsvereinbarung des Verbunds mitgestaltet und unterzeichnet. Am 13.-14.11.2025 erfolgte das Kick-off-Meeting in dessen Rahmen erste Absprachen zu den einzelnen Arbeitspaketen gemacht wurden. Ein Gamma Stream MCA Tube (CAEN) des Fraunhofer FKIE (INT) wurde an Hellma verliehen, damit dort Messungen in Verbindung mit den CeBr_3 -Detektoren durchgeführt werden können.

Zu AP 3, AP 5:

Die Beratung der Projektpartner ist erfolgt. Des Weiteren wurde für das Fraunhofer FKIE (INT) wichtiger Input zu den Anforderungen an die systematischen Tests eingeholt.

Zu AP 6:

Die Ausarbeitung des Use Case 1, gemeinsam von Brenk Systems und Fraunhofer FKIE (INT), ist erfolgt. Das Ergebnis wurde termingerecht zum 20.12.2025 eingereicht.

Damit ist bereits der erste Meilenstein M1 erreicht.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Fraunhofer FKIE (INT) wird für das Vorhaben in AP3 systematische Tests der verschiedenen Systeme (Gammakamera und Spektrometer) mit verschiedenen radioaktiven Quellen durchführen.

In einer ersten Testphase im Entwicklungsprozess E1 werden die QGRIS-Gammakameras (RSL4 und RSL7) nebst der weiterentwickelten Software in den Blick genommen.

Es gibt bislang keine Normen für Gamma-Kamera-Prüfmessungen, die für den vorliegenden Anwendungsfall konzipiert sind. Daher werden geeignete Testprozeduren entwickelt und durchgeführt. Dies erfolgt in Anlehnung an den ANSI Standard N42.62 und an systematische Untersuchungen in Abhängigkeit von der skalierten Messzeit.

Bis zum 1.3.2026 wird als zweiter Meilenstein das Testverfahren zum Use Case 1 ausgearbeitet werden.

In AP 5 werden alle Projektpartner gemeinsam eine Technikbewertung durchführen, die sich an den Bedarfen der Anwender orientiert.

Als Ergebnis entstehen projektinterne Testverfahren und gerätespezifische Testergebnisse. Diese umfassen sowohl technische Charakterisierungen (technikinduziert) als auch anwendungsbezogene Bewertungen (probleminduziert), die auch in den Entwicklungsprozess einfließen sollen (innovative Technikbewertung).

In einer zweiten Testphase (Entwicklungsprozess E2) wird das In-situ- CeBr_3 Gammaspektrometer getestet. Da die Normen DIN ISO 11929 und DIN 25457 keine Ausführungen für Szintillationsdetektoren enthalten, wird das Fraunhofer FKIE (INT) - unter Berücksichtigung der genannten Normen - eigene Testverfahren für CeBr_3 Gammaspektrometer entwickeln und anwenden.

In einer dritten Testphase (Entwicklungsprozess E3) wird dann die neuentwickelte Gammakamera untersucht und es erfolgen Rückmeldungen für die weitere Entwicklung.

In AP7 wird sich Fraunhofer FKIE (INT) bei der für die Etablierung der Szintillationsmessgeräte als gammaspektrometrische und bildgebende Messgeräte nötige Verankerung im Regel- und Normenwerk einbringen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Ein Partner des Verbundprojekts (Hellma Materials GmbH) hat zuvor das Projekt 15S9431 A ausgeführt. Es haben sich im Berichtszeitraum keine relevanten Bezüge zu anderen Forschungsvorhaben ergeben.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Es sind im Berichtszeitraum keine relevanten Berichte und Veröffentlichungen des Fraunhofer FKIE (INT) zum Projekt entstanden.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9456A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (TMB) Rückbau konventioneller und kerntechnischer Bauwerke	
Vorhabenbezeichnung: VP: Visualisierung von Gebäudestrukturen für die Freimessung und genaue Positionsbestimmung des Messgeräts in der Gebäudefreigabe (ViMPoG) TP: Erfassung und Visualisierung von Gebäudestrukturen und Störstellen für die Freimessung und genaue Positionsbestimmung des Messgeräts in der Gebäudefreigabe	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 737.359,48 € (inkl. Projektpauschale)
Projektleiter/-in: Dr.-Ing. Madeleine Bachmann	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: madeleine.bachmann@kit.edu

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des vom BMFTR geförderten Vorhabens ViMPoG ist die Entwicklung von Verfahren und Algorithmen für eine verbesserte, effiziente und gleichzeitig sichere Durchführung der Gebäudefreigabe und zur Planung von Rückbauarbeiten. Im Zentrum des Projekts steht das digitale Modell für Anwender in kerntechnischen Anlagen, anhand dessen sowohl die zurückzubauenden Räumlichkeiten als auch alle relevanten Störstellen innerhalb dieser Gebäudeteile anforderungsgemäß für die Freigabe visualisiert und ausgewertet werden können. Im Projekt werden Algorithmen untersucht und entwickelt für eine automatisierte Erzeugung des Modells. Anhand dieser Gebäudevisualisierung sowie weiteren Informationen aus dem Gebäudekataster sollen Dekontaminationsarbeiten und Freimessungen digital geplant sowie die genaue Positionierung der Freimessgeräte unterstützt und überwacht werden können. Dafür werden entsprechende Verfahren untersucht und entwickelt. Die Messgeometrien sollen unter Einbeziehung der im Modell abgebildeten Störstellen optimiert werden. Damit kann der Aufwand für die Durchführung und Dokumentation der Dekontaminations- und Entscheidungsmessungen für die Anwender in kerntechnischen Anlagen reduziert werden. Ebenfalls kann darauf aufbauend ein digitaler Freigabeprozess auf Seiten der Betreiber, Behörden und Sachverständigen realisiert werden, womit ggfs. zu einer Standardisierung der Gebäudefreigabe beigetragen werden kann.

Das Projekt baut auf den Erkenntnissen und Ergebnissen des ebenfalls vom BMFTR geförderten Vorhabens ViSDeMe (Förderkennzeichen 15S9435A) auf.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP0 (Projektbegleitende Beratung): kostenneutrale Beratung durch assoziierten Projektpartner RWE Nuclear GmbH an den Standorten Mülheim-Kärlich und Gundremmingen

AP1 (Grundlagenermittlung): Ermittlung der Grundlagen für die späteren Arbeitspakete

AP2 (Anforderungskataloge): Zusammenstellung aller relevanten Anforderungen an die zu entwickelnden Verfahren und Prozesse + Aufbau Versuchsstand

AP3 (Datenerfassung und Erstellung Punktwolke): Datenaufnahme von Störstellen und Gebäudestruktur sowie anschließende Datenauswertung zur Erstellung einer Punktwolke

AP4 (Erzeugung Gebäudemodell): Untersuchungen zur automatisierten Erzeugung des Gebäudemodells inklusive Störstellen

AP5 (Messplanung): Modellrechnungen zur Optimierung der Messgeometrie; graphisch unterstützte Messplanung auf Grundlage des Gebäudemodells

AP6 (Positionsbestimmung): Entwicklung eines Konzepts zur digital unterstützten Positionierung und Tracking des Freimessgerätes auf Grundlage des Gebäudemodells

AP7 (Bewertung Messunsicherheit): Rückführung der Tracking-Ergebnisse in Auswertung der Freimessung und Dokumentation; Bewertung der Messunsicherheit

AP8 (Wissenschaftskommunikation): Kommunikation relevanter Projektschritte und Erkenntnisse auf verschiedenen Plattformen

AP8 (Praxis- und Validierungsphase): Auswertung der Ergebnisse am Beispielprojekt

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

Die bisher durchgeführten Arbeiten verliefen in enger Kooperation mit iUS. In dem angegebenen Berichtszeitraum fand ein Kick-Off-Termin vor Ort in den Räumlichkeiten von iUS in Mannheim statt. Anschließend wurden regelmäßige Online-Projekttreffen durchgeführt. Aktuell arbeitet KIT an AP1. Daneben wurde eine erste Messkampagne in der Anlage Mülheim-Kärlich im Rahmen des AP3 durchgeführt.

AP0: Projektbegleitende Beratung

3.1 Zusammenarbeit mit assoziiertem Projektpartner RWE Nuclear GmbH

Im Rahmen der für das AP3 durchgeführten Datenaufnahmen vor Ort in der kerntechnischen Anlage Mülheim-Kärlich, wurde die zukünftige Form der Zusammenarbeit mit dem assoziierten Projektpartner RWE am Standort Mülheim-Kärlich abgestimmt.

AP1: Grundlagenermittlung

3.2 Ermittlung von Grundlagen für automatisierte Gebäudemodellierung

Es wurden Recherchearbeiten durchgeführt zum aktuellen Stand der Technik der automatisierten Gebäudemodellierung. Dabei wurden mögliche Algorithmen und Datensätze ermittelt, auf die in AP 4 aufgebaut werden kann.

3.3 Ermittlung und Test weiterer Sensorik zur Störstellenerfassung

Im ViSDeMe-Projekt wurde die aktive Thermographie als geeignete Methode zur berührungslosen Erfassung der unter der Dekontaminationsbeschichtung verborgenen Ankerplatten ermittelt. Diese ist prinzipiell dazu geeignet, hat aber auch Nachteile wie z. B. den erhöhten Messaufwand durch die erforderliche aktive Erwärmung der Gebäudeflächen sowie die relativ niedrige Auflösung handelsüblicher Wärmebildkameras. Im Rahmen des AP1 wurde deshalb weitere potenziell geeignete Sensorik zur berührungslosen Erfassung der unter der Dekontaminationsbeschichtung verborgenen Ankerplatten ermittelt und getestet. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) wurde die Verwendung von Multispektralkameras in verschiedenen Frequenzbereichen untersucht. Die Tests an verschiedenen Probekörpern zeigten nur bedingt aussagekräftigen Ergebnisse, da die Beschichtungen in der Praxis Schwankungen im Farbton und der Zusammensetzung aufweisen, welche sich direkt auf die multispektralen Messungen auswirken, auch bei der Betrachtung von Frequenzbändern außerhalb des sichtbaren Bereichs. Außerdem stellte sich heraus, dass das Verfahren, selbst wenn sich im Rahmen weiterer Versuche ein festes Frequenzband ermitteln ließe, welches die Schicht durchdringt und den darunterliegenden Stahl eindeutig erkennt, keinen wesentlichen Vorteil gegenüber der aktuell verwendeten aktiven Thermographie hätte. Denn für die Erfassung einzelner Spektralbereiche muss eine darauf abgestimmte aktive Beleuchtung der Objekte erfolgen. Der Messaufwand ist somit nicht wesentlich geringer als bei der aktiven Thermographie. Zudem ergab die Recherche, dass

multispektrale Kameras mit großem Frequenzspektrum vorwiegend für den stationären Betrieb ausgelegt sind, z. B. in der industriellen Produktionskontrolle. Nach abschließender Abwägung wird der Einsatz einer Multispektralkamera für die Erfassung der beschichteten Ankerplatten somit nicht weiterverfolgt.

AP3: Datenerfassung und Erstellung Punktwolke

3.4 Datenerfassung

Im November 2025 wurde eine erste Messkampagne in der Anlage Mülheim-Kärlich im Rahmen des AP3 durchgeführt. Dabei wurden im Kontrollbereich der kerntechnischen Anlage Mülheim-Kärlich Ergänzungsmessungen zu den bereits im ViSDeMe-Vorhaben durchgeführten Messungen vorgenommen. Außerdem wurden die Daten um weitere Gebäudeteile des Kontrollbereichs der Anlage erweitert. Ziel ist es, möglichst umfangreiche und heterogene Gebäudedatensätze als Grundlage für die weiteren Arbeitspakete zu erhalten.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

In den nächsten Monaten wird die Grundlagenermittlung zur automatisierten Gebäudemodellierung weiterverfolgt. Basierend auf den ermittelten Erkenntnissen, werden in Abstimmung mit dem Projektpartner iUS die Anforderungen an das Gebäudemodell festgelegt. Parallel dazu werden im AP3 die im November 2025 erfassten Daten ausgewertet.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

Kurzvorstellung auf TMB-Homepage: www.tmb.kit.edu/Forschungsprojekte_8521.php.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9456B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: iUS GmbH consultants & advisors Fruchtbahnhofstr. 15 68159 Mannheim	
Vorhabenbezeichnung: VP: Visualisierung von Gebäudestrukturen für die Freimessung und genaue Positionsbestimmung des Messgeräts in der Gebäudefreigabe (ViMPoG) TP: Ansätze zur Optimierung der Messgeometrien für eine effiziente Freimessung unter Berücksichtigung von Störstellen und Entwicklung eines Prozesses für eine digital unterstützte Gebäudefreigabe	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 173.704,93 EUR
Projektleiter/-in: Dr. Maarten Becker	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: becker@ius-online.eu

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des vom BMFTR geförderten Vorhabens ViMPoG ist die Entwicklung von Verfahren und Algorithmen für eine verbesserte, effiziente und gleichzeitig sichere Durchführung der Gebäudefreigabe und zur Planung von Rückbauarbeiten. Im Zentrum des Projekts steht das digitale Modell für Anwender in kerntechnischen Anlagen, anhand dessen sowohl die zurückzubauenden Räumlichkeiten als auch alle relevanten Störstellen innerhalb dieser Gebäudeteile anforderungsgemäß für die Freigabe visualisiert und ausgewertet werden können. Im Projekt werden Algorithmen untersucht und entwickelt für eine automatisierte Erzeugung des Modells. Anhand dieser Gebäudevisualisierung sowie weiteren Informationen aus dem Gebäudekataster sollen Dekontaminationsarbeiten und Freimessungen digital geplant sowie die genaue Positionierung der Freimessgeräte unterstützt und überwacht werden können. Dafür werden entsprechende Verfahren untersucht und entwickelt. Die Messgeometrien sollen unter Einbeziehung der im Modell abgebildeten Störstellen optimiert werden. Damit kann der Aufwand für die Durchführung und Dokumentation der Dekontaminations- und Entscheidungsmessungen für die Anwender in kerntechnischen Anlagen reduziert werden. Ebenfalls kann darauf aufbauend ein digitaler Freigabeprozess auf Seiten der Betreiber, Behörden und Sachverständigen realisiert werden, womit ggfs. zu einer Standardisierung der Gebäudefreigabe beigetragen werden kann.

Das Projekt baut auf den Erkenntnissen und Ergebnissen des ebenfalls vom BMFTR geförderten Vorhabens ViSDeMe (Förderkennzeichen 15S9435A) auf.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP0 (Projektbegleitende Beratung): kostenneutrale Beratung durch assoziierten Projektpartner RWE Nuclear GmbH an den Standorten Mülheim-Kärlich und Gundremmingen

AP1 (Grundlagenermittlung): Ermittlung der Grundlagen für die späteren Arbeitspakete

AP2 (Anforderungskataloge): Zusammenstellung aller relevanten Anforderungen an die zu entwickelnden Verfahren und Prozesse + Aufbau Versuchsstand

AP3 (Datenerfassung und Erstellung Punktwolke): Datenaufnahme von Störstellen und Gebäudestruktur sowie anschließende Datenauswertung zur Erstellung einer Punktwolke

AP4 (Erzeugung Gebäudemodell): Untersuchungen zur automatisierten Erzeugung des Gebäudemodells inklusive Störstellen

AP5 (Messplanung): Modellrechnungen zur Optimierung der Messgeometrie; graphisch unterstützte Messplanung auf Grundlage des Gebäudemodells

AP6 (Positionsbestimmung): Entwicklung eines Konzepts zur digital unterstützten Positionierung und Tracking des Freimessgerätes auf Grundlage des Gebäudemodells

AP7 (Bewertung Messunsicherheit): Rückführung der Tracking-Ergebnisse in Auswertung der Freimessung und Dokumentation; Bewertung der Messunsicherheit

AP8 (Wissenschaftskommunikation): Kommunikation relevanter Projektschritte und Erkenntnisse auf verschiedenen Plattformen

AP8 (Praxis- und Validierungsphase): Auswertung der Ergebnisse am Beispielprojekt

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

Die bisher durchgeführten Arbeiten verliefen in enger Kooperation mit dem TMB. In dem angegebenen Berichtszeitraum fand ein Kick-Off-Termin vor Ort in den Räumlichkeiten von iUS in Mannheim statt. Anschließend wurden regelmäßige Online-Projekttreffen durchgeführt.

iUS hat einen Projektqualitätsplan erstellt (beinhaltet u.a. den Datenmanagementplan) und im Projekt-JF vorgestellt.

AP1: Grundlagenermittlung

Die einschlägigen Referenzen zur grundsätzlichen Freigabe (StrlSchG, StrlSchV) sowie zur Ausführung der Gebäudefreigabe (DIN 25457-1, insbesondere DIN 25457-6) wurden in Bezug auf das Projektziel analysiert.

Grundsätzliche Tätigkeiten in der Vorbereitung der Gebäudefreigabe durch den Eigentümer sind:

- Auswertung der Raumnutzungshistorie
- Kategorisierung der Räume in Kontaminationsklassen
- Vorlaufende Dekontaminationsarbeiten
- Voruntersuchung zur Bestimmung von Nuklidgemischen, Hochrechnungsfaktoren
- Bestimmung des Freigabepfades (an Stehender Struktur zum Abriss oder zur Weiterverwendung)
- Dokumentation Freigabeverfahren
- Erstellung Freigabeanweisung

Mit Erteilung des Freigabebescheids ergeben sich die Tätigkeiten des Eigentümers:

- Durchführung Entscheidungsmessung
- Prüfung der Freigabekriterien aus Bescheid
- Bei Erfüllung: Kennzeichnung und Verschluss des Raums/Gebäudes
- Bei Nicht-Erfüllung: falls zulässig, Erweiterung Messumfang
- Erstellung Freigabedokumentation
- Feststellung Übereinstimmung und Freigabe durch den Strahlenschutzverantwortlichen

AP2: Anforderungskataloge iUS Teil 1 aus regulatorischen Sicht

Die in AP1 analysierten Referenzen beinhalten auch die Anforderungen aus regulatorischer Sicht, die nun systematisch in themenspezifische Anforderungskataloge gesammelt werden.

Spezifische Kataloge werden erstellt für:

- Gebäudekataster
- Messtechnik Radiologie
- Freigabepfad
- Dokumentation

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

In den nächsten Monaten wird in AP2 eine vollständige Sammlung der Anforderungen erfolgen, die Grundlage für die weiteren APs sind.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9442
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Technische Hochschule Mannheim		
Vorhabenbezeichnung: Charakterisierung und Dekontamination von i-Grafiten (i-GraDe)		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2023 bis 31.10.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.600,524,03 €
Projektleiter/-in: Dr. L. Lens / Prof. Dr. U. W. Scherer		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: u.scherer@th-mannheim.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

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

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Ausgehend von einer Bestandsaufnahme und Probenahmestrategie werden Proben unbestrahlter wie bestrahlter Reaktorgrafite ausführlich radiologisch charakterisiert 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

Aufgrund der angekündigten Schließung der Labore für Radiochemie musste der zeitliche Ablauf der Arbeitspakete umgestellt werden. Nach der durchgeführten Charakterisierung der Grafitproben von JEN Jülich und TRIGA Mainz wurden die Durchführung der Dekontaminationsverfahren validiert (AP4 und AP5).

Die wesentlichen Versuchsparameter des thermischen Verfahrens waren die Temperatur, die relative Feuchtigkeit und die Dauer der Wärmebehandlung. Die Auswertung erfolgte getrennt für die Betastrahler ^3H und ^{14}C sowie die Gammastrahler mit den zuvor etablierten Messmethoden (Verbrennung der Proben im Oxidizer und separate Messung der ^3H - und ^{14}C -Aktivitäten, bzw. direkte Messung der Gammastrahler mit einem HPGe-Detektor). Dabei zeigte sich, dass Tritium, Radiokohlenstoff und die meisten Gammastrahler unter jeweils unterschiedlichen Bedingungen aus der Matrix entfernbar waren. Sodann wurde zum Ende der Experimentierzeit ein kombiniertes Verfahren entwickelt, mit dem sich die Hauptmenge der meisten Nuklide aus der i-Grafitmatrix entfernen ließen.

Die untersuchten Parameter der Lösungsmittelextraktion waren neben der Zusammensetzung des Lösungsmittels (Wasser, organisches Lösungsmittel und Komplexbildner), Temperatur und Druck im Reaktor sowie die Einwirkdauer. Dabei wurden im Reaktor unterkritische wie superkritische Bedingungen untersucht. Darüber hinaus wurden Experimente durchgeführt, bei denen i-Grafitproben in einem Glaskolben unter Rückfluss in Wasser bzw. Wasser/Lösungsmittelmischungen bei Siedetemperatur behandelt wurden. Generell war die Dekontamination der ionische Gammastrahler gut bis sehr gut. Die Entfernung von Tritium und Radio-kohlenstoff zeigte deutlich schlechtere Ergebnisse.

Im Rahmen des AP7 Abfallprodukte wurden verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Rückhaltung und Behandlung insbesondere der radioaktiven Abfälle mit untersucht.

Grafitproben wurden in kleinen Rohrröfen ausgeheizt zur Untersuchung der Flüchtigkeit von ^{14}C und ^3H unter Endlagerbedingungen (AP3). Leider war aufgrund ihres hohen Alters die Aktivität der Proben zu gering, um signifikante Ergebnisse zu erhalten.

Daneben wurde ein anderes Thema im Rahmen einer Masterprojektarbeit untersucht: Da die Szintillationsfolien des Autoradiographen aufgrund schlechter Oberflächenstruktur zur Bildung von Artefakten in den Autoradiographien führten, wurde die Herstellung eigener Szintillationsfolien untersucht. Durch Polymerisation von Toluol und Divinylbenzol, die mit 1 – 5 % Szintillatoren gemischt waren, konnten Szintillatorfolien erhalten werden, die auf ihre bildgebenden Eigenschaften hin untersucht wurden. Sie zeigten nicht die erforderliche Haltbarkeit.

Aufgrund der vom Rektorat festgelegten Auflösung unserer Labore zu Beginn 2026 mussten alle experimentellen Arbeiten bis Mitte Dezember und somit AP5 abgeschlossen werden.

Die Doktorandin nahm im Februar an der Nachwuchstagung der Fachgruppe Nuklearchemie Seminar on Activation Analysis and Gamma Spectrometry SAAGAs in Wien teil, wo sie die Ergebnisse der Anwendung von EFFTRAN zur Bestimmung der Zählkreisbeute der HPGe-Detektoren vortrug.

Im September nahmen Doktorand:innen und die Projektleitung mit Beiträgen an der KONTEC in Dresden teil.

Im Oktober trugen die Doktorand:innen beim International Nuclear Graphite Specialists Meeting ihre Ergebnisse vor.

Im 4. Quartal 2025 wurden die ersten Manuskripte zur Veröffentlichung geschrieben und eingereicht. Sie befinden sich beide im Begutachtungsprozess.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Aufgrund der besonderen Situation wurden die Arbeitspakete AP6 Betrachtung der Zulassungsfähigkeit vollständig und AP7 Abfallprodukte teilweise nach 2026 verschoben werden. Weiterhin stehen im Jahr 2026 die abschließende Bewertung und erste Betrachtungen zur Skalierbarkeit (AP8) auf dem Arbeitsprogramm.

Weiterhin sollen die Ergebnisse in weiteren Publikationen veröffentlicht und bei Tagungen national (z.B. Kerntechnik) und international vorgestellt werden.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Zurzeit haben wir keinen Überlapp mit anderen Vorhaben.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Studien- und Abschlussarbeiten

1. Development and Validation of Efficiency Calibration Methods for Irradiated Graphite Characterization by HPGe γ -Spectrometry, Studienarbeit D. Reisch, 01/25
2. Inbetriebnahme und Validierung von Rohr Öfen für Freisetzungsversuche von Radionukliden und Dekontaminationsexperimente an Reaktorgrafit, Studienarbeit S. Mosa, 03/25
3. Inbetriebnahme eines Hochtemperaturofens zur Behandlung von bestrahltem Grafit, Masterprojektarbeit, B. Abdolla, 05/25
4. Die Herstellung von Plastiksintillatoren durch Polymerisation von Styrol und Vinyl-toluol, Masterprojektarbeit, Ron Bembek, 06/25
5. Validierung eines Experimentellen Aufbaus zur Freisetzung flüchtiger Radionuklide aus bestrahltem Reaktorgrafit, Bachelorarbeit S. Mosa, 08/25
6. Dekontamination von bestrahltem Grafit durch oxidative Behandlung in einem Hochtemperaturofen, Masterarbeit B. Abdolla, 08/25
7. Masterprojektarbeit zur Freisetzung von ^3H und ^{14}C aus i-Grafiten (begonnen)
8. Masterarbeit zur Dekontamination von i-Grafiten mit thermischer Methode (begonnen)

Konferenzbeiträge

N. Heiß:

Plenarvortrag KONTEC: Decontamination of irradiated reactor graphite by using thermal treatment and supercritical fluid extraction

Vortrag INGSIM: Decontamination of irradiated reactor graphite by using thermal treatment and supercritical fluid extraction

L. Meunier:

SAAGAS: Validation of a gamma ray spectrometry method for the characterization of irradiated reactor graphite from German research reactors

Digitales Poster KONTEC: Characterization of irradiated reactor graphite from research reactors by using destructive and non-destructive measurement methods

Vortrag INGSIM: Characterization of irradiated reactor graphite from research reactors by using destructive and non-destructive measurement methods

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9443
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)		
Vorhabenbezeichnung: Aus- und Weiterbildung sowie Kompetenzerhalt im Bereich der zerstörungsfreien Analyse von radioaktiven Stoffen und Abfallprodukten aus Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen (EducTUM)		
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2023 bis 30.09.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 911.614,21 €
Projektleiter: Dr. Thomas Bücherl		E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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

AP 1: Technische Realisation

Der für das zweite Halbjahr 2025 vorgesehene Umzug des unter EducTUM nutzbaren online Messplatzes wurde durchgeführt. In diesem Zusammenhang konnte ein von der RCM neu beschaffter elektro-gekühlter HPGe-Detektor in den Messplatz zur Nutzung mit dem Gamma-Spektrometrieprogramm LVis integriert werden. Das Gamma-Spektrometrieprogramm LVis wird nun offiziell von der Fa. Ortec unter der Bezeichnung LabVision (LVis) kommerziell vertrieben. Es wurde eine Vereinbarung getroffen, dass dieses Produkt weiterhin im Rahmen von EducTUM genutzt werden kann und mit Updates und Upgrades versorgt wird.

Das grundlegende Layout und große Teile der Funktionalität der EducTUM-Webseite wurden von der Firma Punkt & Company realisiert, während die eigentlichen Inhalte von Mitarbeitern der

RCM erstellt und eingepflegt werden. Hierbei auftretende neue Anforderungen an die Funktionalität wurden bislang von dieser externen Firma bearbeitet. Im zweiten Halbjahr 2025 musste ein Wechsel der Firma durchgeführt werden, da der zuständige Websiteersteller nicht mehr zur Verfügung stand. Es konnte mit der Firma bioculture GmbH aber relativ schnell ein kompetenter Ersatz gefunden werden. Durch den Wechsel bedingt konnten auch neue Features realisiert werden, welche dem Webauftritt positiv zugutekommen.

AP 2: Vermittlung der Lerninhalte

Es wurde weiter am Webauftritt von EducTUM gearbeitet. Viele dieser Arbeiten erfolgten im Backend, in enger Abstimmung und Anleitung durch die Firma bioculture GmbH. Diese Arbeiten betrafen unter anderem die Nutzung des den einzelnen Webseiten zugrundeliegenden Yootheme-Frameworks, welches eine effektive Bereitstellung und flexible Erweiterung der einzelnen Inhalte ermöglicht. Optimierte Elemente wurden hierfür erstellt, die eine beschleunigte Integration von Inhalten in verschiedenen Layouts ermöglichen. Parallel hierzu wurde damit begonnen bereits existierende Webseiten in das neue Framework zu transferieren, soweit hierdurch eine verbesserte Darstellung möglich wurde. Gleichzeitig wurden die hierbei gewonnenen Erfahrungen für eine effektivere Erstellung neuer Webseiten genutzt.

Die bereits umfangreichen Texte für die bis Ende der Projektlaufzeit vorgesehenen Themen werden in einem MS-Word-Dokument erfasst, die unterstützenden Abbildungen, Animationen, Videos etc. in einer Ordnerstruktur gespeichert, welche die thematische Gliederung des Webauftritts abbildet. Alle diese Beiträge werden laufend fortgeschrieben. Damit verbunden ist eine kontinuierliche Überarbeitung bereits bestehender Beiträge, um redundante Inhalte in verschiedenen Themenbereichen weitestgehend zu vermeiden (wo sinnvoll) und durch entsprechende Querverweise zu berücksichtigen. Hierdurch bedingt wurden bislang relativ wenige Inhalte in den Webauftritt hochgeladen. Dies wird mit Beginn 2026 sukzessive nachgeholt. Hierbei hilft auch die verwendete Datenstruktur, die direkt auf dem Server abgebildet werden kann und eine leichte Bereitstellung der Daten ermöglicht.

Ende 2025 wurde der online-Messplatz erneut erfolgreich im Rahmen eines Gamma-Spektrometrie-Praktikums von 21 Studenten der TU München genutzt. Im Vorfeld wurde die bereits aus dem Vorjahr existierende und auf der EducTUM-Webseite veröffentlichte Praktikumsanleitung weiter überarbeitet. Positive Rückmeldungen nach Abschluss des Praktikums bestätigten die Nützlichkeit eines derartigen Messplatzes. Hinweise von Studenten zu (kleineren) Verbesserungen und Ergänzungen werden demnächst umgesetzt. Mit der relativ großen Zahl an Nutzern wurde demonstriert, dass der realisierte Aufbau der Messplatzinfrastruktur den parallelen Zugriff einer größeren Gruppe problemlos ermöglicht.

In Abstimmung mit dem Vorhaben KIKO (FKZ 15S9452C) wurde der Themenbereich von EducTUM um das Thema „Grundlagen des Strahlenschutzes“ erweitert. Dies erschien unter dem Gesichtspunkt einer der Zielsetzungen von EducTUM, der Bereitstellung von Wissen für die praktische Anwendung der zerstörungsfreien Charakterisierungsmethoden, als ergänzendes Element sinnvoll.

AP 3: Kommunikation

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, LaBr₃ und HPGe) 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: Summer School

Anfang April 2026 ist die Durchführung einer Summer School geplant. Im Berichtszeitraum wurde mit den ersten Vorbereitungen hierfür begonnen. Flyer mit „Save the Date“ wurden zum FORKA Doktorandenseminar im Vorfeld der KONTEC 2025 und auf der KONTEC 2025 verteilt. Ende 2025 wurden auf der EducTUM-Webseite, wie in den Flyern angekündigt, weitere Details sowie das vorläufige Programm freigeschaltet. Das Programm basiert auf einem roten Faden, der beginnend mit der Anlieferung eines Abfallgebundes alle Schritte in Theorie und Praxis beleuchtet, die für eine zerstörungsfreie Charakterisierung erforderlich sind. Ausblicke auf interessante Felder, wie der Einsatz von KI und Nutzung der Bayes-Statistik sollen das Themengebiet abrunden. Fokus wird auf die praktische Anwendung gelegt, d. h. die Teilnehmer sollen durch „eigene“ Messungen an den entsprechenden Messsystemen (Gamma-Spektrometer, segmentierte Gamma-Scanner, Röntgen-Radiographie, Gamma-Radiographie und Tomographie) einen tieferen Einblick in die Praxis erhalten. Ein Vormittag konnte mit dem Technical Meeting einer internationalen Expertengruppe verbunden werden.

Hierdurch haben die Teilnehmer der Summer School einerseits die Möglichkeit Einblick in einige der aktuell an europäischen kerntechnischen Anlagen bearbeiteten Themen zu gewinnen, andererseits mit den entsprechenden Experten in direkten persönlichen Kontakt zu kommen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

AP 1:

Der für den externen Zugriff auf den Messplatz bei RCM genutzte Server zeigte sporadisch Anzeichen von thermischen Problemen bei der Ausführung rechenintensiver Operationen, wie sie beispielsweise bei der Simulation von Spektren im online nutzbaren Gamma-Spektrometrieprogramm LVIS auftreten können. Die Ursache hierfür liegt möglicherweise in der Wasserkühlung des Servers und soll identifiziert und behoben werden.

Das bereits 2024 festgestellte Problem der zeitweise relativ langsamen Respons der Webseiten wurde bislang aus zeitlichen Gründen noch nicht angegangen. Es ist nunmehr vorgesehen eine Kopie von EducTUM bei einem anderen Webhoster temporär hochzuladen und zu testen, um sicherzustellen, dass die Ursache hierfür tatsächlich beim Provider liegt und nicht in einer eventuell fehlerhaften Konfiguration.

AP 2:

Die geplanten Arbeiten entsprechen den bereits im letzten Halbjahresbericht beschriebenen Punkten, wobei die höchste Priorität der Aufbereitung der bereits existierenden umfangreichen Inhalte und ihres Transfers in den Webauftritt von EducTUM gilt. Die bestehenden Webseiten werden weiterhin hinsichtlich der Verlinkung auf die neuen Seiten überarbeitet. Begleitend werden Grafiken, Animationen, Videos etc. zur Veranschaulichung der Lerninhalte neu erstellt bzw. bereits existierende gegebenenfalls weiter optimiert, wobei der primäre Fokus zunächst aber auf den Inhalten selbst liegen wird.

Die für die Vermittlung der Lerninhalte des Bereichs „segmentiertes Gamma-Scanning“ geplante Bereitstellung eines Programms zur Auswertung segmentierter Gamma-Scan-Messungen konnte im Berichtszeitraum nicht realisiert werden, da daran noch Anpassungen zur IT-Sicherheit durchzuführen waren. Die entsprechend erforderlichen Arbeiten sind nunmehr weitestgehend abgeschlossen und wir rechnen mit der online-Verfügbarkeit im ersten Halbjahr 2026. Die

entsprechenden Tutorials in Form von Texten, Videos etc. müssen noch erstellt werden. Da online-Messungen in diesem Fall nicht möglich sind, werden entsprechende gemessene Datensätze zur Verfügung gestellt. Gegebenenfalls sind hierfür Konvertierungsprogramme zu erstellen, die Messdaten der RCM-Scanner in ein geeignetes Datenformat transferieren. 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:

Abschluss der Vorbereitung und Durchführung der Summer School 2026. Das bestehende vorläufige Programm wird weiter konkretisiert und die Inhalte der Präsentationen, Führungen und praktischen Anwendungen ausgearbeitet. Weitere Schritte zur Gewinnung Teilnehmern werden durchgeführt.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es besteht ein Bezug zum Vorhaben KIKO (FKZ 15S9452C). Inhalte von EducTUM sollen einerseits als Datenbasis für die KI-basierte Wissensplattform KIKO genutzt werden, andererseits soll der Webaufttritt von EducTUM für die Bereitstellung von Informationen in Form ergänzender, ausformulierte und mit Grafiken und Animationen versehener Texte für geplante Laborexperimente im Rahmen von KIKO genutzt werden.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Thomas Bücherl, Thomas Narr, Anton Kastenmüller and Christoph Lierse von Gostomski, EducTUM - An Interactive Platform for Education and Training in the non-destructive analysis of radioactive materials, EPJ Web of Conferences 338, 11001 (2025), <https://doi.org/10.1051/epjconf/202533811001>

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9446A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Karlsruher Institut für Technologie (Universitätsaufgabe) – Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften – Institut für Technologie und Management im Baubetrieb	
Vorhabenbezeichnung: VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Konzeption, Bau des Demonstrators und Durchführung von Test- und Praxisphase	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2023 bis 31.08.2026	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 567.564,65 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing Sascha Gentes	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: Sascha.gentes@kit.edu

1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel des Forschungsantrages ZIKA ist es, die Innenkorrosion an radioaktiven Fassgebinden mittels zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) automatisch zu erkennen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden mit den bisherigen Forschungsergebnissen des Vorgängerprojektes EMOS kombiniert, das sich mit äußeren Schadenseinwirkungen der Fassgebäude 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 Fassgebäudes oder äußerlichen Veränderungen der Oberfläche. Wenn innere Schäden jedoch äußerlich bereits zu erkennen sind, ist die Integrität des beschädigten Fassgebäudes 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 mittelfallradioaktiven Abfallgebinden.

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

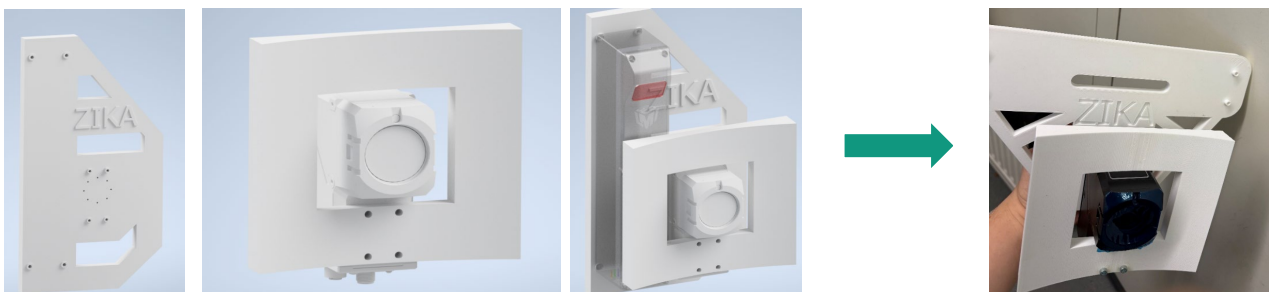
AP12: Evaluierung

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

In den Berichtszeitraum fallen die APs 5, 8 und 9.

Das AP 5 beinhaltet die Softwareentwicklung. Da der Demonstrator nicht, wie ursprünglich geplant, als Leistung vergeben wurde, wurde sich intensiv mit der Entwicklung und Programmierung der SPS beschäftigt, damit diese in Eigenleistung erfolgen kann. Nach Einarbeitung in das gewählte System von Siemens konnten hier die noch fehlenden Komponenten zusammengestellt werden und für den Zusammenbau des Schaltschranks vorbereitet werden.

Der Bau des Demonstrators gemäß AP 8 wurde wie geplant begonnen, mit der Einrichtung des Containers und dem Aufbau der Traversen die als grundlegender Tragrahmen dienen. Weitere Teile konnten bisher nicht montiert werden, da diese unerwartet deutlich später geliefert worden sind als angekündigt. Dies waren kritische Teile wie Montageplatten und die Hubsäulen, die es verhindert haben, dass bereits gelieferte Bauteile eingebaut werden konnten. Daher wurden andere Bauteile wie 3D-Drucke und Installation der Kamera vorgezogen was Teil des AP 9 ist. Die Installation der Thermografie konnte bisher nicht abgeschlossen werden, da das System in der letzten Arbeitswoche von 2025 geliefert wurde und nur auf Funktion getestet werden konnte.



Weiterhin wurde die Vorbereitung der ersten Probekörper gestartet, um die Sensoriken zu testen bzw. Anlernen zu können. Hierfür wurde mit Säure- Feuchtigkeits- und Wärmezufuhr auf verschiedenen Lackschichtdicken Korrosion erzeugt oder blieben unbearbeitet, um verschiedene Schichtdicken messen zu können.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Der Fokus liegt hier auf der Fertigstellung und das Testen des Demonstrators, um diesen für die Praxisphase in Berlin vorzubereiten. Alle relevanten Teile hierfür sind eingetroffen, es fehlen nur noch Teile, die für die Fertigstellung und Funktionsweise des Demonstrators relevant sind. Sobald der Demonstrator funktionsfähig ist, kann die Sensorik justiert werden und die Datenverwaltung und Auswertung realisiert werden (AP 8 & 9).

„AP 5 Softwareentwicklung“ wird ebenso im nächsten Halbjahr abgeschlossen. Dies ist essenziell, um den Demonstrator für die Praxisphase zu übergeben (AP 11) und um die Test- und Validierungsphase durchzuführen (AP 10).

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
- Artikel für KONTEC 2025 Magazin
- Präsentation von ZIKA auf der KONTEC 2025

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9446B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)		
Vorhabenbezeichnung: 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.		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2023 bis 31.08.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 289.823,13 €
Projektleiter/-in: Dr.-Ing. Julien Lecompañon		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: julien.lecompagnon@bam.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel des Forschungsantrages ZIKA ist es, die Innenkorrosion an radioaktiven Fassgebinden mittels zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) automatisch zu erkennen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden mit den bisherigen Forschungsergebnissen des Vorgängerprojektes EMOS kombiniert, das sich mit äußeren Schadenseinwirkungen der Fassgebände 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 Fassgebändes oder äußerlichen Veränderungen der Oberfläche. Wenn innere Schäden jedoch äußerlich bereits zu erkennen sind, ist die Integrität des beschädigten Fassgebändes 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 mittelfradioaktiven Abfallgebänden.

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 Fassgebänden mit verschiedenen Füllzuständen zu identifizieren, zu validieren und die geeigneten Verfahren für den automatisierten Einsatz in der Demonstratoranlage weiterzuentwickeln und im Testbetrieb zu verifizieren. Schwerpunktmäßig werden dazu verschiedene Ausprägungen der aktiven Infrarotthermografie, Ultraschall- und Wirbelstromprüfverfahren 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 Arbeitsprogrammunkten)

Im Berichtszeitraum konzentrierten sich die Arbeiten im Teilprojekt BAM weiterhin auf das Arbeitspaket AP5 „Softwareentwicklung“. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag dabei auf der gezielten Erweiterung der Datengrundlage für die Entwicklung und Validierung der Auswerte- und Defekterkennungsroutinen. Hierzu wurden neue Probekörper mit einer größeren Anzahl sowie einer erhöhten Variabilität an Defekttypen und -ausprägungen hergestellt und untersucht. Ziel war es, die vorhandenen Datensätze um realistischere und anspruchsvollere Schadensszenarien zu ergänzen und damit die Belastbarkeit der entwickelten Auswerteverfahren zu erhöhen (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16: Angepasster Messaufbau mit zwei Halogenlampen und einer bolometrischen IR-Kamera (links); Zwei neue Fassausschnitte (Auswahl) als Probekörper zur Verfahrensqualifikation mit rückwärtig eingebrachten Defekten (rechts).

Parallel dazu erfolgte eine konsequente Angleichung der experimentellen Randbedingungen an die späteren Gegebenheiten in der Demonstratoranlage. Dies umfasste insbesondere den Wechsel der thermischen Anregung auf die Verwendung von Halogenlampen sowie den Einsatz einer bolometrischen Infrarotkamera, wie sie auch für die Demonstratoranlage vorgesehen und beschafft worden sind. Durch diese Anpassungen konnten nun erste thermografische Messdaten unter demonstratornahen Bedingungen aufgenommen und ausgewertet werden, wodurch wichtige Erkenntnisse für die weitere Verbesserung der Auswertalgorithmik und der Messstrategie gewonnen wurden. Das Arbeitspaket AP5 ist weiterhin in Bearbeitung und noch nicht abgeschlossen.

Darüber hinaus unterstützte die BAM im Berichtszeitraum weiterhin die Arbeiten der Projektpartner im Rahmen der Arbeitspakete AP8: „Bau des Demonstrators“ und AP9 „Sensorik-installation“. Dies beinhaltete insbesondere die fachliche Abstimmung zur Auswahl, Integration und Inbetriebnahme der thermografischen Prüftechnik sowie die Rückkopplung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse in die Demonstratorentwicklung.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Zu Beginn des nächsten Berichtszeitraums ist der Abschluss des zweiten Projektmeilensteins M2 „Fertigstellung des Demonstrators“ vorgesehen. Dieser wird durch die Fertigstellung der vollständig integrierten Demonstratoranlage einschließlich installierter Sensorik, Anregungstechnik sowie der notwendigen Hard- und Softwarekomponenten für den automatisierten Prüfbetrieb erreicht.

Im zeitnahen Anschluss daran sollen auch die Arbeiten im Arbeitspaket AP5 „Softwareentwicklung“ abgeschlossen werden. Hierbei liegt der Fokus auf der Finalisierung der Auswerte- und Defekterkennungsroutinen unter demonstratornahen Bedingungen, der vollständigen Integration in die Demonstratorsteuerung sowie der Absicherung der Funktionalität für den automatisierten Betrieb. Die im bisherigen Projektverlauf aufgebaute und erweiterte Datengrundlage dient dabei als Basis für die abschließende Validierung der Software.

Darauf aufbauend ist die Umsetzung des Arbeitspakets AP10 „Test- und Validierungsphase“ geplant. In diesem Rahmen soll die thermografische Prüftechnik im vollständig aufgebauten Demonstrator systematisch getestet und validiert werden. Ziel ist die Bewertung der Detektionsleistung, der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowie der Robustheit des Gesamtsystems unter praxisnahen Betriebsbedingungen.

Parallel dazu ist geplant, mit den Arbeiten im Arbeitspaket AP11 „Praxisphase“ an der Landessammelstelle Berlin zu beginnen. In diesem Arbeitspaket soll der Einsatz der entwickelten Prüfmethodik unter realen Einsatzbedingungen vorbereitet und erprobt werden. Die dabei gewonnenen Erfahrungen sollen in die Gesamtbewertung des Systems einfließen und eine wichtige Grundlage für die abschließende Evaluierung des Projekts bilden.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

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

6. Berichte und Veröffentlichungen

Im Berichtszeitraum wurden die folgenden Veröffentlichungen umgesetzt:

- Artikel in Journal „Kerntechnik“ zusammen mit den Projektpartnern eingereicht.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9446C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Kraftanlagen Heidelberg GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Automatisierte zerstörungsfreie Innenkorrosionserkennung an radioaktiven Fassgebinden (ZIKA) TP: Planung und Projektberatung, sowie Vernetzung mit Experten aus dem Bereich der Kerntechnik		
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2023 bis 31.08.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 70.043,72 €
Projektleiter/-in: Dr. Martin Weiser		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: martin.weiser@bcen-kraftanlagen.com

1. Zielsetzung des Vorhabens

Das Gesamtziel des Forschungsantrages ZIKA ist es, die Innenkorrosion an radioaktiven Fassgebinden mittels zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) automatisch zu erkennen. Diese neu gewonnenen Erkenntnisse werden mit den bisherigen Forschungsergebnissen des Vorgängerprojektes EMOS kombiniert, das sich mit äußeren Schadenseinwirkungen der Fassgebäude 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 Fassgebäudes oder äußerlichen Veränderungen der Oberfläche. Wenn innere Schäden jedoch äußerlich bereits zu erkennen sind, ist die Integrität des beschädigten Fassgebäudes 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 mittelfallradioaktiven Abfallgebinden.

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 mehrere Arbeitspakete weiter vorangetrieben.

Im Rahmen der Softwareentwicklung (**AP5**) wurde hinsichtlich der Entwicklung der SPS unterstützt, wobei der Zusammenbau des Schaltschranks noch aussteht. Parallel wurde die Weiterentwicklung von Auswerte- und Defekterkennungsroutinen durchgeführt. Bei der Herstellung neuer Probekörper mit einer höheren Variabilität an Defekten wurde unterstützt, um realistischere Schadensbilder zu erhalten und die entwickelten Auswerteverfahren weiterzuentwickeln. Es wurden Anpassungen der experimentellen Bedingungen vorgenommen, um näher an den späteren Gegebenheiten des Demonstrators zu sein und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Der Bau des Demonstrators (**AP8**) wurde wie geplant begonnen, allerdings hat sich die Fertigstellung verzögert, da einige notwendige Teile wie Montageplatten und die Hubsäulen noch nicht geliefert wurden. Weiterhin wurden 3D-Drucke, u.a. zur Installation der Kamera, besprochen und erstellt.

Um die Sensoriken testen und anlernen zu können wurden durch Säure-, Feuchtigkeits- und Wärmezufuhr Korrosionen erzeugt, um verschiedene Schichtdicken messen zu können sobald das System einsatzbereit ist.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Für den folgenden Berichtszeitraum ist die Fertigstellung des Demonstrators geplant, einschließlich der Installation und Inbetriebnahme der Messsensorik, insbesondere der thermografischen Sensoren, zur Vorbereitung der Praxisphase bei der ZRA. Die Steuerung des Systems wird so entwickelt, dass Testdurchläufe mit vorbereiteten Probekörpern durchgeführt werden können und die Messsysteme aktiv Messungen vornehmen.

Im Anschluss folgt die Test- und Validierungsphase (**AP10**) in der im vollständig aufgebauten Demonstrator alle Funktionalitäten getestet werden. Wichtige Punkte sind in diesem Kontext die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und die Robustheit des Gesamtsystems.

Die Praxisphase (**AP11**) soll unter realen Einsatzbedingungen zeigen wie nützlich der Demonstrator ist und an welchen Stellen es Nachbesserungsbedarf gibt. Diese Phase ist die Basis für die Bewertung des Gesamtsystems und die wichtigste Grundlage für die Abschlussevaluation.

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
- Artikel für KONTEC 2025 Magazin

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9437A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Friedrich-Schiller-Universität Jena (FSU)		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2022 bis 30.04.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 498.769,96 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Thorsten Schäfer		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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

Zu Beginn des Berichtszeitraumes wurde erfolgreich ein interaktiver Projekt-Workshop zur Planung der verbleibenden Projektlaufzeit durchgeführt

AP1: Die Laborlysimeter wurden weiter planmäßig bei konstanten Randbedingungen betrieben und Routineparameter wurden weiter überwacht. Der abgesenkte Wasserstand des vorherigen Berichtszeitraumes wurde bei 2 cm über der Bodenplatte gehalten und hydrogeochemische sowie kolloidchemische Parameter wurden in zwei Probenahmen während des Berichtszeitraumes untersucht. Nach rund 2500 Tagen Experimentdauer, wurde das Laborlysimeterexperiment zum Ende des Berichtszeitraumes durch die Entnahme und Beprobung aller vier Refesol-Bodenmaterialien beendet. Hierbei wurden Tiefenaufgelöst Proben entnommen und anschließend pro Lysimeter in 3 Tiefenbereiche vereinigt. Die obere Entnahmetiefe wird aufgrund der erhöhten Salinitäten nicht weiterverwendet. Die verbleibenden Horizonte wurden in ehemals „oxisch“ und „anoxisch“ unterteilt und für Topfexperimente nach einer Trocknungsphase genutzt.

AP2: Es wurde ein 3D-Modell der Lysimeter in HYDRUS erstellt und die stufenweise Anhebung des Wasserspiegels implementiert. Dabei stellte sich heraus, dass ein Vergleich des Modelloutputs mit den gemessenen Tensionen an den entscheidenden Stellen durch unvorhergesehene Unregelmäßigkeiten in den Tensiometerdaten stark behindert wird.

AP3: Eine Masterarbeit wurde im Zusammenhang der Vorexperimente zu Topfexperimenten abgeschlossen. Hierbei wurden isoliert voneinander und darauffolgend in ausgewählten Kombinationen relevante Prozesse des Verhaltens von Selenit im Modell einer Rhizosphäre mit dem Fokus auf der Interaktion mit Stellvertretern für Wurzelexsudate, Illit und zwei Mikroorganismen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass z.B. *Bacillus subtilis* ein Wachstumsoptimum bei 0.1 mmol L^{-1} Selenit bei gegebenen Versuchsbedingungen besitzt und extrazellulär Se(0) -Nanopartikel bilden kann. Letzteres wurde durch TEM-EDX und Beugungsmuster verifiziert. Die veränderte Speziation kann weiterhin eine veränderte Bioverfügbarkeit zur Folge haben, wodurch sich Transport- und Transferverhalten verändern.

AP4: Die aus den konsekutiven Säulenexperimenten gewonnenen Daten wurden gesichtet, sortiert und aufbereitet. Darüber hinaus wurde ein weiterer Versuchslauf durchgeführt, bei dem die Säulen für die drei Bodenhorizonte des RefeSol 01A direkt miteinander verbunden wurden. Im Vergleich zu den vorherigen Experimenten liefen diese Versuche über einen deutlich längeren Zeitraum, dadurch konnten auch für die stärker sorbierenden Elemente teils Konzentrationsdurchbrüche gemessen werden, die in den vorherigen Versuchen nicht beobachtet werden konnten. In allen Versuchen zeigte sich aber für U, Cs und Se ein sehr geringer Konzentrationsanteil mit hoher Mobilität. Die Durchbruchkurven für diese Spezies wurden mit einem mathematischen Modell gefittet. Die Ergebnisse sind für alle drei Elemente sehr ähnlich und deuten somit auf einen gemeinsamen Ursprung hin, z.B. eine Trägerspezies wie Nanopartikel oder gelöste Organik.

AP5: Die aus den Batch-Versuchen mit dem Unterbodenmaterial des RefeSol 01A generierten Daten wurden aufbereitet und es wurden K_d -Werte daraus bestimmt.

4. Geplante Weiterarbeit

AP1: Aufbereitung der gewonnenen Proben und Auswertung der verbleibenden Daten.

AP2: Es wird eine Erklärung für die beobachteten Unregelmäßigkeiten in den Tensiometerdaten gesucht. Darüber hinaus soll überprüft werden, ob die Daten aus der Entwässerungsphase sich besser eignen, um Aussagen über mögliche Hystereseeffekte zu treffen.

AP3: Die Topfexperimente mit Buschbohne, Lysimeterböden und zusätzlich Refesol 01A versetzt mit U, Cs, Se und Iod werden durchgeführt, relevante Parameter überwacht und Daten für die

abschließenden Modellierungsarbeiten gewonnen. Die Durchführung der Topfexperimente wird im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit (Masterarbeit) stattfinden. Die Daten werden weiterhin mit den bisherigen Erkenntnissen des AP3 verglichen.

AP4: Die in den Säulenexperimenten beobachteten Konzentrationsdurchbrüche sollen durch ein mathematisches Modell gefittet oder invers modelliert werden, um K_d -Werte und Konzentrationsanteile zu bestimmen. Diese sollen mit Literaturwerten sowie den Vorhersagen des UNiSeCs-Modells abgeglichen werden, wenn möglich unter Berücksichtigung eines eventuellen kolloidalen Transportes. Auf diese Weise sollen auch mögliche Ursprünge der im Experiment beobachteten mobilen Spezies eruiert werden.

AP5: Die experimentell bestimmten K_d -Werte sollen mit den Vorhersagen des UNiSeCs-Modells und den Säulenexperimenten verglichen werden. Dabei soll eine potentielle Sorption an die Illit-Nanopartikel in der Tracerlösung in das Modell implementiert 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

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

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9437B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Leibniz Universität Hannover / Institut für Radioökologie und Strahlenschutz (IRS) und Institut für Zellbiologie und Biophysik (IfB)		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2022 bis 30.04.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 998.850,94 €
Projektleiterin: Dr. Beate Riebe		E-Mail-Adresse der Projektleiterin: 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 Arbeitsprogramm Punkten)

AP-1a: Im Pu-Lysimeter konnte ein Transport an die Oberfläche (0-4 cm) festgestellt werden. Die übrigen Schichten (4-29 cm) zeigten eine stetige Abnahme der Aktivitätskonzentration von unten nach oben. Die unterste Schicht (42-25 cm) wies allerdings fast 90% der bislang detektierten Aktivität auf, was auf eine insgesamt geringe Mobilität von Pu in RefeSol-01A hinweist. Noch geringer fällt die Mobilität von Am-243 im Profil aus. Erste Messungen nach vollständiger Abtragung zeigen, dass der Großteil des Americiums in der untersten Bodenschicht (44-45 cm) verblieben ist. Dagegen weist das Tc-Lysimeter die höchsten Aktivitätskonzentrationen in den obersten Schichten auf, was für eine hohe Mobilität spricht.

AP-2a: Bei den mit I-125 und Tc-99 markierten Bodenproben ergab Die qPCR der 16S rRNA keinen Unterschied in der Anzahl der 16S rRNA-Genkopien im Vergleich zur Kontrolle, was darauf hindeutet, dass Radionuklide in den hier verwendeten Konzentrationen keinen Einfluss auf die Bakterienpopulation haben. Separate Cluster in der Beta-Diversität und Unterschiede in der Differential-Abundanzanalyse im Vergleich zur Kontrolle treten erst bei höheren Aktivitätskonzentrationen von Tc-99 auf. Experimente mit Arabidopsis zeigten signifikante Veränderungen sowohl in der Alpha- als auch in der Beta-Diversität der Bakterienpopulation. Wildtyp- und Knockout-Pflanzen unterschieden sich nicht signifikant.

AP-3a: Ein weiterer Rhizobox-Versuch mit Tc-99 wurde durchgeführt und Proben aus dem Wurzelraum sowie aus nicht durchwurzelter Boden entnommen. Bei sequentiellen Extraktionen aus diesen Bodenproben ließ sich kein signifikanter Unterschied in der Mobilität von Tc-99 feststellen. Zudem wurde eine neue Versuchsreihe zur Aufnahme von Se-75 in Tomaten und Paprika mit den Referenzböden RefeSol 01-A und 03-G in Töpfen durchgeführt, wobei die Messung der Pflanzenteile noch aussteht.

AP-4a: Die Tomatenpflanzen des neu aufgesetzten I-125-Lysimeters wurden geerntet und in Kompartimente unterteilt. Messung der Proben und Lysimeter-Abtragung stehen noch aus.

AP-1b: Klonierungsarbeiten für CRISPR-Cas9-Vektoren für IRT1-Homologe in Tomate sind abgeschlossen, nicht erfolgreiche Double- und Triple-Knockout-Arbeiten eingestellt

AP-2b: Am-Aufnahme-Experimente mit BY-2-Zellen nach Eisenmangel-Induktion sind abgeschlossen. Die Zellen zeigten nach Eisenmangel eine nicht signifikant leicht verringerte Am-Aufnahme (87% $\pm$ 12,2% der Aufnahme unter Kontrollbedingungen). ICP-MS Messungen von Europium (Eu)-Konzentrationen im Medium nach 24 h Exposition zeigten einen ähnlichen Trend. Hier war bei Eisenmangel-Kulturen eine signifikant höhere Eu-Konzentration im Medium zu messen (112% $\pm$ 3,34%, $p=0.0355$) verglichen mit den Medien von Kontrollzellen. Die Genexpressionsanalyse ergab eine signifikante Hochregulation des IRT1-Gens (218% $\pm$ 78,31%; $p=0.0286$) in Zellen, die unter Eisenmangel kultiviert wurden. Analog wurden Am-/Eu-Aufnahmeexperimente unter Calciummangel (0.03 mM vs. 3 mM) durchgeführt. Dabei wurde auch unterschieden, ob Calcium während der RN-Exposition präsent war oder nicht. Die Ergebnisse zeigten eine signifikant höhere Am-/Eu-Aufnahme ($p<0.0095/p<0.021$), wenn während der RN-Exposition kein Ca^{2+} anwesend war. Die Mangelkultur hatte wenig Einfluss auf die Am-/Eu-Aufnahme. Diese Ergebnisse deuten auf eine Konkurrenz zwischen Ca^{2+} und Am/Eu bezüglich der Aufnahme in die Zellen hin. Die Genexpressionsanalyse identifizierte vier verschiedene GLR3-like-Rezeptorkanäle (GLR3.3-like-var1, GLR3.3-like-var2, GLR3.4-like, GLR3.7-like). Ca^{2+} -Mangel für vier Tage führte zu einer signifikanten Herunterregulierung dieser Gene.

AP-3b: Am-Aufnahme-Experimente zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen *A. thaliana* Wildtyp-Pflanzen und irt1-Knockdown-Mutanten, wobei eine leicht höhere Am-Aufnahme in den irt1-Knockdown-Pflanzen zu beobachten war. Eisen-Defizient führte sowohl in Wildtyp, als auch in irt1-Knockdown-Pflanzen zu einer verstärkten Am-Aufnahme in die Blätter, wenn auch nicht signifikant. Erste Am-Aufnahmeexperimente mit GLR3.3- und GLR3.6-Knockout Mutanten zeigten keinen signifikanten Unterschied zum Wildtypen. Zur Erzeugung der IRT1-

Knockout-Tomatenpflanzen wurde die Tissue-Culture-Methodik erlernt und erste Pflanzen erfolgreich mit dem CRISPR-Cas9-Vektor für die ITR1-Variante2 transformiert und selektiert.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP-1a: Die Auswertung des Pu-Lysimeters wird abgeschlossen. Ebenso werden die Proben aus den Am- und Tc-Lysimetern vollständig untersucht. Ergänzend sind Versuche zu sequentieller Extraktion geplant, um Hinweise auf die Speziation in den Bodenschichten zu gewinnen. Das dritte Iod- sowie das Selen-Lysimeter werden abgetragen, die Bodenschichten und die Pflanzenproben analysiert.

AP-3a: Im Rahmen einer Bachelorarbeit werden Batchversuche mit Tc-99 bzw. I-125 und dem Boden RefeSol-01A durchgeführt. Dabei soll gezielt die Mobilisierung dieser Radionuklide durch Wurzelexsudat-Verbindung untersucht werden. Zudem wurde eine neue Versuchsreihe zur I-125-Aufnahme in Tomaten mit RefeSol 03-G gestartet.

AP-1b: Da keine maßgeblichen Ergebnisse zur RN-Aufnahme erzielt wurden, wurden die Klonierungsarbeiten eingestellt und die Generierung der IRT1-Knockout-Pflanzen vorangetrieben.

AP-3b: Wiederholung der Experimente zu Am-Aufnahme in Arabidopsis-GLR3.3/GLR3.6-Knockout-Mutanten und Iod-Aufnahme in PHT-Knockout-Mutanten. Genexpressions- und Proteinanalyse des IRT1-Transporters nach Eisenmangelkultur wird abgeschlossen. Validierung der potentiellen IRT1-Knockout-Tomaten. Transformation der Pflanzen mit IRT1-Variante1-Vektoren.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

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

6. Berichte und Veröffentlichungen

'Role of Plant Transporters in Uptake of Radioactive Elements' (Poster: Bose S., Sassenberg N., Lechrich T., Peuker J., Schmalz T., Riebe B., Walther C., Niehaus M., Fischer L., Krumweide L., Witte C.-P., Herde M., Ngezahayo A.; 8th International Conference on Environmental Radioactivity (ENVIRA) 2025, Kraków, Poland)

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9437C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V., Institut für Ressourcenökologie		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2022 bis 30.04.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 473.892,37 €
Projektleiter/-in: Dr. Susanne Sachs		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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

AP1: Zur Bestimmung des Einflusses von Uran (U) und Äpfelsäure (ÄS) als Vertreter von Wurzelexsudaten auf die mikrobielle Diversität im Refesol-01A Boden wurde ein Wiederholungsversuch durchgeführt. Ziel war es, die statistische Signifikanz der bisherigen Ergebnisse (Variationen auf Ebene der Gattungen) zu bestimmen. Die Datenanalyse steht noch aus.

AP2: Die Experimente zur Wechselwirkung von *Mesorhizobium* sp. DNB0012 (bakterielles Isolat aus Refesol-01A) mit U wurden in Abhängigkeit von der U-Konzentration, der Expositionszeit und in Gegenwart von ÄS fortgeführt. *Mesorhizobium* sp. DNB0012 zeigt eine ausgeprägte U-Bioassoziationsfähigkeit, die stark von ÄS beeinflusst wird. Dies ist auf die Bildung von Uranyl(VI)-Malat-Komplexen in Lösung (spektroskopischer Nachweis) zurückzuführen. Die U-Bioassoziation ist am höchsten in Abwesenheit von ÄS und sinkt in deren Gegenwart. Gleichzeitig sinkt auch die U-Toxizität. Die Ergebnisse weisen auf eine speziationsabhängige Wechselwirkung von U mit *Mesorhizobium* sp. DNB0012 hin, was einen Einfluss auf die U-Bioverfügbarkeit im Boden haben kann.

AP3: Die in einer Masterarbeit begonnenen Arbeiten zur Komplexierung von Europium (Eu(III); Analogon für dreiwertige Actinide) mit ausgewählten Dicarbonsäuren (Bernstein- und Glutarsäure) als repräsentative Vertreter von Wurzelexsudaten wurden mit Oxal- und Malonsäure komplettiert. Eu(III)-Glutarat-Präzipitate wurden näher charakterisiert.

AP4: Kleinskalige Säulenexperimente (Säulenlänge: 25 cm, Ø 5 cm) zur Untersuchung des Einflusses von Wurzelexsudaten auf den U-Transport in einem künstlichen Bodensystem (Quarzsand–synthetisches Bodenwasser) wurden begonnen. Zunächst wurde eine U-Durchbruchskurve ($[U]_0$: 20 µM) zur Bestimmung des Transportverhaltens von U aufgenommen. Ein signifikanter Anteil des in die Säule injizierten U's wird vom Quarzsand immobilisiert. In weiterführenden Experimenten wird der Einfluss von ÄS auf den U-Transport untersucht. Die experimentellen Daten werden dem Projektpartner an der Universität Bremen für Modellierungsrechnungen zur Verfügung gestellt.

AP-5: Die Arbeiten zur Rolle von GLR3.3, GLR3.6 und IRT1 Transportproteinen für die Eu(III)- und U(VI)-Aufnahme in *Arabidopsis thaliana* Pflanzen wurden abgeschlossen.

AP6: Wechselwirkungsuntersuchungen von U mit *Phaseolus vulgaris* Pflanzen (Buschbohne) weisen auf eine erhöhte Wurzelausscheidung von Aminosäuren in Gegenwart von U hin. Mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie konnten Aminosäuren identifiziert werden. In Zusammenarbeit mit der Firma AFIN wurden mittels Non-Target-Screeninganalyse Wurzelexsudate von U-exponierten und nichtexponierten Pflanzen untersucht und dabei Substanzen aus verschiedenen Stoffklassen identifiziert bzw. Hinweise auf deren Vorkommen gewonnen. Die Ergebnisse deuten zudem auf eine erhöhte Ausscheidung verschiedener Exsudate in U-Gegenwart hin.

Als Datenbasis für die Dosis-Modellierung wurde die Aufnahme von U in *P. vulgaris* Pflanzen und deren Früchten (Schoten und Samen) analysiert. Dazu wurden Pflanzen in Hydrokultur aus Samen kultiviert. 14 Tage nach dem Auskeimen der Samen bzw. nach der Bildung von Blüten wurden die Pflanzen mit U exponiert und weiter kultiviert, bis sich Früchte entwickelten. Danach wurden die Pflanzen in ihre Bestandteile (Wurzel, Stängel, Blätter, Schoten, Samen) zerlegt und die U-Gehalte dieser analysiert. Beim Vergleich der U-Konzentrationen in Abhängigkeit vom

Blattalter, wurden die höchsten U-Konzentrationen in den ältesten Blättern detektiert. In den essbaren Schoten und Samen wurde U in niedrigen Konzentrationen nachgewiesen. Die U-Konzentration der Pflanzen, die erst nach der Bildung von Blüten mit U exponiert wurden, war geringer. Statistisch signifikante Unterschiede der U-Konzentration in den einzelnen Bestandteilen der Früchte waren nicht nachweisbar. Zur Erlangung eines tieferen Verständnisses der U-Aufnahme von der Wurzel bis in die Früchte wurden der apoplastische und symplastische Transport untersucht. Es zeigte sich, dass der apoplastische Transport von U überwiegt, was eine erschwerte Weiterleitung von U in die Früchte zur Folge hat. Zur weiteren Vertiefung des Verständnisses der U-Aufnahme wurden pH-abhängige Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden dem Ökoinstitut zur Verfügung gestellt.

4. Geplante Weiterarbeit

AP1: Abschluss der Datenanalyse zum Einfluss von U und ÄS auf die mikrobielle Diversität im Refesol-01-A Boden und Verfassen einer Publikation

AP2: Abschluss der Arbeiten zur Wechselwirkung von U mit *Mesorhizobium* sp. DNB0012; Lokalisation von U in *Mesorhizobium* sp. DNB0012 Zellen mittels Transmissionselektronenmikroskopie; Untersuchung des mikrobiellen Abbaus von ÄS; Erarbeitung einer Publikation

AP3: Abschluss der Arbeiten zur Eu(III)-Dicarboxylat-Komplexierung, Erstellung einer Publikation

AP4: Untersuchung des Einflusses von ÄS auf den U-Transport im synthetischen Bodensystem

AP5: Erarbeitung einer Publikation in Zusammenarbeit mit Projektpartnern

AP6: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Freisetzung von Wurzelexsudaten sowie zur Aufnahme von U in *P. vulgaris* Pflanzen – Erarbeitung einer Publikation

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

Linares-Jiménez, R.E., Drobot, B., Steudtner, R., Tsushima, S., Goldbach, D., Stumpf, T., Sachs, S., Kretzschmar, J.: Structures and thermodynamics of dinuclear species formed in a uranyl(VI)–malic acid system: a multi-technique approach. *Dalton Transactions* **54** (2025) 17839, <https://doi.org/10.1039/D5DT02117K>.

Linares-Jiménez, R.E., Wei, T.-S., Steudtner, R., Flemming, K., Cherkouk, A., Stumpf, T., Sachs, S.: The impact of uranium and malic acid on microbial communities in a reference soil. Goldschmidt Conference 2025, Prague, Czech Republic, 06.-11.07.2025 (Vortrag).

8th International Conference on Environmental Radioactivity – ENVIRA 2025, Kraków, Poland, 14.-19.09.2025:

Mätzkow, J.M., Steudtner, R., Bok, F., Stumpf, T., Sachs, S.: Interaction of *Phaseolus vulgaris* plants with U(VI): Release of root exudates and their impact on the U(VI) speciation (Vortrag; Preis Best Student Oral Presentation).

Linares-Jiménez, R.E., Wei, T.S., Steudtner, R., Cherkouk, A., Stumpf, T., Sachs, S.: The impact of uranium and malic acid on soil microbial communities and a *Mesorhizobium* isolate (Vortrag).

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9437D
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Öko-Institut e.V.		
Vorhabenbezeichnung: VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Radioökologische Modellierung.		
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2022 bis 30.04.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 324.912,58 €
Projektleiter/-in: Veronika Ustohalova		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 RNAufnahme in Pflanzen, als auch Modelle zur Beschreibung dieser Prozesse berücksichtigen bisher kaum den Einfluss von Mikroorganismen und nanopartikulärer Phasen. Pflanzen modifizieren über Wurzelausscheidungen u.a. Mikroorganismengesellschaften sowie RN-Sorptionsmechanismen in der Rhizosphäre. Mikroorganismen wiederum sind von zentraler Bedeutung für biogeochemische Prozesse der Pedosphäre und damit für die Mobilität und Pflanzenverfügbarkeit von RN, da sie pH- und Redox-Verhältnisse alterieren, die RN sorbieren oder inkorporieren (biomineralisieren) oder Komplexbildner ausscheiden. Natürliche nanopartikuläre Phasen in der Boden-Porenlösung nehmen ähnlichen Einfluss, wobei die Rolle dieser Phasen in Präsenz von Wurzelexsudaten noch nicht geklärt ist. Weiterhin tragen variable hydraulische Bedingungen in Bodensystemen zur potenziellen Remobilisierung von RN und zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Bodenorganismengemeinschaften und der Mobilität nanopartikulärer Phasen bei. Gesamtziel des Verbundprojektes ist die deutliche Vertiefung des mechanistischen Verständnisses von nano- bis mesoskaligen Mobilitätsprozessen von RN in der Pedosphäre und Rhizosphäre sowie von Aufnahmemechanismen in Pflanzen und die Überführung des generierten Prozessverständnisses in makroskalige Biosphärenmodelle.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

AP-1: Abstimmung zum Ablauf der Lysimeterexperimente mit schwankenden Wasserständen und zu Umlaufsäulenexperimenten hinsichtlich der Übertragbarkeit der Prozesse und Parameterwerte in 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 schwankendem 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 Arbeitsprogramm Punkten)

AP-übergreifend: Regelmäßige Treffen mit der Fa. AFRY zur Programmierung und Softwareoptimierung einzelner Modellversionen und Modellteile im AISM finden weiterhin statt.

AP1: Im Rahmen der Summer School im Juli haben die Projektpartner die Optionen zur Implementierung der Ergebnisse aus laufenden Experimenten in das Biosphärenmodell diskutiert. Ebenso wurden weiterführende Experimente (Batch-Experimente FSU-AnGeo; Pflanzenexperimente an der LUH-IRS und am HZDR) vorgeschlagen. Das Thema wurde im Projektmeeting in Hannover im Oktober weiterverfolgt. Teilweise wurden neue Experimente durchgeführt; die Ergebnisse aus den Lysimeter- (FSU-AnGeo, LUH-IRS) und Pflanzenexperimenten (LUH-IRS, HZDR) werden laufend weitergegeben und im Modell implementiert.

AP2: Die Modellierung mit HYDRUS-3D am FSU-AnGeo wurde im Herbst 2025 gestartet; der Austausch der Ergebnisse ist für das 1. Quartal 2026 geplant. Der im AISM implementierte vereinfachende Ansatz der linearen Diffusivität-Wassergehalt-Beziehung wird zunächst beibehalten.

AP3: Die Schwankungsbereiche der Sorptionswerte (K_d) wurden zeitunabhängig in Form von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (PDFs) im AISM im Modellteil „Bodentransport“ implementiert, um Parameterunsicherheiten abzubilden. Für jedes Radionuklid und jeden Bodentyp wird eine PDF definiert, basierend auf PHREEQC-Modellierungen oder Expertenschätzungen. Die Bodentypen repräsentieren dabei charakteristische Eigenschaften wie pH-Wert sowie Gehalte an organischer Substanz und Tonmineralien. In Abstimmung mit der Fa. AFRY werden Rechenläufe mit mehreren PDFs parallel durchgeführt; PDF-Funktionen werden zudem auf weitere Parameter ausgeweitet. Die im Zuge der Rechenläufe identifizierten Anpassungsbedarfe der Solver-Einstellungen im AISM werden seitens AFRY optimiert.

AP4: Das numerische Schema (Finite-Volumen-Methode) für die Richards-Gleichung sowie die Konvektions-Dispersions-Gleichung soll die Wasserspiegelschwankungen innerhalb einer definierten Zeitspanne im Einklang mit den Experimenten abbilden und den Radionuklidtransport berücksichtigen. Der Wasserspiegelanstieg im Lysimeterexperiment erfolgt in definierten Zeitschritten mit einem gesteuerten Anstieg des Wasserspiegels; die Reduktion des Wassergehalts durch Evapotranspiration wird ebenfalls berücksichtigt. Hierzu wurde die Diskretisierung der Bodensäule im Modell auf 2-cm-Schritte verfeinert. Langzeitberechnungen mit gekoppeltem Modellteil „Pflanze“ erweisen sich als problematisch, sowohl hinsichtlich der Plausibilität der Ergebnisse und numerischer Instabilitäten als auch in Bezug auf die Software-Robustheit. Lösungsansätze werden im Austausch mit AFRY erarbeitet und die Diskretisierung optimiert.

AP5: Der Modellteil „Pflanze“ stellt aktuell die einzelnen Pflanzenteile und Wurzelzellschichten dar und verfügt über Schnittstellen zu den Bodenschichten des Modellteils „Bodentransport“. Die Schnittstellen zum Modellteil „Bodentransport“ mussten entsprechend der verfeinerten Diskretisierung ausgebaut werden. Dabei muss der Transfer von der wasservolumenbezogenen Konzentration über die Wurzeloberfläche in die gewichtsbezogene Konzentration in der Pflanze berücksichtigt werden. Ebenso werden das Wurzelwachstum und die Vegetationsperiode berücksichtigt. Parallel dazu werden die Ergebnisse der Experimente der Projektpartner schrittweise mit Blick auf die Implementierbarkeit in das AISM-Modell bewertet und

eingearbeitet. Weiterhin erfolgt eine Differenzierung der Modellstruktur, die verschiedene Pflanzentypen berücksichtigt.

AP6: Der Modellteil „Dosisberechnung“ ist ausgebaut und soll über zwei Optionen der Dosisberechnung verfügen: Eine Option gemäß AVV-Vorgaben zu Expositionspfaden für die Kontamination von Boden und Pflanzen und anderen Umweltkompartimenten; eine Option, die in diesem Expositionspfad zusätzlich die detaillierte Pflanzendarstellung und Radionuklidaufnahme berücksichtigt. Die optionale Dosisbestimmung befindet sich in Bearbeitung.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP1: Fortführung des Informationsaustauschs zu den Lysimeterexperimenten mit schwankendem Wasserspiegel sowie zu den Umlaufsäulenexperimenten mit FSU-AnGeo, LUH-IRS und UB in Bezug auf die PHREEQC-Modellfortentwicklung und Austausch der Ergebnisse. Austausch zu den Ergebnissen der Pflanzenexperimente. (FSU-AnGeo, LUH-IRS, HZDR und IfB).

AP2: Austausch zur Modellierung der Effekte der Hysteresis in 3D HYDRUS mit FSU-AnGeo und Vergleich der Ergebnisse mit dem vereinfachten Ansatz in AISM.

AP3: Fortsetzung der Implementierung geeigneter Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Kd-Werte und andere transportwirksame Parameter, Ausbau der probabilistischen Modellierung weiterer Parameter sowie Durchführung von Rechenläufen einschließlich Dosisabschätzung.“

AP4: Fortsetzung der Rechenfälle zur Validierung der Modellteile Boden und Pflanze, Durchführung gekoppelter Rechenfälle und Prüfung der Schnittstellen. Abschluss des Aufbaus der Schnittstelle zum Modellteil „Dosisabschätzung“. AP5: Fertigstellung des Modellteils „Pflanze“ unter Einbindung der finalen Experimentergebnisse. (FSU-AnGeo, LUH-IRS, HZDR und LUH-IfB).

AP6: Finalisierung und Erweiterung des Modellteils „Dosisabschätzung“ einschließlich Ausbau aller Schnittstellen. Vergleichende Rechenläufe mit dem Gesamtmodell.

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

Präsentation im Rahmen des internationalen Forschungssymposiums des BASE SafEND 2025.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9437E	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Universität Bremen - Institut für Umweltphysik			
Vorhabenbezeichnung: VP: Transfer langlebiger Radionuklide aus der vadosen Zone in die Rhizosphäre und deren Aufnahme in Pflanzen unter Berücksichtigung mikrobiologischer Prozesse (TRAVARIS) TP: Geochemische Modellierung der in den Teilprojekten A und B untersuchten Systeme			
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2022 bis 30.04.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 300.035,70 € (gekürzt am 19.11.2024)	
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Matthias Günther		E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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 RNAufnahme 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)

Da Siderophore in der Wurzelzone eine wichtige Funktion hinsichtlich des Eisentransports besitzen und möglicherweise auch die Nuklidspeziation und ihre Partitionierung beeinflussen, wurde dies mit Hilfe der geochemischen Modellierung (mit DFOB als Modellsubstanz) ebenso wie für Citrat für die Elemente U, Am und Pu überprüft (AP-5, AP-6). Dazu mussten aus der Literatur Bindungskonstanten für diese Elemente und auch für Konkurrenzionen beschafft und in das bestehende Modell implementiert werden. Eine besondere Schwierigkeit war dabei, dass einige Literaturwerte noch auf die Bedingungen bei verschwindender Ionenstärke umgerechnet werden mussten. Dies geschah mit Hilfe der IUPAC-Korrektursoftware „Ionic Strength Corrections for Stability Constants“, Version 2. Für den Refesol 1 wurden pH-abhängige Berechnungen der Speziation von U, Am und Pu bei Konzentrationen von 4 mM Citrat und 1 μ M DFOB (diese Werte liegen an der oberen Grenze dessen, was in der Wurzelzone zu erwarten ist) pH-abhängige Berechnungen durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass das Al^{3+} als Hauptkonkurrent den größten Einfluss auf die Nuklidspeziation hinsichtlich Citrat und DFOB hat. Bei der im letzten Halbjahr eingeführten neuen Al-Schätzung ergibt sich, dass das DFOB nur im sauren Bereich ($\text{pH} < 4.5$) einige Prozent des in Lösung befindlichen Pu komplexiert, ohne DOM wären dies allerdings bis etwa 50%. Für U und Am scheint DFOB unter allen Bedingungen keine Rolle zu spielen. Das Citrat ist nur für Am bei niedrigem DOM und hohem $\text{pH} > 6$ relevant.

Es wurde damit begonnen, einen Artikel für eine Fachzeitschrift zu verfassen, in dem das im Projekt weiterentwickelte Programm KdMultigrid (entwickelt u.a. zur Berechnung von K_d -Matrizen für die Teilprojekte A und D) vorgestellt wird. Es wird dort auch der weiterentwickelte UNiSeCs-Ansatz zur Sorptionsmodellierung dokumentiert. Der Artikel soll Anfang Februar 2026 eingereicht werden.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die Analysen für die verschiedenen Unterbodenschichten der Lysimeter an der Uni Jena liegen jetzt (Anfang 2026) vor. In Absprache mit der modellierenden Kollegin werden die Parameter für die K_d -Matrizen (AP-3) festgelegt und die Berechnungen zeitnah durchgeführt.

Es sollen die am HZDR durchgeführten Versuche (Teilprojekt C, AP-3) modelltechnisch nachvollzogen werden.

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

-

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9445A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Friedrich-Schiller-Universität Jena	
Vorhabenbezeichnung: 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	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 31.12.2026	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 948.538,75 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Thorsten Schäfer	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Standortsspezifische 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 fand im November ein Projekttreffen in Jena mit allen Projektpartnern statt.

- AP 1: Eine Simulation eines Starkregenereignisses auf Lysimetern auf der Gessenwiese und in Mikrokosmos-Experimenten mit unterschiedlichen Substraten und Mykorrhiza-Inokulationen mit anschließender Nanopartikel-Analytik wurde zur Einschätzung des Erosionsschutzes durchgeführt.
- AP 2: Rhizosphären-Porenwasser in den Lysimetern auf der Gessenwiese wurde vor und nach einem simulierten Starkregenereignis gewonnen zur anschließenden LC-OCD-OND-Analytik mit Fokus auf Wurzelexsudate.
- AP 3: Die Auswertung der Elementgehalte in der oberirdischen Biomasse von der Ernte Anfang 2025 auf den Testfeldern Gessenwiese und Kanigsberg sowie der Brennstoffanalytik und Prüfstandskessel-Untersuchung ist erfolgt. In Beerwalde wurde eine Multispektralmessung mittels Drohne mit gleichzeitiger händischer Fluoreszenzmessung und Blätterprobenahme zur Durchführung von Stressparameter-Tests durchgeführt.
- AP 4: Das hydrogeochemische Monitoring von Grundwässern auf der Gessenwiese wurde fortgeführt.
- AP 5: Die Wirtschaftlichkeit der in der zweiten Wachstumsphase (Kanigsberg) sowie der dritten Wachstumsphase (Gessenwiese) gewonnenen Biomasse im Hinblick auf eine thermische Verwertung wurde bewertet. Ein Mikrowellenaufschluss und eine anschließende ICP-MS-Analyse ausgewählter Baumbohrkerne von einem chrombelasteten Standort in Indien sind erfolgt.
- AP 6: Das „1st Environmental Interfaces Symposium“ wurde in Jena mit aktiver Beteiligung aller Projektpartner durchgeführt, ergänzt durch einen Workshop zur wirtschaftlichen Nutzung von Biomasse aus Bergbaufolgelandschaften mit Projektpartner AFRY. Die Weiterqualifizierung der Doktorandinnen/PostDoc erfolgte durch die Teilnahme an Seminaren, am Mentorenprogramm des JSMC sowie an der Goldschmidt-Konferenz. Zudem fand ein Forschungsaufenthalt bei SUBATECH in Frankreich zur Durchführung von LA-ICP-MS-Messungen an Baumbohrkernen statt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP 1: Sowohl Auspflanzung von Bäumen mit und ohne Pilzinokulation wird weiter ausgewertet. Die Mikrokosmen zur Abschätzung des Einflusses von Mykorrhiza auf Erosion werden weiter ausgebaut.
- AP 2: Die Auswertung der LC-OCD-OND-Daten von Rhizosphären-Porenwasserproben aus den Lysimetern der Gessenwiese hinsichtlich des Effekts eines simulierten Starkregenereignisses soll durchgeführt werden.
- AP 3: Die Charakterisierung der gewonnenen Aschen nach der thermischen Verwertung der Anfang 2025 auf den Testfeldern Gessenwiese und Kanigsberg geernteten Biomasse hinsichtlich ihres Elementgehalts ist vorgesehen. Die Methodenentwicklung an der LA-ICP-MS für die Analyse von Baumbohrkernen mit anschließender Analyse der bereits entnommenen Baumbohrkerne ist geplant. Die Auswertung der Multispektralmessung in Kombination mit Fluoreszenzmessungen und Stressparameter-Tests wird fortgeführt.
- AP 4: Die Analyse und Auswertung von Durchwurzelungsdaten, Mykorrhizierungsraten, Boden- und Wurzelproben vom Testfeld Bareground hinsichtlich des Erosionsschutzes ist geplant. Die Analysen aller anderen Testfelder werden ausgewertet.
- AP 5: Die Analyse von Baumbohrkernen aus einem mit Chrom kontaminiertem Standort in Indien mittels LA-ICP-MS ist geplant.

AP 6: Mentoring und Qualifizierung zum Schreiben von international begutachteten Artikeln sowie Konferenzteilnahmen an nationalen und internationalen Konferenzen (z.B. VAAM 2026) für alle Promovierenden/Postdocs ist geplant. Es werden Publikationen zum Abschluss der Arbeiten im Projekt vorbereitet.

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

- Begum S. 2025. Interpretation of mycorrhizal symbiosis by the interaction between cultured bacteria and *Tuber borchii*. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Burghardt, G. 2025. Einfluss von Metallstress auf Ektomykorrhizapilze. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Duran Rios, S.V. 2025. Analysis of soil microbial communities and mycorrhizal colonization in a post-uranium mining landscape. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Eisenreich J. 2025. *Schizophyllum commune* und die Bedeutung von Lipid-rafts-assoziierten Proteinen für die oxidative Phosphorylierung. Bachelorarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Kothe, E. 2025. Fungal diversity. J Basic Microbiol. 65:e2400775.
- Kothe, E. 2025. Gene expression and regulation. J Basic Microbiol. 65:e70029.
- Kothe, E. 2025. Plant resilience through microbial biocontrol. J Basic Microbiol. 65:e70079.
- Nettemann, S., Mirgorodsky, D., Fürst, D., Lenk, K., Merten, D., Willing, K., Rosenbaum, M.A., Kothe, E., Schäfer, T. (2025) Land reclamation of a former uranium mining site: Combined metal phytostabilization and biomass production. Total Environment Engineering. 100029.
- Nettemann, S., Warthöfer, J., Kothe, E., Schäfer, T. (2025). Stabilizing organic carbon in post-mining soils through calcareous soil additions and microbial inoculation: Insights from an eight-year short rotation forestry field experiment. Posterbeitrag. Goldschmidt-Konferenz Prag, 06.07. – 11.07.2025.
- Nettemann, S., Warthöfer, J., Kothe, E., Schäfer, T. (2025). Stabilizing organic carbon in post-mining soils through calcareous soil additions and microbial inoculation: Insights from an eight-year short rotation forestry field experiment. Posterbeitrag. 1st Environmental Interfaces Symposium Jena, 09. – 10.10.2025.
- Plut, V. 2025. An insight into transcriptome data and its meaning during the metal and salt stress and in the mycorrhizal interaction of *Tricholoma vaccinum*. Masterarbeit, Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Pukallus, C., Nettemann, S., Riefenstahl, M., Berger, D., Böhm, M., Petersen, L., Kothe, E., Schäfer, T. (2025). Biomonitoring of trace element uptake by trees in a former uranium mining area in Germany. Posterbeitrag. Goldschmidt-Konferenz Prag, 06.07. – 11.07.2025.
- Schönfeld, L. (2025) Verwertbarkeit der Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen auf ehemaligen Uranabbauflächen: Potentiale der energetischen Nutzung und übertragbare Konzepte. Masterarbeit. Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9445B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Wismut GmbH	
Vorhabenbezeichnung: VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften TP: Entwicklung von Verfahren zur gezielten Vitalisierung des Wismut-Sanierungswaldes mittels Bodenmikroorganismen und Prüfung minimalinvasiver Biomonitoring-Methoden	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 31.12.2026	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 44.976,87 €
Projektleiter/-in: Dipl. Ing. agr. Mirko Köhler	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Standortsspezifische 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 Juli 2025 ein Arbeitstreffen und im November 2025 ein Projekttreffen statt. Im August 2025 wurde das Geländepraktikum der FSU Jena aktiv durch Wismut begleitet. Im Oktober 2025 nahm Wismut aktiv am Environmental Interfaces Symposium teil.

- AP 1: Die Datenübergaben der Wismut GmbH zu Detailinformationen zur Halde Beerwalde an die FSU Jena wurden fortgesetzt. Die Dateninhalte waren: Zeitreihen Bodenfeuchte und Bodentemperatur, aktuelle Monitoringberichterstattung, Hydrochemie der Sickerwässer, Ergebnisse der durchgeführten Feststoffanalytik und Informationen zum Abdeckmaterial. Die statistische Datenauswertung zu Klimaprojektionen wurde durch Wismut fortgesetzt und im Rahmen einer Videokonferenz der FSU Jena präsentiert.
- AP 4: Wismut erhob und übergab für das hydrogeochemische Monitoring von Sickerwässern auf der Halde Beerwalde dem Projektpartner FSU Jena.
- AP 6: Im Rahmen des Geländepraktikums der FSU Jena unterstützte die Wismut aktiv durch allgemeine Informationen zum Sanierungsobjekt Halde Beerwalde und sicherte die Zugänglichkeit sowie die Arbeitssicherheit vor Ort ab. Durch die aktive Teilnahme und Präsentation der Wismut zum Environmental Interfaces Symposium konnten Sanierungserfahrungen geteilt und vermittelt werden.

4. Geplante Weiterarbeiten (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- AP 1: Die Auswertungen zur meteorologischen Extremereignissen unter Berücksichtigung des Klimawandels werden mit dem Fokus auf Detailbetrachtungen und deren Dokumentation fortgesetzt. Die Daten zum Sickerwasser der Lysimeter auf der Halde Beerwalde (Hydrochemie und Mengen) werden fortlaufend durch Wismut erhoben und an die FSU Jena übergeben.
- AP 6: Die Dokumentation zu den meteorologischen Auswertungen (Messungen und Klimaprojektionen) ist im Rahmen des Abschlussberichtes vorgesehen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

keine

6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9445C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: AFRY Deutschland GmbH		
Vorhabenbezeichnung: VP: Einfluss der Mykorrhizosphäre von Bäumen auf die Bodenentwicklung und Erosionsverminderung von Uran-Bergbaufolgelandschaften (MykoBEst) TP: Wirtschaftliche Begleitung und Bewertung		
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2023 bis 31.12.2026		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 53.611,19 €
Projektleiter/-in: Dr. Timo Kuntzsch		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 Präsenzmeetings mit den Projektpartnern im Oktober und im November sowie weitere Online-Meetings (ca. monatlich) mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena abgehalten.

Schwerpunkte der Arbeiten im Berichtszeitraum bildeten die Vorbereitung und die Durchführung des Workshops im Bereich „Weiterqualifizierung und Outreach“ entsprechend des Projektantrages.

(AP 5) Die Arbeiten zur Erarbeitung und Bewertung von Nutzungspfaden (Verwertbarkeitsstudie) wurden fortgesetzt. Die vorliegenden Berechnungsblätter bzw. -modelle wurden bereitgestellt, um die aktuellen Ergebnisdaten aus dem Berichtszeitraum zu berücksichtigen und entsprechende Anpassungen vorzunehmen (u.a. Auswertung neuer Erntedaten in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena).

(AP 6) Der Workshop zu Nutzungspfaden und wirtschaftlichen Aspekten der Biomasseproduktion wurde am 7. und 8. Oktober 2025 im zeitlichen und räumlichen Zusammenhang mit dem „Environmental Interfaces Symposium“ (vormals „Sanierungskolloquium“) in Jena wie geplant abgehalten. Der Workshop erhielt mit 25 Anmeldungen eine gute Resonanz insbesondere bei Studenten und Doktoranden aber auch Mitarbeitern anderer Forschungseinrichtungen. Der Workshop umfasste eine Exkursion inkl. Besichtigung von Technikums- und Praxisanlagen im Chemiapark Leuna sowie Fachvorträge und Workshops in den Räumlichkeiten der FSU Jena. Damit konnten den Teilnehmern neben den im Projekt erzielten inhaltlichen Ergebnisse vor allem die Umsetzung naturwissenschaftlich-technischer Forschungsergebnisse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nahegebracht werden.

Weiterhin nutzte AFRY interne und externe Kommunikationskanäle (AFRY-Newsletter, soziale Medien wie „LinkedIn“) für die Bekanntmachung und Diskussion der Projektaktivitäten.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

(AP 5) Die Verwertbarkeitsstudie soll abgeschlossen werden. Weiterhin erfolgt gemeinsam mit den Projektpartnern die Erarbeitung des Vorgehens für Nachnutzungsstrategien.

(AP 6) Gemeinsam mit den Projektpartnern erfolgt eine geeignete Veröffentlichung der Projektergebnisse.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

/

6. Berichte und Veröffentlichungen

/

Berichtszeitraum: 01.10.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9454A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)		
Vorhabenbezeichnung: VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse - Technische Entwicklung (ReNATE) TP: Tomographie von Desorptionsreaktionen: Positronen-Emissions-Tomographie für die Quantifizierung der Remediation kontaminierter Materialien		
Laufzeit des Vorhabens: 1.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 789.943,45 €
Projektleiter: Prof. Dr. Cornelius Fischer		E-Mail-Adresse des Projektleiters: c.fischer@hzdr.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des *Verbundes* ist die Bereitstellung eines biologischen Behandlungsverfahrens zur *ex situ*-Sanierung radionuklidkontaminierter Erdstoffe bzw. Bodenmaterialien durch Pflanzen. Aufbauend auf biogeochemischen Erkenntnissen zur Mobilisierung und Entfernung von Radionukliden wird die Effizienz bestehender Ansätze zeitlich und quantitativ optimiert. Das daraus abgeleitete Konzept berücksichtigt dominante Einflussfaktoren wie Kontaminationstyp, Substratchemie und -struktur, Pflanzentyp und -zyklus sowie Parameter des Reaktiven Transports. Auf dieser Parameterbasis werden Effizienz, quantitative Einflussfaktoren und insbesondere die Übertragbarkeit auf andere Erdstoffe aus Rückbauprojekten abgeschätzt und bewertet. Daraus wird ein Arbeitsablauf für die *ex situ*-Dekontamination erarbeitet. Die Ziele des *Vorhabens des HZDR* umfassen die quantitative Bewertung der material- und skalenabhängigen Dekontaminationseffizienz unter Verwendung tomografischer Analytik und andererseits eine gezielte und substratabhängige Optimierung der Phytoextraktion.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Im HZDR-Vorhaben wird (i) die räumliche Heterogenität, Effizienz und Skalierbarkeit der Dekontamination in unterschiedlichen Erdstoffen untersucht. Grundlage sind tomografische Untersuchungen zu Dekontaminationsheterogenitäten im Säulenmaßstab (mm-dm), die mit großskaligen Datensätzen (Palettenboxmaßstab) verknüpft werden, um eine belastbare Übertragbarkeit auf die technische Anwendung zu ermöglichen. Die quantitative Bewertung der Dekontaminationseffizienz in Abhängigkeit von Materialparametern (chem. Zusammensetzung, Porosität und Kutan-Mineralogie) mündet in eine prognostische Parametermatrix zur Effizienzabschätzung und Optimierung zukünftiger Anwendungen. Weiterhin (ii) setzt das Vorhaben des HZDR die Übertragung und Weiterentwicklung von im Labor gewonnenen Erkenntnissen zur Bioassoziation von Radionukliden hin zu einer pflanzenbasierten Sanierung kontaminierter Erdstoffe um. Aufbauend auf hydroponischen Vorarbeiten werden ausgewählte, robuste Pflanzenarten auf unterschiedlich radionuklidbelasteten Erdstoffen kultiviert. Dabei werden Pflanzenwachstum, Biomasseertrag, Bioverfügbarkeit und der Transfer von Radionukliden in die oberirdische Biomasse systematisch untersucht. Ein Schwerpunkt liegt auf der Optimierung der Phytoextraktion durch die gezielte Zugabe natürlicher und synthetischer Mobilisierungsagenzien sowie durch die Förderung von Pflanzen-Mikroorganismen-Symbiosen mittels Mykorrhiza- und Bakterienkulturen. Ergänzend werden Zeige- und Hyperakku-

mulatorpflanzen auf verschiedenen kontaminierten Standorten getestet, um den aktiven Radionuklidtransfer zu verifizieren und das Bodeninventar zu reduzieren.

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

- (i) Im Berichtszeitraum wurde die neu eingestellte Doktorandin in der Abteilung „Reaktiver Transport“ eingearbeitet. Der Fokus der Einarbeitung lag auf analytischen Schwerpunkten, insbesondere auf tomografischen Methoden, sowie auf den geochemischen Randbedingungen der Kontaminantenmobilisierung.
- (ii) Im Berichtszeitraum wurde in der Abteilung „Strahlenforschung an biologischen Systemen“ ab 01.12.2025 für das Vorhaben eingestellt. Sie arbeitet sich in das Vorhaben ein, einschl. Details zum abgeschlossenen Verbund RENA. Vorarbeiten schlossen ausführliche Literaturrecherche zur Phytoremediation bzw. Phytoextraktion von Radionukliden sowie ausgewählten Pflanzen und deren Phytoremediationspotential ein. Weiterhin erfolgte Auswahl von Bodenmaterial im Verbund (unkontaminierter VKTA-Boden sowie kontaminierter Boden aus Rückbauprojekten vom KKW Rheinsberg, Standort Rossendorf und Brunsbüttel; ggf. Hettstedt & Schollene). Es erfolgte eine Eingrenzung auf 18 Phytoremediationskandidaten im Projektverbund unter dem Gesichtspunkt des Pflanzenwachstums und des Phytoremediationspotentials, weiterhin Festlegung auf 5 Pflanzen für erste Experimente (*medicago sativa*, *helianthus annuus*, *trifolium incarnatum*, *avena strigosa*, *lotus corniculatus*). Es erfolgten weiterführende Arbeiten zur Erstellung einer Publikation aus den Ergebnissen der Masterarbeit („Wechselwirkung von Europium mit Dicarbonsäuren als mögliche Wurzelexsudate“) von Frau Lucie Uhlitzsch.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- (i) Es werden erste tomografische Untersuchungen (μ CT und PET) zu Substraten unterschiedlicher kompositioneller und struktureller Zusammensetzung durchgeführt. Es werden Tests mit verschiedenen PET-Nukliden und Mobilisierungsagencien umgesetzt.
- (ii) Es erfolgt Anzucht von Pflanzen auf unkontaminierten VKTA-Boden zur Findung einer optimalen Fruchtfolge, weiterhin Bestimmung der bioverfügbaren Metallkonzentration durch sequentielle Extraktionsversuche des Bodenmaterials. Es werden Pflanzenexperimente in aktiven Böden und Bestimmung von Transferfaktoren durchgeführt, es erfolgt Analyse und Auswahl von Dünger sowie Auswahl geeigneter Mikroorganismen zur Steigerung der Phytoremediationseffizienz. Die Publikation der Ergebnisse aus der Masterarbeit von Frau Lucie Uhlitzsch erfolgt.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Am 4. Dezember trafen sich in Leipzig alle Projektleiter und Mitarbeiter der Vorhaben des RENATE-Verbundes. Dabei wurden unter anderem die wichtigen Randbedingungen für Probenmaterialien, die Auswahlstrategie für Pflanzenarten, das gemeinsame experimentelle und analytische Herangehen sowie die Vernetzung der Arbeiten, insbesondere auf Doktorandenebene, besprochen und definiert.

6. Berichte und Veröffentlichungen

-

Berichtszeitraum: 01.10.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9454B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: VKTA – Strahlenschutz, Analytik & Entsorgung Rossendorf e. V.		
Vorhabenbezeichnung: VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse Technische Entwicklung (ReNATE) TP: Upscaling der Phytoremediation		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 336.350,92 €
Projektleiter/-in: Dr. Manja Vogel		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: manja.vogel@vkta.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des *Verbundes* ist die Bereitstellung eines biologischen Behandlungsverfahrens zur *ex situ*-Sanierung radionuklidkontaminierter Erdstoffe bzw. Bodenmaterialien durch Pflanzen. Aufbauend auf biogeochemischen Erkenntnissen zur Mobilisierung und Entfernung von Radionukliden wird die Effizienz bestehender Ansätze zeitlich und quantitativ optimiert. Das daraus abgeleitete Konzept berücksichtigt dominante Einflussfaktoren wie Kontaminationstyp, Substratchemie und -struktur, Pflanzentyp und -zyklus sowie Parameter des Reaktiven Transports. Auf dieser Parameterbasis werden Effizienz, quantitative Einflussfaktoren und insbesondere die Übertragbarkeit auf andere Erdstoffe aus Rückbauprojekten abgeschätzt und bewertet. Daraus wird ein Arbeitsablauf für die *ex situ*-Dekontamination erarbeitet.

Ziel des Teilprojektes ist es die Phytoremediation im großskaligen Maßstab hinsichtlich Biomasseertrag bei gleichzeitig hoher Radionuklidaufnahme zu optimieren. Zusätzlich sollen Verfahren für eine effiziente Abtrennung von Biomasse aus dem Erdstoff sowie für die Bewertung des Phytoremediationserfolgs entwickelt werden.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Verbundprojekt RENA erfolgt die Anzucht verschiedener Pflanzen in Palettenboxen im Gewächshaus auf radionuklidkontaminierten *ex situ*-Erdstoffen aus dem Rückbau verschiedener kerntechnischer Anlagen (Rossendorf, Rheinsberg, Brunsbüttel, etc.). Der Bioremediationserfolg soll validiert und optimiert werden. Dies beinhaltet die Erhöhung des Biomasseertrags, die möglichst vollständige Durchwurzelung des Erdstoffmaterials sowie eine praktikable und möglichst vollständige Abtrennung der Biomasse vom Erdstoff am Zyklusende. Entsprechende Maßnahmen umfassen die Erprobung wachstumsfördernder sowie radionuklidmobilisierender Agenzien (z.B. Düngung, Chelatoren). Weiterhin wird der Bioremediationserfolg mittels Freimessanlage und Gammastrahlungsspektrometrie für die notwendigen Behandlungszyklen verfolgt. Im Austausch mit den Partnern werden die im Experiment ermittelten Parameter in die Skizzierung eines Entsorgungskonzepts sowohl von Pflanzen als auch Erdstoffmaterial münden.

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

In den ersten Monaten der Projektlaufzeit war das Genehmigungsmanagement (AP. 3.1) für die Phytoremediationsversuche im Gewächshaus ein zentraler Bestandteil der Arbeiten. Eine zwischenzeitliche Änderung der Genehmigung des Strahlenschutzbereichs, indem das Gewächshaus betrieben wird, einhergehend mit einem Wechsel der zuständigen Behörde (SMEKUL/SMUL zu LfULG) erforderten die Anzeige des Forschungsprojekts ReNATE sowie der geplanten Arbeiten bei selbiger. Die entsprechenden Unterlagen mit Beschreibungen der Infrastruktur, des radioaktiven Inventars, der Strahlenschutzmaßnahmen, der Emissionsabschätzung sowie der Inkorporationsabschätzung wurden erstellt und der Behörde Ende Dezember übergeben.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

In Bezug auf die Optimierung der *ex situ*-Bioremediation (AP3.2) im Gewächshaus gibt es Abstimmungen zwischen den Projektpartnern hinsichtlich der zu verwendenden Pflanzen und Methoden zur Erhöhung des Biomasseertrags und der Radionuklid entferntungseffizienz. Sobald es die Witterungsbedingungen zulassen wird die Gewächshausinfrastruktur erneuert und erste Remediationsexperimente mit den bereits aus dem Projekt RENA vorhandenen Erdstoffen vom VKTA bzw. der EWN-Rheinsberg durchgeführt.

Zudem wird an der Bereitstellung von weiteren Erdstoffen durch Dritte gearbeitet.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

-

6. Berichte und Veröffentlichungen

Berichtszeitraum: 01.10.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9454C	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Technisches Ingenieurbüro Krüger (TIK)			
Vorhabenbezeichnung: VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse (ReNATE) TP: Technische Entwicklung			
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 58.301,97 €	
Projektleiter: Dipl.-Ing.(FH) Siegfried Krüger		E-Mail-Adresse des Projektleiters: s.krueger@tik-online.com	

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des *Verbundes* ist die Bereitstellung eines biologischen Behandlungsverfahrens zur *ex situ*-Sanierung radionuklidkontaminierter Erdstoffe bzw. Bodenmaterialien durch Pflanzen. Aufbauend auf biogeochemischen Erkenntnissen zur Mobilisierung und Entfernung von Radionukliden wird die Effizienz bestehender Ansätze zeitlich und quantitativ optimiert. Das daraus abgeleitete Konzept berücksichtigt dominante Einflussfaktoren wie Kontaminationstyp, Substratchemie und -struktur, Pflanzentyp und -zyklus sowie Parameter des Reaktiven Transports. Auf dieser Parameterbasis werden Effizienz, quantitative Einflussfaktoren und insbesondere die Übertragbarkeit auf andere Erdstoffe aus Rückbauprojekten abgeschätzt und bewertet. Daraus wird ein Arbeitsablauf für die *ex situ*-Dekontamination erarbeitet, der anschließend standortnah umgesetzt werden kann und dessen Wirtschaftlichkeit geprüft wurde. Das Ziel der Firma TIK ist die Einbeziehung der Arbeitsergebnisse aller Verbundpartner zu einem Lösungsansatz im industriellen Maßstab. Hier ist auch eine Optimierung des Arbeitsablaufs im Focus, um hohe Volumen in einem zeitlich überschaubaren Rahmen abarbeiten zu können. Dabei ist die Gamma-Spektrometrie zur Bewertung der Proben und Ergebnisse eine unverzichtbare primäre Messmethode. Die von TIK erarbeiteten und mit den Verbundpartnern abgestimmten Vorschläge sollen in Folge mit Gutachtern und betroffenen Betreibern diskutiert werden.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Zur Umsetzung der letztendlich erforderlichen Freimessungen werden unterschiedliche Geometrien und Messanordnungen geprüft und im Vorfeld simuliert. Diese Arbeiten dienen der Ermittlung der Nachweisgrenzen für unterschiedlichen Geometrien, Werkstoffe und Materialien. Dabei werden auch unterschiedlichen Detektoren und Messmethoden betrachtet. Diese Ergebnisse werden mit den Verbundpartnern diskutiert, und die umsetzbaren Methoden der Nachweismessungen ausgewählt. Weiterhin wird bewertet in wie weit Änderungen zur technischen Abfolge, wie z.B. eine vorab Dekontamination durch Elektrostatik, zu einer Steigerung der Effizienz umgesetzt werden können.

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

- (iii) Im Berichtszeitraum wurde die mit eingebundenen Mitarbeiter der Firma TIK in das Projekt eingearbeitet. Der Fokus der Einarbeitung lag auf analytischen Schwerpunkten, insbesondere auf der Gamma-Spektrometrie mit unterschiedlichen Messmethoden, sowie auf den Rahmenbedingungen der Probeneigenschaften und den Vorgaben durch Strahlenschutzaspekte.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- (iii) Es wird untersucht ob- und in welchen Fällen eine elektrostatische Erstdekontamination eventuell den Aufwand der Dekontamination durch Biomasse minimieren oder Beschleunigen kann, und welche Voraussetzungen es dazu benötigt.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Am 4. Dezember trafen sich in Leipzig alle Projektleiter und Mitarbeiter der Vorhaben des RENATE-Verbundes. Dabei wurden unter anderem die wichtigen Randbedingungen für Probenmaterialien, die Auswahlstrategie für Pflanzenarten, das gemeinsame experimentelle und analytische Herangehen sowie die Vernetzung der Arbeiten, insbesondere auf Doktorandenebene, besprochen und definiert.

6. Berichte und Veröffentlichungen

-

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9454D
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Leibniz Universität Hannover, Institut für Radioökologie und Strahlenschutz		
Vorhabenbezeichnung: VP: Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse: Technische Entwicklung (ReNATE) TP: Freilandversuche und Radiometrische Analysen		
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2025 bis 30.09.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 513.080,02 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Clemens Walther		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: walther@irs.uni-hannover.de

1. Zielsetzung des Vorhabens

Ziel des *Verbundes* ist die Bereitstellung eines biologischen Behandlungsverfahrens zur *ex situ*-Sanierung radionuklidkontaminierter Erdstoffe bzw. Bodenmaterialien durch Pflanzen. Aufbauend auf biogeochemischen Erkenntnissen zur Mobilisierung und Entfernung von Radionukliden wird die Effizienz bestehender Ansätze zeitlich und quantitativ optimiert. Das daraus abgeleitete Konzept berücksichtigt dominante Einflussfaktoren wie Kontaminationstyp, Substratchemie und -struktur, Pflanzentyp und -zyklus sowie Parameter des Reaktiven Transports. Auf dieser Parameterbasis werden Effizienz, quantitative Einflussfaktoren und insbesondere die Übertragbarkeit auf andere Erdstoffe aus Rückbauprojekten abgeschätzt und bewertet. Daraus wird ein Arbeitsablauf für die *ex situ*-Dekontamination erarbeitet. Die Ziele des *Vorhabens des IRS* umfassen die Identifizierung dominanter mikro- und makroskopischer Transportpfade der Radionuklide und die Optimierung der Mobilisierung der Radionuklide aus den Böden in die Pflanzen für eine effiziente Phytoremediation.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Zu Beginn des Projekts wird eine Analyse der kontaminierten Erdstoffe, der vorhandenen Radionuklidspezies, und ihre Extraktionsmöglichkeiten unternommen. Darauf aufbauend werden ausgewählte, robuste Pflanzenarten auf unterschiedlich radionuklidbelasteten Erdstoffen in der Phytokammer kultiviert, um Pflanzenwachstum, Biomasseertrag, Bioverfügbarkeit und den Transfer von Radionukliden in die Biomasse systematisch zu untersuchen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Optimierung der Mobilisierung der Radionuklide durch die gezielte Zugabe von Additiven und Pilzkulturen. Diese Arbeiten sind in AP5.1 und AP5.2 zusammengefasst. Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse werden dann in AP5.3 auf die Testfelder angewandt, um die *in situ*-Phytoremediation zu testen. Parallel werden die makro- und mikroskopischen Transportpfade der Radionuklide innerhalb der Pflanze untersucht, um Akkumulationspunkte zu identifizieren (AP5.4, AP5.5 und AP5.6).

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

AP 5.1: Erste Untersuchungen der Böden des KKW Rheinsberg zur Identifikation und Quantifizierung der Radionuklide wurden durchgeführt. Die Isotope Cs-137, Eu-152, Co-60, Am-241, Ag-108m und Nb-94 sind mit dem Gamma-Detektor über QCY-Standards quantifizierbar und verfügen über Photopeaks, die nicht mit anderen Elementen überlagern. Weiterhin wurden radiochemische Trennverfahren für die Messung von Pu und Sr mit der ICP-MS entwickelt.

AP 5.2: In einer ersten Versuchsreihe wurde Mangold (*Beta vulgaris*) in Topfexperimenten auf inaktivem Boden des KKW Rheinsberg mit unterschiedlich konzentrierten Hoaglandlösungen aufgezogen, um die Eingangsbedingungen für die Experimente mit dem aktiven Boden zu bestimmen. Eine dreifach konzentrierte Hoaglandlösung gleicht den Nährstoffmangel des Bodens im gewünschten Maße aus, wobei die Phosphatkonzentration niedrig (25 µmol/L) gehalten werden kann. Der Boden hält die Feuchtigkeit sehr gut, sodass 150 ml Hoaglandlösung pro Woche ausreichend sind.

Die beiden Klimaschränke der Firma Binder (KBF 720 und KBF PRO 470) für die folgenden Pflanzenexperimente wurden im Kontrollbereich aufgestellt und installiert.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

AP 5.1: Die radiochemische Trennung von Pu und Sr für die Messung mit dem ICP-MS soll evaluiert und ggf. weiterentwickelt werden. Parallel wird die Extraktion nach Zeien und Brümmer mit dem Boden des KKW Rheinsberg durchgeführt, um die Bioverfügbarkeit der im Boden enthaltenen Radionuklide zu bestimmen. Hierbei soll auch eine Optimierung der Mobilisierung der Radionuklide durch Beigabe von verschiedenen biodegradierbaren Additiven (PBTCA, HEDP, ATPM, DTPMP) getestet werden.

AP 5.2: Für die Pflanzenexperimente im Klimaschrank wird eine größere Menge (~180 kg) homogenisierten Bodens benötigt. Die Homogenisierung soll in Chargen (~40 kg) mit einem Betonmischer erfolgen. Im Folgenden sollen erste Pflanzenexperimente im Klimaschrank mit Boden des KKW Rheinsberg unter Beigabe von Additiven zur Bestimmung von Transferfaktoren durchgeführt werden. Dabei soll, auf Basis der Ergebnisse aus dem RENA-Projekt, auch der Einfluss von Pilzen bei der Zugabe von Additiven ermittelt werden.

Außerdem ist für das Frühjahr 2026 eine Fahrt zu den Testfeldern nach Hettstedt und Schollene geplant, um Proben des Bodens und der bestehenden Pflanzen zu nehmen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

02NUK066C – Biologische Radionuklidentfernung durch Nutzung natürlicher Assoziationsprozesse (RENA), abgeschlossen.

Im Klimaschrank wurden Pflanzenwachstumsexperimente auf sandigen Böden durchgeführt, um die Aufnahme der Radionuklide Co-60, Cs-137, Eu-152 und Am-241 in die Pflanze zu bestimmen. Mithilfe dieser Experimente wurden Transferfaktoren für die Radionuklide für Sonnenblume und Lucerne bestimmt. Die Beigabe von Pilzen führte zu höheren Transferfaktoren von Cs-137 in den Wurzeln beider Pflanzen. Für die Sonnenblume konnte in einem Langzeitexperiment (9 Monate) eine zeitabhängige Radionuklidaufnahme nachgewiesen werden.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9448A	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: actimondo eG			
Vorhabenbezeichnung: VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanage-ment (K.I.S.S.) TP: Innovation in der Kerntechnik: Stärkung der nuklearen Sicherheit durch digitalisierte und bildungs-orientierte Ansätze			
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 279.712,60 €	
Projektleiter/-in: Dr. John Kettler		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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

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 wurde bis Ende 2025 ein Prototyp entwickelt und fertiggestellt, um den Use-Case für die Zielgruppe zu spezifizieren. In Modul 2 wurde mit den Verbundpartnern FIR, GRS und Hinneburg bis Mitte 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 Arbeitsprogramm Punkten)

Im Berichtszeitraum der zweiten Jahreshälfte 2025 lag der Schwerpunkt der Arbeiten des actimondo-Teams auf der Konsolidierung, Erprobung und inhaltlichen Ausgestaltung der in Modul 1 bis Modul 3 entwickelten Plattformkomponenten.

In Modul 1 wurde das Framework der mobilen Trainingsstation fertiggestellt. Die mobile Trainingsstation wurde technisch und didaktisch so weit ausgearbeitet, dass erste strukturierte Tests mit der definierten Zielgruppe durchgeführt werden konnten. Dazu wurden Erprobungen bei mehreren Organisationen umgesetzt, unter anderem bei der JEN Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen sowie bei Advanced Nuclear Fuels. Die Tests erfolgten mit Strahlenschutzfachkräften, Projektingenieurinnen und Projektingenieuren und dienten der Validierung von Bedienbarkeit, didaktischem Aufbau und Praxistauglichkeit. Ergänzend wurde die mobile Trainingsstation auf Fachveranstaltungen wie der World Nuclear Exhibition in Paris und der KONTEC in Dresden eingesetzt und dort unter realen Einsatzbedingungen demonstriert und erprobt. Parallel dazu wurde gemeinsam mit den Verbundpartnern ein abgestimmtes Trainings- und Einsatzkonzept für die mobile Trainingsstation entwickelt, das den praktischen Ablauf der Trainings, die Rollenverteilung sowie die Einbindung in bestehende Qualifizierungsmaßnahmen beschreibt. Dieses Konzept wurde erfolgreich umgesetzt und bildet die Grundlage für den weiteren Rollout.

Ebenfalls in Modul 1 wurde die Basistechnologie für die Community-Plattform festgelegt. Auf dieser Basis wurde ein erster Demonstrator der Community-Plattform entwickelt und intern vorgestellt. Der Demonstrator dient als technischer und konzeptioneller Ausgangspunkt für die öffentliche Präsentation im Jahr 2026. Gleichzeitig wurde mit dem Aufbau des Wissenspools begonnen. Hierzu wurden relevante Inhalte identifiziert, kuratiert und strukturiert, um eine belastbare Grundlage für den späteren Betrieb der Plattform zu schaffen.

In Modul 2 wurde der Demonstrator der digitalen Plattform für das Genehmigungsmanagement fertiggestellt. Der Demonstrator wurde iterativ weiterentwickelt, mit den relevanten Projektpartnern abgestimmt und erfüllt die im Arbeitsprogramm definierten funktionalen und technischen Anforderungen. Der aktuelle Stand ermöglicht den Einsatz des Demonstrators für Tests und Demonstrationen und bildet die Grundlage für die Vorstellung in der Ziel-Gruppe.

In Modul 3 wurden die vorgesehenen Anwendungsszenarien für die KI-gestützte Prozessführung festgelegt und verbindlich beschrieben. Darüber hinaus wurden die konzeptionellen Arbeiten zur Ontologie für den Wissenspool weitergeführt. Die relevanten Informationen und Strukturen wurden so weit zusammengetragen und ausgearbeitet, dass die Umsetzung der Ontologie vorbereitet ist. Das actimondo-Team unterstützte zudem die Verbundpartner bei der Entwicklung erster Anwendungen und Prototypen, insbesondere bei der technischen und konzeptionellen Umsetzung der definierten Szenarien. Diese Arbeiten wurden im Berichtszeitraum erfolgreich begonnen und fortgeführt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Im nächsten Berichtszeitraum sind in allen drei Modulen gezielte Weiterarbeiten vorgesehen, die an den erreichten Entwicklungsstand anknüpfen und die Überführung in eine breitere Anwendung vorbereiten.

In Modul 1 werden die Arbeiten an der mobilen Trainingsstation und der Community-Plattform weitergeführt. Für die mobile Trainingsstation liegt der Schwerpunkt auf der weiteren didaktischen Ausarbeitung der Trainingsinhalte sowie auf zusätzlichen Tests mit der definierten Zielgruppe. Neben weiteren Unternehmen aus dem nuklearen Umfeld sollen insbesondere auch Sachverständigenorganisationen in die Erprobung einbezogen werden. Vorgesehen sind unter anderem Tests bei der BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung. Die geplanten Erprobungen dienen nicht nur der Demonstration, sondern der systematischen Erhebung von Nutzungs- und Feedbackdaten. Auf dieser Basis sollen belastbare Aussagen zur Bedienbarkeit, Akzeptanz und zum didaktischen Mehrwert der mobilen Trainingsstation gewonnen werden, um die Anwendung gezielt an die Bedürfnisse der Zielgruppe anzupassen und für spätere Einsätze zu optimieren.

Parallel dazu wird der Prototyp der Community-Plattform weiterentwickelt und funktional erweitert, um eine Veröffentlichung vorzubereiten. Ziel ist es, die Plattform ab Mitte 2026 öffentlich zugänglich zu machen. Bis dahin sollen weitere kuratierte und validierte Inhalte in den Wissenspool integriert werden, sodass Nutzerinnen und Nutzer frühzeitig mit der Plattform arbeiten und Erfahrungen sammeln können. Die Weiterentwicklung erfolgt entlang der im Arbeitsprogramm definierten Meilensteine und dient der schrittweisen Etablierung der Community-Plattform als zentrale Austausch- und Wissensbasis.

Modul 2, die Entwicklung des Demonstrators für das digitale Genehmigungsmanagement, ist inhaltlich abgeschlossen. Als nächste Aktivität ist vorgesehen, den Demonstrator im Rahmen eines Workshops einer definierten Zielgruppe abschließend vorzustellen und zu diskutieren. Darüber hinaus wird geprüft, auf dieser Basis ein weiterführendes Verbundvorhaben zu initiieren, das die Überführung des Demonstrators in eine eigenständige, größere Entwicklungs- und Anwendungsphase ermöglicht.

In Modul 3 stehen die Umsetzung und Weiterentwicklung der KI-gestützten Anwendungen im Vordergrund. Gemeinsam mit den Verbundpartnern sollen die definierten Anwendungsszenarien konkret implementiert, weiter pilotiert und systematisch getestet werden. Ein zentraler Schwerpunkt liegt dabei auf dem weiteren Aufbau des Wissenspools, der als Grundlage für die KI-Anwendungen dient. Die Ontologie wird entsprechend weiter ausgearbeitet und mit validen Inhalten befüllt. Hierzu erfolgen Abstimmungen mit weiteren Projekten und Akteuren, um eine fachlich belastbare und anschlussfähige Wissensbasis sicherzustellen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Projekt KISS besteht ein enger fachlicher und organisatorischer Austausch mit nationalen und internationalen Vorhaben, um Synergien zu nutzen und parallele Entwicklungen gezielt miteinander zu verzahnen.

Auf nationaler Ebene besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem FORKA-Projekt KIKO. KIKO adressiert die Entwicklung eines KI-Agenten für Anwendungen im Rückbau kerntechnischer Anlagen und ergänzt damit inhaltlich insbesondere die Arbeiten in Modul 3 von KISS. Eine zentrale Schnittstelle zwischen beiden Vorhaben ist die Community-Plattform aus Modul 1, über die perspektivisch Inhalte, Anwendungen und Nutzergruppen miteinander verbunden werden sollen. Ziel ist eine komplementäre Weiterentwicklung der Ansätze, bei der die KI-gestützten Funktionen aus KIKO in die im Projekt KISS aufgebauten Wissens- und Trainingsstrukturen integriert werden können. Zwischen den Verbundpartnern beider Projekte finden hierzu regelmäßige Abstimmungstermine statt. Darüber hinaus besteht eine Kooperationsvereinbarung, die den Austausch von Ergebnissen und die koordinierte Weiterentwicklung formal absichert.

Auf internationaler Ebene erfolgt ein fachlicher Austausch mit Industriepartnern, unter anderem mit dem italienischen Unternehmen CEALUS, das digitale Lösungen für die kerntechnische Industrie mit Schwerpunkt auf KI-Anwendungen entwickelt. Im Dezember fand hierzu ein erstes bilaterales Meeting statt, in dem mögliche Kooperationsansätze und inhaltliche Schnittmengen diskutiert wurden. Der Austausch soll im weiteren Projektverlauf fortgeführt und bei Bedarf vertieft werden.

Im Kontext des Aufbaus des Wissenspools und der Entwicklung der Ontologie stehen wir zudem im Austausch mit dem EU-Projekt PLEIADES. PLEIADES hat eine Ontologie für den kerntechnischen Rückbau entwickelt, die als potenzielle Referenz und Grundlage für weiterführende Arbeiten im Projekt KISS dient. Ziel des Austauschs ist es, bestehende Ergebnisse zu nutzen, Kompatibilität sicherzustellen und Doppelentwicklungen zu vermeiden. Durch die Zusammenarbeit sollen Synergien gehoben und die Qualität sowie Anschlussfähigkeit der im Projekt KISS entwickelten Ontologie gestärkt werden.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Veranstaltungsbeiträge

- 1. September 2025 – EU-Fachmeeting zur nuklearen Sicherheit, Europäisches Parlament, Brüssel
 - Teilnahme am EU-Meeting zum Thema Sicherheit in der Kerntechnik und Vorstellung des KISS-Projekts mit Fokus auf die mobile Trainingsstation
- 14.–17. September 2025 – KONTEC 2025, Dresden
 - Vortrag zum KISS-Projekt im Rahmen des Konferenzprogramms
 - Demonstration der mobilen Trainingsstation am Stand der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) für das fachliche Zielpublikum
- 4.–6. November 2025 – World Nuclear Exhibition (WNE), Paris
 - Gemeinsame Teilnahme mit dem Verbundpartner Hinneburg GmbH
 - Vorstellung des KISS-Projekts und Demonstration der mobilen Trainingsstation am Messestand

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9448B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: GRS, Schwertnergasse 1, 50667 Köln		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 854.225,03 EUR
Projektleiter/-in: Dr. Holger Seher		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 der Endlagerung 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 Projektreffen beim Projektpartner ANF in Lingen statt.

Modul 1: Für die Communityplattform wurde die Zusammenarbeit mit dem Vorhaben KIKO zur Erarbeitung der modular aufgebauten Ontologien intensiviert. Es wurden 33 Use Cases ermittelt, für die jeweils Triplets für eine zukünftige Ontologie gebildet wurden. Die Communityplattform sowie die mobile Trainingsstation wurde auf der SafeND in Berlin mit einem Poster und technischen Demonstration vorgestellt.

Modul 2: In regelmäßigen Meetings mit dem Projektpartner FIR wurde der Stand der Softwareentwicklung zur digitalen Genehmigungsplattform verfolgt und die Entwürfe diskutiert. Insbesondere wurde die Entwicklung des Frontend im Berichtszeitraum besprochen und erste Funktionen in Grundzügen getestet. Die Schwerpunkte bildeten hier weiterhin der korrekte Prozessablauf, regulatorische Anforderungen sowie die Nutzerfreundlichkeit.

Modul 3: In Zusammenarbeit mit dem Modul 1 wurde mit der Planung des Aufbaus einer Use Case spezifische Ontologie für den „Benchmark-Assistenten“ begonnen. Hierzu wurde von Hoger Seher auf der Reise nach Halden Gespräche mit den Mitgliedern des EU-DORADO-Projekts geführt und ein möglicher Austausch von Daten diskutiert. An dem Use Case zur „Digitalisierung und Containerdokumentation“ wurde in Zusammenarbeit mit Hinneburg (vormals Dornier) und FIR weitergearbeitet.

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.

Modul 2: Sofern ein neuer Entwurf für die digitale Genehmigungsplattform erzeugt wird, können Arbeiten zur weiteren Qualitätssicherung stattfinden. Diese wurden von der GRS bisher noch nicht durchgeführt.

Modul 3: Erstellung einer Ontologie für einen der definierten Use Cases.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es fanden regelmäßige Treffen zusammen mit der FH Süd Westphalen als Koordinator des Projekts KIKO zum Thema Ontologien in den Modulen 1 und 3 statt.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Vorträge:

SafeND 2025: „Use of innovative technologies to support RWMO knowledge management, the GRS approach“

DigiDecom2025: “Use of innovative technologies to support knowledge management for decommissioning, the GRS approach”

Poster:

SafeND 2025: “The K.I.S.S. project – an overview”

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025	Förderkennzeichen: 15S9448C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: FIR e.V. an der RWTH Aachen Campus-Boulevard 55 52074 Aachen	
Vorhabenbezeichnung: 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.	
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 688.827,82 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: wolfgang.boos@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:

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.

Das FIR ist in diesem Kontext umfassend in die Entwicklung sowohl der virtuellen Trainingsumgebung (VR/AR) als auch dem Digital Smart Campus (DSC) eingebunden.

Im Rahmen der Prototypentwicklung und der Bereitstellung eines validen und funktionsfähigen MVPs unterstützt und berät das FIR die Projektpartner durch die Einbringung didaktischer und arbeitspsychologischer Expertise bei der Definition des Pflichtenhefts, der Integration weiterer Wissensinhalte sowie der Testung und Verbesserung der Plattform. Für die Erstellung der mobilen Trainingsstation (MTS), welche eine virtuelle Trainingsumgebung bieten soll, trägt das FIR durch die Koordination der Erstellung des Pflichtenheftes und Festlegung relevanter Grundanforderungen, die Bereitstellung wissenschaftlicher Expertise und didaktischer Konzepte und die Durchführung von Tests zur didaktischen Qualität der Trainingsumgebung bei. Darunter fällt ebenfalls die Durchführung einer Technologieanalyse und Identifikation potenzieller VR/AR-Technologien, die Analyse von Best-Practice-Erfahrungen, die Evaluierung der Eignung und Verfügbarkeit der Technologien sowie die Synthese der Soft- und Hardwarearchitektur für die Programmierungs-, Umsetzungs- und Betriebsphase. Abschließend unterstützt das FIR bei der

Testung und Evaluation einzelner Trainingsmodule, um die Qualität der Trainingsmodule sicherzustellen.

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.

Im Rahmen des Modul 2 erarbeitet das FIR das Design des Business-Ökosystems sowie die Konzeption einer Plattform-Governance zur Steuerung zentraler Akteure auf der digitalen Plattform. Dazu werden die relevanten Stakeholder identifiziert und ihre regulatorischen Anforderungen analysiert. Anschließend wird das aktuelle Ökosystem der Stakeholder mittels einer Value-Stream-Map visualisiert, wobei Wertbeiträge, Austauschbeziehungen und Schnittstellen der Stakeholder dargestellt werden. Es werden zudem Rollenprofile konzipiert und die Hauptaktivitäten dokumentiert. Die Anforderungen der verschiedenen Rollen im Business-Ökosystem für die digitale Plattform werden durch Interviews erhoben und dargestellt. Daraufhin wird das zentrale Wertversprechen definiert und ein Plattformkonzept mit den grundlegenden Funktionalitäten entwickelt. Die Kernprozess- und Transaktionsdefinitionen werden in einer Business-Process-Map visualisiert und die technischen Anforderungen in einem technischen Lastenheft sowie einem IT-Sicherheitsleitfaden festgehalten. Das Ziel-Ökosystem wird mit den Rollenprofilen zukünftiger Akteure gestaltet und ein Governance-Konzept entwickelt, das Compliance-Regeln und Koordinationsmaßnahmen umfasst. Im Anschluss erfolgten eine detaillierte Auswertung und ein Vergleich der erhobenen Anforderungen mit bestehenden IT-Systemen, gefolgt von der Entwicklung eines systematischen Ansatzes zur Auswahl geeigneter Plattform-Technologien. Nach der Auswahl geeigneter Technologien werden die Kernakteure für den Aufbau der Plattform identifiziert und eine Potenzialanalyse angrenzender Märkte mittels der Market-Adjacency-Methode durchgeführt. Abschließend erfolgt die Integration, indem detaillierte Use Cases beschrieben und konkrete Anwendungsfälle definiert werden. Die IT-Systemlandschaft wird erfasst und Systemabhängigkeiten werden dargestellt, um das technische Framework zu entwickeln. Es folgt eine agile Softwareentwicklung zur Anbindung an Bibliotheken und die Definition einer Integrationsstrategie, um die definierten Prozesse einzubetten und anschließend zu optimieren. Im Rahmen der Softwareentwicklung wird das Feedback des Konsortiums systematisch eingearbeitet und anhand verschiedener Mock-Ups sowie Konzeptentwürfe zur Plattformdarstellung überprüft. Nach der Umsetzung der Änderungswünsche erfolgt die Programmierung der digitalen Plattform entsprechend den Vorgaben des technischen Lastenhefts. In einem öffentlichen Webinar wird der MVP als Ergebnis von Modul 2 im Rahmen des Forschungsprojekts vorgestellt. Die Zielgruppe umfasst verschiedene Rollen und Stakeholder aus der Kernkraftwerksbranche, darunter Sachverständige, Behörden, Kernkraftwerksbetreiber sowie Dienstleister. Im Webinar werden die Kernfunktionalitäten der digitalen Genehmigungsplattform erläutert, wie die Modularität der zugrunde liegenden Funktionalitäten der Verfahrenserstellung aufgezeigt sowie die eingesetzten Blockchain-Funktionalitäten vorgestellt, insbesondere im Hinblick auf Revisionssicherheit und die transparente Nachverfolgbarkeit von Dokumenten. Ziel ist es, den Transfer der entwickelten Lösung in die industrielle Praxis zu unterstützen und den praktischen Mehrwert der Plattform nachvollziehbar darzustellen.

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.

Im Rahmen des Moduls 3 konzentriert sich das FIR auf die Recherche des Stands der Technik im Anwendungszusammenhang. Außerdem unterstützt das FIR den Konsortialpartner Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) methodisch bei der Anforderungsermittlung und -definition bezüglich der Vorgehensweise. Die Erstellung eines Datenmodells sowie die Datenvorbereitung der durch GRS identifizierten Dokumente für die Verwendung in Sprachmodellen sind weitere Arbeitspakete. Weiterhin liegt der Fokus auf der Technologierecherche und der Unterstützung bei der Erstellung eines Umsetzungskonzeptes, einschließlich der Identifikation geeigneter KI-Technologien (LLMs) und deren Anbindung an domänenspezifisches Wissen. Dabei kommen Methoden des Informationstechnologie-managements zum Einsatz. Im Projekt wurde entschieden, mehrere KI-basierte Use Cases umzusetzen. Das Vorhaben umfasst die iterative Programmierung dieser Use Cases, insbesondere der LLM-Entwicklung. Hierzu zählt die methodische Unterstützung der GRS bei der Entwicklung von User-Stories oder vergleichbaren Methoden zur Anwendungserfassung, das Design der Benutzeroberfläche mittels Wireframing-Tools, das Aufsetzen des Sprachmodells und der KI-Verfahren zur Textanalyse gemäß Systemarchitektur, die Implementierung des Front-Ends sowie die Systemintegration und Entwicklung der Schnittstellen. Abschließend wird das FIR/RWTH die Tests begleiten und Bugfixes, Hotfixes sowie kleinere Anpassungen an den KI-Komponenten auf Anfrage durchführen.

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 Arbeitsprogramm Punkten)

Modul 1:

Im Rahmen von Modul 1 wurde die Konzeption des DSC sowie die Weiterführung der MTS weiter vorangetrieben.

Zur Ausgestaltung des DSC-Prototypen brachte das FIR arbeitspsychologische und didaktische Perspektiven in die Plattformkonzeption ein, um das entstehende Wissens- und Lernökosystem konsequent nutzerorientiert auszurichten (AP1.1). Dies umfasste insbesondere die methodische Unterstützung bei der Strukturierung zentraler Nutzungsszenarien, die Ableitung von Gestaltungsanforderungen sowie die Einordnung in didaktische und ergonomische Leitprinzipien. Damit liegt das detaillierte Umsetzungskonzept für die Entwicklung des DSC (AP 1.1) abgeschlossen vor. Aufbauend darauf unterstützt das FIR in enger Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern die Weiterentwicklung der ontologie-basierten Wissensorganisation (AP 1.2). Im Fokus steht dabei besonders die Schärfung von Strukturprinzipien und Gestaltungsgrundlagen, die konsistente Modellierung zentraler Begriffe und Relationen sowie die Sicherstellung semantischer Nachvollziehbarkeit und der Relevanz des Wissenspools. Ergänzend wird die Konzeption des plattformintegrierten Profil-Setups begleitet, um eine zielgruppenspezifische Initialisierung und einen bedarfsgerechten Zugriff auf Wissensinhalte später zu ermöglichen.

AP 1.2 befindet sich demnach weiterhin in Bearbeitung und wird im Sinne einer iterativen Prototypenentwicklung fortlaufend weiter präzisiert und validiert. Eine Abweichung vom projektübergreifenden Gesamtzeitplan zeichnet sich derzeit nicht ab.

Für die MTS konnte die Entwicklung der virtuellen Trainingsumgeben (AP1.9) sowie die Erarbeitung der Trainingsszenarien (AP1.10) abgeschlossen werden. In wiederholten iterativen Abstimmungen und strukturierten Feedback-Loops mit dem Unterauftragspartner und den Projektpartnern wurden die Szenarien entlang didaktisch-pädagogischer Qualitätskriterien

weiterentwickelt und konsolidiert. Dadurch konnten insgesamt vier Trainingsszenarien finalisiert werden, bestehend aus zwei Safeguards- und zwei Strahlenschutz-Szenarien. Zur methodischen Erprobung und Evaluation der MTS (AP1.11) wurde der bestehende Beobachterbogen angepasst und um einen standardisierten Interviewleitfaden ergänzt, der unmittelbar nach der Anwendertesting eingesetzt wird. Durch diese Instrumente können der wahrgenommene Mehrwert der MTS im kerntechnischen Anwendungskontext sowie Kriterien wie Ergonomie, räumliche Orientierung, Cybersickness, wahrgenommene Nützlichkeit und Optimierungspotenziale systematisch und lernzielorientiert erfasst werden. Ergänzend wurden wissenschaftliche Fragebögen für eine quantitative Evaluation konzipiert. Die entwickelten Erhebungsinstrumente konnten bereits in ersten anwenderspezifischen Erprobungen der MTS mit kerntechnischem Fachpersonal eingesetzt werden, um sowohl die Trainingsinhalte als auch zentrale Interaktionsannahmen praxisnah zu überprüfen.

Modul 2:

Auf Grundlage, der in Arbeitspaket 2.1 durchgeführten Interviews zur Anforderungsanalyse und zum Plattformkonzept mit Projektbeteiligten, wurde entschieden, auf eine detaillierte Aufnahme der bestehenden IT-Systemlandschaft zu verzichten (AP2.3). Basierend auf den erstellten Prozessaufnahmen, den abgestimmten Anforderungen sowie dem technischen Lastenheft wurde das technische Framework für die Plattformtechnologie finalisiert (AP2.3).

Im Rahmen der agilen Softwareentwicklung wurden folgende Tätigkeiten umgesetzt (AP2.3): Die sichere Dateispeicherung über IPFS sowie die Integration des Hyperledger Explorers wurden erfolgreich implementiert, vollständig in das Gesamtsystem integriert und getestet. PDF-Dateien werden produktionsnah über IPFS gespeichert, während zugehörige Metadaten, wie Versionen und Änderungsverläufe, konsistent in der Blockchain erfasst und nachvollziehbar versioniert werden. Ergänzend wurde eine Benutzeroberfläche auf Basis eines Rollen- und Rechtekonzepts implementiert und validiert, um Datei-Zugriffe zentral, revisionssicher und kontrolliert zu verwalten. Die Softwareentwicklung erwies sich als herausfordernd, insbesondere aufgrund der Integration der Blockchain-Technologie mit den zuvor definierten Anforderungen. Dies führte zu einem erhöhten Entwicklungsaufwand im Vergleich zu den im Antrag angenommenen Aufwänden.

Die Integrationsstrategie zur Einbettung der definierten Prozesse und anschließenden Prozessoptimierung wurde ausgearbeitet und in der GitLab Plattform dokumentiert (AP2.3). Die Dokumentation vermittelt das notwendige Systemverständnis, um die Lösung zu deployen und zu betreiben. In mehreren Iterationen mit dem Konsortium wurden Bugfixes und Anpassungen abgestimmt und umgesetzt.

Nach der finalen Einarbeitung des Feedbacks aus dem Konsortium wurde die digitale Genehmigungsplattform im Modul 2 abgeschlossen. Im Anschluss wurde mit der Veröffentlichung und Publikmachung der finalisierten digitalen Genehmigungsplattform begonnen. Zu diesem Zweck wurde ein Webinar konzipiert, in dem sowohl die digitale Genehmigungsplattform als auch das Gesamtprojekt KISS vorgestellt und die erarbeiteten Projektergebnisse öffentlich präsentiert werden. Flankierend wurden gezielte Marketingmaßnahmen umgesetzt, bei denen die Einladung über verschiedene Kommunikationskanäle verbreitet wurde, um alle relevanten Stakeholder der Branche zu erreichen und die Plattform einer breiten Zielgruppe vorzustellen. Das Webinar wird im ersten Quartal 2026 stattfinden.

Modul 3:

Im Projekt wurde entschieden, mehrere KI-basierte Use Cases umzusetzen. Abweichend vom ursprünglich im Antrag vorgesehenen Wasserfallmodell wurde hierfür ein iteratives Vorgehen gewählt, um Erkenntnisse aus frühen Use Cases für nachfolgende Anwendungsfälle systematisch

zu nutzen. Die Unterarbeitspakete blieben inhaltlich grundsätzlich bestehen, wurden jedoch in ihrer konkreten Ausgestaltung der Aufgaben an die iterative Vorgehensweise angepasst.

Methodisch wurde ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Zunächst wurde ein Basissystem entwickelt, das die Umsetzung unterschiedlicher LLM-basierter Use Cases ermöglicht. Darauf aufbauend erfolgt die schrittweise, agile Umsetzung KI-gestützter Anwendungsfälle.

Im Rahmen von AP3.2 wurde eine Systemarchitektur für das Basissystem erarbeitet. Das Basissystem wurde anschließend im Rahmen von AP3.3 technisch umgesetzt und bildet die Grundlage für weitere Entwicklungen.

Als erster Anwendungsfall wurde der Use Case „Container-Dokumentation“ bearbeitet. Hierzu wurden Tätigkeiten aus AP3.1, AP3.2 und AP3.3 umgesetzt: Die Anforderungen wurden iterativ konkretisiert und mittels Wireframing mit dem Konsortium abgestimmt. Für den Use Case wurde ein spezifisches Datenmodell (AP3.1) und eine Systemarchitektur entwickelt (AP3.2). In enger Abstimmung mit einem Konsortialpartner wurden die zugrunde liegenden Prozesse analysiert, um Herausforderungen zu identifizieren und zusätzliche Anforderungen abzuleiten. Die Umsetzung erfolgte in mehreren Iterationen (AP3.3). Zunächst wurden Grundfunktionalitäten eines digitalen Formulars zur „Container-Dokumentation“ realisiert. Anschließend wurde das System um No-Code-Funktionalitäten zur Erstellung und zum Ausfüllen individueller digitaler Formulare sowie um eine KI-gestützte Validierung von Regeln und Richtlinien erweitert. Alle Funktionalitäten wurden in einem anwenderorientierten Front-End integriert.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Modul 1:

Im weiteren Verlauf des Projekts wird der DSC in Anlehnung an AP1.1/1.2 kontinuierlich weiterentwickelt und im Rahmen von AP1.3/1.4 zu einer integrierten Community- und Lernumgebung operationalisiert. Das FIR unterstützt dies durch wissenschaftliche Expertise bei der Ausgestaltung des Wissenspools sowie der späteren Durchführung von Testläufen, um Integration und Nutzbarkeit sicherzustellen. Parallel werden Projektpartner erste Inhalte bereitstellen, um die Plattformfunktionen iterativ auszubauen. Im Rahmen von AP 1.11 begleitet das FIR zudem die Validierung und Testung der MTS, insbesondere durch didaktisch-arbeitspsychologische Unterstützung der Trainingsmodule sowie die methodische Begleitung von Nutzertests. Das dabei erhobene Feedback soll anschließend systematisch ausgewertet und in Optimierungsempfehlungen für Szenarien und Trainingsstation überführt werden.

Modul 2:

Die im Modul 2 vorgesehene Weiterarbeit wird mit der Durchführung des Webinars abgeschlossen. Nach dessen Umsetzung sind keine weiteren Aktivitäten im Rahmen des Arbeitspakets 2 vorgesehen.

Modul 3:

Im nächsten Schritt erfolgt die Testphase des umgesetzten Use Cases „Container-Dokumentation“ im Rahmen von AP3.5 inklusive Tests, Bugfixes und kleinerer Anpassungen.

Anschließend wird der nächste Use Case nach dem gleichen iterativen Vorgehen wie beim aktuellen Use Case umgesetzt, unter anderem mit folgenden Schritten: Systemarchitektur, Mockups, Abstimmung mit dem Konsortium sowie Implementierung, Tests und Bugfixes.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Berichtszeitraum wurden in allen drei Modulen (AP) kein Bezug zu anderen Vorhaben vorgenommen.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Posterpräsentation für die safeND2025-7 2025 im September in Berlin. Die Mitarbeiter des FIR an der RWTH Aachen sind als Co-Autoren aufgeführt: Güner, B.; Hoeborn, G.; Pickert, A.; Malirsch, T.

Ergebnispräsentation des Verbundtreffens mit allen Konsortialpartner am 16. Juni 2025

Ergebnispräsentation des Verbundtreffens mit allen Konsortialpartner am 25. November 2025

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9448D	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich			
Vorhabenbezeichnung: VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Safeguards sowie Partitioning			
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 294.290,91 €	
Projektleiter/-in: Dr. Lisa Laumen		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: l.laumen@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 TP „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) Die Umsetzung der zwei Szenarien zum Strahlenschutz, „Detektion und fachgerechte Entsorgung kontaminierter Objekte“ sowie „Dekontamination einer ausgelaufenen Flüssigkeit“, ist erfolgt.
- 2) Die Umsetzung der 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“, ist erfolgt.

Da diese beiden Szenarien der internationalen Kernmaterialüberwachung sicherheitsrelevante Inhalte enthalten, ist die Teilnahme an entsprechenden Schulungen an eine gültige Sicherheitsüberprüfung der Schulungsteilnehmerinnen und -teilnehmer gebunden. Vor diesem Hintergrund wurden angepasste Szenarien konzipiert und in die Trainingsinhalte integriert. Dieses VR-Training ist für Demonstrationszwecke vorgesehen und kann beispielsweise im Rahmen von Konferenzen oder ähnlichen Veranstaltungen eingesetzt werden.

- 3) Die entwickelten Trainingsinhalte wurden umfassend getestet und im Rahmen eines systematischen Debugging-Prozesses zwischen Jülich, NUSEC, dem FIR Aachen, der TU Dresden und Actimondo technisch optimiert. Die Testdurchläufe erfolgten sowohl mit internen als auch mit externen Nutzergruppen. Unter anderem wurden Tests gemeinsam mit der Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen (JEN) sowie mit Framatome durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die unter Punkt 3 skizzierten Arbeiten im Rahmen von Modul 1 werden fortgesetzt. So sind unter anderem weitere Testdurchläufe mit externen Nutzergruppen vorgesehen.

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.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9448E
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Technische Universität Dresden – Center for Open Digital Innovation and Participation (CODIP)		
Vorhabenbezeichnung: VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Kapazitätsaufbau durch virtuell erweitertes Training und Entwicklung der Wissensgemeinschaft		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 414.910,89 EURO
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Thomas Köhler		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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 bei geeigneten Unternehmen und Institutionen aus dem Kernkraftbereich 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 basiert auf der Blockchain-Technologie und 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 setzen 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 und ist dabei insbesondere für die (medien-)didaktische Konzeption, Beratung und Begleitforschung verantwortlich. Zudem unterstützt sie durch die Anbindung der (berufs-)pädagogischen Praxis, etwa in Form der Ausbildung von pädagogischen Fachkräften und von Promotionsvorhaben mit bildungstechnologischen Themen, den Feldzugang.

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

Im Halbjahr II/2025 unterstützte die TUD in Modul 1 die Projektpartner bei der Weiterentwicklung des ersten Prototyps für die Community-Plattform, aus dem das Minimum Viable Product (MVP) hervorgehen soll (AP 1.4). Dabei brachte sie ihre Expertise im User-Experience-Design ein, wirkte aktiv an internen Tests mit und begleitete deren Auswertung. Parallel wurde das zuvor entwickelte Untersuchungsdesign zur Evaluation der Plattformnutzenerfahrung weiter optimiert. Es basiert auf der Shadowing-Methode, welche die Beobachtung von Nutzerinteraktionen mit dem Prototyp mit teilstandardisierten Interviews zur vertiefenden Erhebung subjektiver Einschätzungen kombiniert. Weiterhin wurde mit der Entwicklung eines Konzepts für die Erweiterung der bestehenden Sicherheitsfachkräfte (SIFA)-Community um eine Fachgruppe für Strahlenschutz und ihre Anbindung an die Community-Plattform des Projekts begonnen (AP 1.5). Es beinhaltet u. a. eine didaktische und technische Optimierung der Plattformstruktur, um ihre User Experience und Wartbarkeit zu verbessern und die Grundlage für eine optimal funktionale technische Schnittstelle zwischen beiden Plattformen zu schaffen. Die TUD hat weiterhin im Rahmen der Beratung der Projektpartner zur Zusammenführung der Entwicklungen innerhalb von Fachmodul 1 sowie mit den Modulen 2 und 3 (AP 1.6) erste Ideen entwickelt. Sie erachtet die Verbreitung der VR-Trainingsstation über die Community-Plattform in Form eines Ausleihformulars, ergänzenden Informationen und eines Erfahrungsaustauschs im Forum als strategisch zielführend.

Ein Schwerpunkt der TUD lag auf der Unterstützung der finalen Umsetzung der mobilen VR-Trainingsstation sowie ihrer Erprobung mit relevanten Nutzergruppen (AP 1.11). Hierfür wurden zunächst ausgewählte Ergebnisse der Zwischenevaluation auf der 23. Fachtagung Bildungstechnologien der Gesellschaft für Informatik e.V. (vom 8. bis 10. September 2025 in Freiberg) präsentiert und mit bildungstechnologischen VR-Expert:innen diskutiert – insbesondere im Hinblick auf eine adressatengerechte Bereitstellung in sicherheitskritischen Einsatzfeldern im Rahmen der Abschlusserprobung. Daraus entstand ein wissenschaftlich fundiertes Untersuchungsdesign, das qualitative Beobachtungen während der Nutzung, eine standardisierte Befragung zur Zielgruppeneignung sowie vertiefende, leitfadengestützte Interviews zur User Experience und Transferierbarkeit des VR-Trainings kombiniert. Dieses Design wurde auf der Fachveranstaltung „Würtual Reality“ (vom 08. bis 10.10. 2025 in Würzburg) mit interdisziplinären

VR-Expert:innen reflektiert und weiter geschärft. Im Anschluss wurde das VR-Training bei der Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH (Oktober) und der Advanced Nuclear Fuels GmbH (November) mit Projektingenieuren und Strahlenschutzwerkern umfassend getestet. Die Zwischenergebnisse wurden ausgewertet, zur Veröffentlichung eingereicht und dienen der Ableitung von Transferstrategien für Bildung und Unternehmenspraxis.



Abbildung 17: Vorab-Testlauf der mobilen VR-Trainingsstation an der TU Dresden

In Modul 3 waren der TUD im zweiten Halbjahr 2025 keine eigenen Aufgaben direkt zugewiesen. Dennoch unterstützte sie die Projektpartner beratend mit ihrer Expertise beim Aufbau und der Weiterentwicklung der technischen Architektur zur Einbindung von Large Language Models (LLMs; AP 3.3) sowie bei ersten konzeptionellen Überlegungen zur Erweiterung der API-Funktionalität (AP 3.4). Ziel war es, die definierten Use Cases in praxistaugliche technische Lösungen für die jeweiligen Zielgruppen zu überführen. In diesem Zusammenhang wirkte die TUD auch an internen Tests früher Prototypen für KI-gestützte Softwarewerkzeuge im Rückbau mit. Zur Unterstützung von Wissenstransfer und Informationsmanagement (AP 4.2) stellte sie darüber hinaus kontinuierlich bildungswissenschaftliche Erkenntnisse bereit – insbesondere zum didaktisch-methodischen Einsatz von VR-Trainings im kerntechnischen Kontext und deren Integration in betriebliche Personalentwicklungsprozesse. Darauf aufbauend wurden Transferoptionen für die Community-Plattform und das VR-Training identifiziert (AP 4.3).

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogramm Punkten)

Im Halbjahr I/2026 wird die TUD weiterhin mit gezielten Konzeptions-, Beratungs- und Erprobungsaktivitäten zur Projektarbeit in den Modulen 1 und 3 beitragen. Ein wichtiger Schritt ist dabei die iterative Weiterentwicklung des Community-Plattform-Prototyps zum MVP und ihre Evaluierung im Rahmen von Pilotprojekten mit Projektpartnern und Anwendern (AP 1.4). Ziel ist es, fortlaufend Feedback zu sammeln und Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren. Das Konzept zur Einrichtung der Strahlenschutz-Fachgruppe auf der SIFA-Community wird weiterentwickelt und die Herstellung von Schnittstellen wird vorbereitet und umgesetzt (AP 1.5). Zudem wird eine Strategie für Onboarding und Vernetzung der beiden Communities entwickelt und umgesetzt. Auch die Zusammenführung der Ergebnisse der Module 1 bis 3 zu einer

gemeinsamen Plattform (AP 1.6) wird weiterführend konzeptionell unterstützt. Dasselbe gilt für die Fertigstellung der mobilen VR-Trainingsstation und ihre Tests mit Nutzergruppen (AP 1.11). Nachdem sie bislang vor allem mit Expert:innen evaluiert wurde, soll im nächsten Schritt auch eine Erprobung mit Novizen (wie z. B. Studierenden) erfolgen. Darauf aufbauend werden Transferstrategien für die Praxis definiert.

Im Modul 3 unterstützt die TUD das Prozesslernen mit realistischen Daten und die Bewertung von Technologien für KI-basierte Kooperation (AP 3.5) insbesondere durch die Beteiligung an ihrer Testung mit Fokus auf die mediendidaktische und berufspädagogische Perspektive. In diesem Rahmen erfolgt u. a. eine Analyse der Konfiguration aus Sicht von Lehrenden. Zudem werden das interne Informationsmanagement (AP 4.2) und die erarbeiteten Konzepte für den Praxistransfer der entwickelten Lösungen in bestehende Capacity-Building-Prozesse weiter konkretisiert und präzisiert (AP 4.3), um ihren Praxistransfer vorzubereiten. Parallel erfolgt ein kontinuierlicher Wissenschaftstransfer der Projektergebnisse in Form von Publikationen auf Fachtagungen und in Fachzeitschriften.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Im Rahmen des Projektverbundes wurde die enge Zusammenarbeit mit dem BMFTR-Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „KI-gestützte Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung (KIKO)“ hinsichtlich der konzeptionellen und technischen Entwicklung von KI-Assistenzfunktionen für die Community-Plattform fortgesetzt. Auch der regelmäßige Austausch mit der Professur für Didaktik der Physik an der TUD wurde fortgeführt, deren Mitarbeitende ebenfalls zur Gestaltung und zum Einsatz von VR-Trainings zu Physik-Lerninhalten forschen. Weiterhin erfolgte ein Austausch mit dem BMFTR-FORKA-Vorhaben „Digital optimierte Verpackungsplanung von Aktivierten Betonstrukturen in Konrad-Container beim Rückbau kerntechnischer Anlagen (DABKO)“. Der Fokus lag dabei auf dem laufenden Promotionsvorhaben eines Projektmitarbeitenden zum Thema „Extended Reality-based Knowledge Management in Nuclear Facilities“, das Parallelen zur hier erfolgenden Entwicklung des VR-Trainings aufweist und anknüpfungsfähige Erfahrungen bereitstellte.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Dyrna, J., Neuburg, C., Altmann, M., Thomas, A., Teichert, M., Tietze, M., Schienbein, P., ..., & Köhler, T. (2025). Identifying Key Features and User Experience Criteria for an Online Social Learning Community Platform in the Nuclear Power Sector. In T. Köhler, E. Schoop, & R. Sonntag (Hrsg.), *Proceedings Gemeinschaften in Neuen Medien. KI & Menschlichkeit: Technologie in sozialer Verantwortung*. 28. Workshop GeNeMe'25 Gemeinschaften in Neuen Medien. Dresden: TUD Press

Dyrna, J., Joos, R., Herchet, M. & Köhler, T. (2025). Prior virtual reality experience and its determinants in educational settings. In V. Köppen & S. Strickroth (Hrsg.), 23. Fachtagung Bildungstechnologien (DELFI 2025) (S. 25-39). Gesellschaft für Informatik e. V.
https://doi.org/10.18420/delfi2025_04

Kettler, J., Dyrna, J., Mönig, H., Wilden, A., Modolo, G., Aymanns, K., Wippler, D., ... & Thomas, A. (2025). Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kerntechnischer Anlagen: Das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "K.I.S.S." 17. Internationales Symposium Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle & Stilllegung kerntechnischer Anlagen (KONTEC), Dresden.

Koslowski, D., Anthofer, A. P., Dyrna, J., Kettler, J., Köhler, T. & Thomas, A. (2025). Design Principles for Virtual Reality Training in the Nuclear Sector: An Empirical Study and Early Framework Development. 17. Internationales Symposium Konditionierung radioaktiver Betriebs- und Stilllegungsabfälle & Stilllegung kerntechnischer Anlagen (KONTEC), Dresden.

Seher, H., Kettler, J., Anthofer, A., Aymanns, K., Britz, S., Dewald, M., Dierschow, F., ... & Wiesel, H. (2025). The K.I.S.S. project – an overview. 3rd Interdisciplinary Research Symposium on the Safety of Nuclear Disposal Practices (safeND 2025), Berlin.

https://www.base.bund.de/en/research/events/research-symposium/_documents/safend-25.html

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9448F
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Advanced Nuclear Fuels GmbH, Am Seitenkanal 1, 49811 Lingen		
Vorhabenbezeichnung: 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		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 155.116,99€
Projektleiter/-in: Felix Möllerke		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: Felix.moellerke@framatome.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 reversionssichere 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 Arbeitsprogramm Punkten)

AP1.1: Abgeschlossen im Berichtszeitraum 2025-01.

AP1.2: Abgeschlossen im Berichtszeitraum 2025-01.

AP1.3: Es wurde fortgesetzt 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. Erste Inhalte (zum Thema nukleare Sicherheitskultur) wurden für den Wissenspool zur Verfügung gestellt und durch Actimondo in den Wissenspool eingebunden.

AP1.4: Teilnahme an Austausch zu benötigten Inhalten und Ressourcen für Testläufe zur Integration von Wissenspools in den DSC. Durchführung von Tests auf im DSC anhand der durch ANF zur Verfügung gestellten Inhalte. Mitwirkung bei der Optimierung der Plattform und Abgleich mit vorhandenen Lösungen und Erfahrungen aus Pilotprojekten des Competence.hubs.

AP1.6: Austausch mit Actimondo und weiteren Verbundpartnern zum DSC und den Anforderungen der ANF bzw. der genutzten IT-Infrastruktur.

Erste Lerninhalte wurden auf einer digitalen Lernplattform online geschaltet. Es wurde begonnen die Kompatibilität und Interoperabilität der digitalen Lernplattform mit dem DSC zu evaluieren. Die digitale Lernplattform wurde umfassend getestet. Weiterhin werden Lernplattformen anderer Anbieter analysiert und getestet, da aufgrund kurzen Entwicklungszyklen neue und veränderte Produkte an den Markt kommen. Die Funktionalität der digitalen Lernplattform wurde und wird weiterhin hinsichtlich der relevanten Aspekte für den End-User getestet.

Weiterhin wurde begonnen einen ersten Wissenspools im DSC zu implementieren und zu testen.

Vorbereitung der weiteren Integration bzw. Vernetzung von vorhandenen Plattformen mit dem DSC.

AP1.7: Abgeschlossen in 2024.

AP1.10: Abgeschlossen im Berichtszeitraum 2025-01.

AP1.11: Unterstützung von Tests der mobilen Trainingsstation mit Experten aus dem Bereich des operativen und administrativen Strahlenschutzes der ANF. Sammlung von Feedback und von Optimierungsvorschlägen. Prüfung der Nutzbarkeit der mobilen Trainingsstation für das Competence.hub bzw. die Ausbildung von Fachpersonal bei der ANF. Arbeitspaket wurde abgeschlossen im Berichtszeitraum 2025-02.

AP4.2/4.3: In wöchentlichen digitalen Arbeitsmeetings wurden der VR-Use-Case mit den Trainingskonzepten des Competence.hubs mit der TU Dresden abgestimmt, um zukünftige Anwendungsfälle zu entwickeln bzw. einzubinden.

Darüber hinaus fand am 25. November 2025 ein Verbundtreffen bei der ANF GmbH mit allen Verbundpartnern 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. Im Anschluss fand am 26. November 2025 ebenfalls bei der ANF GmbH ein Test der VR-Umgebung mit Fachleuten aus dem operativen und administrativen Strahlenschutz statt (siehe AP1.11).

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Im weiteren Verlauf werden die Arbeitspakete AP1.3; AP1.4; AP1.6; 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 Lösungen für Kompetenzentwicklung und Genehmigungsmanagement im Rückbau; ISSN: 1431-5254 (Print), Vol.71 (2026)

ATW, International Journal for Nuclear Power; Digitale und KI-gestützte Lösungen für einen sicheren und effizienten Rückbau kerntechnischer Anlagen – Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „K.I.S.S.“; ISSN: 1431-5254 (Print), Vol.70 (2025)

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9448G
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Hinneburg GmbH (ehemals Dornier Hinneburg GmbH)		
Vorhabenbezeichnung: VP: Kompetenz. Innovation. Sicherheit. Strahlenschutz. Effizientes Rückbau- und Genehmigungsmanagement (K.I.S.S.) TP: Digitale Transformation im Strahlenschutz: Effizienzsteigerungen durch int. Softwarelösungen		
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2024 bis 30.04.2027		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 124.208,70 €
Projektleiter/-in: Dr. Anton Philipp Christoph Anthofer		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: anton.anthofer@bureauveritas.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 Hinneburg mit erfahrenen Projektingenieur:innen Perspektiven für die Realisierung des Vorhabens aus Dienstleistersicht bei. Dabei ist Hinneburg 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. Hinneburg unterstützt die Entwicklung eines didaktischen Konzepts und Identifikation von geeigneten Trainingsszenarien und -inhalten für die mobile Trainingsstation. Bezüglich der Online Community wird Hinneburg 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 Hinneburg wird Erfahrung im Prozessablauf und mit bereits realisierten Softwarelösungen beigegeben. Weitere Einblicke in Dokumentationsmanagement bereichern das Portfolio. Hinneburg 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. Hinneburg 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. Hinneburg 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 – Hinneburg 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 Arbeitsprogrammunkten)

Übergreifend:

- Teilnahme an regelmäßigen JF und Projekttreffen
- Teilnahme am K.I.S.S.-Verbundtreffen in Lingen

Modul 1:

- Fachliche Unterstützung bei der Weiterentwicklung des Prototyps für die Community-Plattform und der zugehörigen Wissenspools
- Vorbereitung und Durchführung verschiedener Zielgruppen-Nutzertests mit den finalen VR-Trainingsszenarien und Entwicklung zugehöriger Messinstrumente (Fragebögen, Interviewleitfäden) sowie Unterstützung bei der Datenauswertung
- Konzeptionelle Vorarbeit für die Entwicklung der zugehörigen Trainingsmaßnahmen außerhalb der VR (E-Learning Phase Pre-Trainings, Trainingsevaluation und Train-the-Trainer)

Modul 2:

- Abstimmung der Detaillierung der Benutzeroberfläche (Benennung und Anordnung von Schaltflächen, genaue Formulierungen)
- Mitwirkung bei produktiven Diskussionen zu Einsatzmöglichkeiten der digitalen Plattform
- Teilnahme an Workshops mit FIR für die Steuerung der Umsetzung der letzten Arbeitsschritte
- Unterstützung bei der Vor- und Nachbereitung der Präsentation bei der KONTEC
- Mitwirkung bei produktiven Diskussionen zu möglichen zukünftigen Projekten zur Weiterentwicklung der Plattform

Modul 3:

- Bewertung des ersten Prototyps der Anwendungsfälle
- Unterstützung bei der Demonstration und Validierung der Ergebnisse des Anwendungsfalls
- Unterstützung bei der Erstellung von fachspezifischen Eingabebeschränkungen für den Anwendungsfall

Modul 4:

- Erste Summer School NewCLEAR wurde 2025 in Potsdam durchgeführt
- Sehr gute Resonanz von Experten, Studenten, Doktoranden und Ausstellern

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Modul 1

- Fachliche Unterstützung bei der Rollendefinition des Community-Managers für Sicherheitsfachkräfte und Strahlenschutz sowie Akquise geeigneter Kandidat*innen
- Durchführung weiterer zielgruppenspezifischer VR-Nutzertests inkl. Entwicklung entsprechender Messinstrumente zur weiterführenden Definition von Key Performance Indicators sowie Transferoptionen & -anforderungen in die Praxis
- Praktische Entwicklung der zugehörigen Trainingsmaßnahmen außerhalb der VR (E-Learning Phase Pre-Trainings, Trainingsevaluation und Train-the-Trainer)
- Herstellung von qualitätsgesicherten Transferangeboten in Fachpraxis und Wissenschaft

Modul 2

- Unterstützung bei der Durchführung einer abschließenden Vorstellung der Ergebnisse bei den Stakeholdern

Modul 3

- Unterstützung bei der Validierung/Tests und Weiterentwicklung des Prototyps
- Test des Prototyps auf Erweiterung für unterschiedliche Formulartypen/Anwendungsfälle

Modul 4:

- Nächste Summer School NewCLEAR 2026 in Greifswald vom 27.05.-29.05.2026 geplant
- K.I.S.S. und KIKO werden bei der Summer School vereinigt und stellen ihre neusten Ergebnisse vor

Exkursion am letzten Tag zum Kernkraftwerk Greifswald vorbereitet

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

John Kettler, Jonathan Dyrna, Heike Mönig, Andreas Wilden, Giuseppe Modolo, Katharina Aymanns, David Wippler, Krisztina Kiss, **Anton Anthofer, Bettina Grauel, David Koslowski, Claudia Göpel, Alexander Nester, Rawan Hammoud**, Hendrik Wiesel, Felix Möllerke, Holger Seher, Frank Dierschow, Richard Spanier, Matthias Dewald, Susan Britz, Joachim Herb, Przemyslaw Imielski, Christian Lambertus, Lisa Laumen, Gerrit Hoerborn, Berkan Güner, Abiraam Pickert, Timon Malirsch, Thomas Köhler, Thomas Tobija Richter (2026): Digitale Lösungen für Kompetenzentwicklung und Genehmigungsmanagement im Rückbau. *ATW – International Journal for Nuclear Power*, 1/26, S. 16-21.

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9452A	
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Fachhochschule Südwestfalen			
Vorhabenbezeichnung: VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: KI-Entwicklung und Modellierung			
Laufzeit des Vorhabens: 03/2025 bis 02/2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.126.566,98 €	
Projektleiter: Prof. Dr. Thomas Kopinski		E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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 Arbeitsprogramm Punkten)

Moderne Lernsysteme nutzen zunehmend KI, um Bildung zu personalisieren und zu skalieren. Unser Projekt integriert mehrere hochmoderne Komponenten:

- **[AP1]** Datenverarbeitung: Unsere Datenverarbeitungs-Pipeline stellt nachgeschalteten Aufgaben und LLMs qualitativ hochwertige Eingabedaten bereit, indem sie Funktionen wie OCR (TrOCR), VLMs (Qwen2.5-VL) und Text-Chunking nutzt. Sie ermöglicht die Extraktion von Daten aus Text, Tabellen, Bildern und Diagrammen in PDFs sowie strukturierten Daten aus Markdown-Dateien. Der extrahierte Text wird in Embeddings umgewandelt und in einer pgvector-Datenbank für die ähnlichkeitsbasierte Suche gespeichert. Für beide Dateiformate können Benutzer Kurse (Zusammenfassung, Quiz, Frage-Antwort-Paare) erstellen – entweder manuell per Markdown-Upload oder automatisch mithilfe des mehrstufigen PDF-Prozessors und LLMs.
- **[AP1]** Wissensgraphen und Ontologien: für semantisches Verständnis, Schlussfolgerungen und die Abstimmung unstrukturierter Inhalte mit dem Lehrplan.
- **[AP2]** Open source LLMs: Wir verwenden Llama 3 (70B Instruct) oder Apertus-8B Instruct (2509), um Texte zusammenzufassen und klare Antworten auf Benutzerfragen zu generieren. Apertus-8B Instruct (2509) wurde gemäß den relevanten EU-Vorschriften entwickelt. DeepSeek-R1 (70B) nutzen wir, um die Antworten der Benutzer zu bewerten und Kurse zu empfehlen, die ihrem aktuellen Wissensstand entsprechen.
- **[AP7]** Web-Infrastruktur: Wir implementieren die Plattform auf einem neu angeschafften internen System mit moderner NVIDIA-GPU-Hardware und der CUDA 12.4-Softwareumgebung und bieten ein interaktives, reaktionsschnelles Benutzererlebnis durch eine Full-Stack-Webarchitektur.

Datenpipelines [AP1]

- Datenpipelines: Übersicht und Dateitypen: Die Datenpipeline unterstützt das Hochladen von zwei Dateitypen: PDFs und Markdown-Dateien. Die Pipeline gewährleistet insgesamt, dass Dateien, die eine große Bandbreite an Formen und Inhalten aufweisen können, qualitativ hochwertig und schnell verarbeitet werden, damit nachgeschaltete Teile der Plattform reibungslos und zuverlässig funktionieren.
- Implementierung des Kurserstellungs-Abschnitts: Es wurde der Kurs-Erstellungs-Abschnitt der Plattform entworfen und implementiert, wobei später auch die Unterstützung für Markdown-Dateien hinzugefügt wurden. Dieser Abschnitt ermöglicht es Benutzern, automatisch Kurse aus PDF-Dokumenten zu generieren.
- PDF-Verarbeitung und Extraktion: Beim Hochladen einer PDF-Datei wird das Dokument in Chunks aufgeteilt. Extrahierbarer Text wird entnommen; die OCR-Funktion versucht, die Ergebnisse zu verbessern und Text aus Bereichen mit niedriger Qualität oder nicht extrahierbaren Bereichen zu gewinnen; und das VLM versucht, Informationen und Daten aus Diagrammen und Bildern zu extrahieren. Entwickler und Wartungspersonal können zusätzliche hilfreiche Funktionen wie die Nutzung von VLMs oder OCR je nach Bedarf aktivieren oder deaktivieren. Neben VLM und OCR kann die Pipeline auch die Sprache von Dokumenten identifizieren und das Layout der Dokumente erkennen.
- Generierung von Kursinhalten (Zusammenfassung & Quiz): Die Kurserstellungs-Pipeline erstellt Zusammenfassungen aus kleineren Chunks eines PDF-Dokuments mittels eines LLMs und versucht dann iterativ, eine einzige allgemeine Zusammenfassung des Dokuments zu erstellen, um sicherzustellen, dass alle Abschnitte abgedeckt sind. Das gleiche LLM generiert auch 10 (diese Zahl ist über

Backend-Konfigurationen anpassbar) Frage-Antwort-Paare. Benutzer können ihre eigenen Antworten auf diese Fragen geben und sehen, wie das DeepSeek-Modell sie benotet und versucht, sie durch ihre Fehler zu führen.

- Implementierung der Markdown-Aufnahme: Benutzer können Dokumente im KIKO-Markdown-Strukturformat hochladen. Diese Dokumente werden in der Datenbank gespeichert und lösen die Markdown-Datenverarbeitungs-Pipeline aus. Ein Parser überprüft die Gültigkeit der Markdown-Dateien und extrahiert automatisch alle Daten, einschließlich Metadaten (wie Titel, ID, Version, Sprache, Datum) sowie Inhalte, Links, Tabellen, Quizzes und Frage-Antwort-Paare. Die Pipeline wandelt diese extrahierten Daten in Embeddings um, wodurch unsere nachgeschalteten LLMs die Daten für Fragen im Chatbot-Bereich nutzen können und unser Bewertungs-LLM die Möglichkeit erhält, Benutzerantworten auf extrahierte Fragen gemäß der deutschen Bewertungsskala zu benoten. Alle extrahierten Daten werden in Embeddings umgewandelt, damit sie von Chatbot-LLMs verwendet werden können, und zusammen mit den Metadaten der Dokumente in unserer PostgreSQL-Datenbank gespeichert.
- Datenbank-Management und Qualitätssicherung: Unsere PostgreSQL-Datenbank wird bei jedem Hochladen oder jeder Verarbeitung der Dateien aktualisiert. Die Kursdaten werden ebenfalls in der Datenbank gespeichert, und Kursleiter können über den Abschnitt „Meine Kurse“ CRUD-Operationen (Erstellen, Lesen, Aktualisieren, Löschen) auf die von ihnen erstellten Kurse anwenden. Die erwartete Markdown-Struktur basiert auf den von TUM-Experten erhaltenen Dokumenten, und die Plattform validiert MD-Dateien entsprechend und benachrichtigt Benutzer über ungültige Uploads. Während der Entwicklung standen wir in ständigem Austausch mit unseren Experten, um qualitativ hochwertige, strukturierte und geeignete Dateien und Eingaben als Lernmaterialien und Quellen bereitzustellen. Wir haben eine Datenbank entwickelt, die unsere Anforderungen integriert und zuverlässig erfüllt, und verschiedene APIs (z. B. CRUD, Anfragen an LLMs) implementiert.

LLM-Integration und Plattformentwicklung [AP2-4]

- Implementierung eines voll funktionsfähigen RAG-Systems (Retrieval-Augmented Generation), das eine dynamische Beantwortung von Fragen und den Abruf von Wissen ermöglicht. Die RAG-Entwicklungspipeline umfasst: (i) Einbettung, bei der Texte mithilfe des Ollama-Modells `nomic-embed-text:latest` in Vektordarstellungen umgewandelt werden; (ii) Indizierung, bei der diese Vektoren für einen effizienten Zugriff mithilfe von `pgvector` gespeichert und organisiert werden; (iii) Abruf, bei dem relevante Inhalte über eine Kosinus-Ähnlichkeitssuche basierend auf Benutzeranfragen identifiziert werden; und (iv) Generierung, bei der endgültige Antworten in natürlicher Sprache mithilfe des Ollama `llama3:70b-instruct`-Modells erstellt werden. Alle Komponenten sind modular und skalierbar konzipiert und ermöglichen eine zukünftige Integration mit zusätzlichen Datensätzen.
- Das Apertus-8B Instruct (2509)-Modell wurde über die Hugging Face API in die Chat-Assistentenseite integriert, sodass Benutzer Antworten mit mehreren Sprachmodellen generieren können. Diese Integration wurde teilweise aufgenommen, weil Apertus-8B Instruct (2509) unter Berücksichtigung der EU-Regulierungs- und Datenschutzanforderungen entwickelt wurde.
- Um die Backend-Modellbereitstellung zu standardisieren, haben wir die Hugging Face API-Integration für das Vision-Language-Modell Qwen2.5-VL (7B) auf einen Ollama-basierten Modellladeansatz migriert.
- Implementierung einer Funktion zur Bewertung von Benutzerantworten mithilfe des Ollama `DeepSeek-R1 (70B)`-Modells, das die Antworten der Lernenden mit

Referenzantworten vergleicht und Noten gemäß der deutschen Bewertungsskala (1–5) vergibt.

- Implementierung der Benutzerregistrierungs-, Authentifizierungs- und Abmeldefunktionen der Plattform, einschließlich vollständiger FE-, BE- und DB-Komponenten. Darüber hinaus wurde eine rollenbasierte Zugriffskontrolle durchgesetzt, sodass Benutzer nach erfolgreicher Anmeldung nur auf die Seiten zugreifen können, die für ihre ausgewählte Rolle (z. B. Dozent, Lernender oder Administrator) autorisiert sind, wie bei der Registrierung angegeben.
- Die Seite des Chat-Assistenten wurde erweitert, um das Hochladen mehrerer PDF-Dateien zu unterstützen, einschließlich einer Drag-and-Drop-Oberfläche.
- Die dauerhafte Speicherung von Chat-Assistent-Konversationen wurde in der Datenbank implementiert, sodass Benutzer ihren Konversationsverlauf nach der Anmeldung einsehen können. Darüber hinaus haben wir auf der Chat-Assistent-Seite eine Option hinzugefügt, mit der Benutzer ihren gespeicherten Chat-Verlauf löschen können.
- Die vorkonfigurierten Admin-Daten der Plattform wurden entfernt, um zu verhindern, dass sie andere rollenbasierte Daten beeinträchtigen. Dadurch wird sichergestellt, dass TUM-Akteure die Plattform anhand ihrer eigenen Datensätze selbstständig testen und ihr Verhalten unter realistischen Bedingungen beobachten können.
- Entwickelte eine Seite „Meine Dokumente“ mit vollständiger CRUD-Funktionalität (Erstellen, Lesen, Aktualisieren und Löschen) für alle Benutzerrollen. Benutzer können MD- oder PDF-Dateien hochladen und diese Seite dann verwenden, um einzelne Dokumente in der Vorschau anzuzeigen, herunterzuladen oder zu löschen. Darüber hinaus besteht die Option, alle hochgeladenen Dateien auf einmal über die Schaltfläche „Alle löschen“ zu entfernen.
- Implementierung einer Seite mit häufig gestellten Fragen (FAQ), um alle Benutzerrollen bei der Nutzung der Plattform anzuleiten und Seitenzusammenfassungen, Schnelllinks und Antworten auf häufig gestellte Fragen bereitzustellen. Die für jede Seite angezeigte Zusammenfassung ist rollenspezifisch und passt sich der Rolle des Benutzers beim Anmelden an.
- Für alle Benutzerrollen wurde eine Seite mit Bewertungsergebnissen implementiert, die erläutert, warum die Antworten des Chat-Assistenten und die Bewertungsergebnisse je nach ausgewähltem Modell variieren können. Die Seite präsentiert den zum Testen verwendeten Bewertungsdatensatz und fasst die gemessene Leistung von Apertus-8B-Instruct-2509 und Llama 3 (70B Instruct) für die Chat-Qualität sowie von DeepSeek-R1 (32B) für die Bewertung unter Verwendung standardmäßiger quantitativer Indikatoren (z. B. F1, mittlerer absoluter Fehler und Genauigkeit) zusammen.
- Eine Sprachauswahl-Dropdown-Liste (Englisch/Deutsch) wurde oben auf den Seiten für Anmeldung, Registrierung, Chat-Assistent, Meine Dokumente, Benutzerprofil, Seitenleiste, FAQ und Bewertungsergebnisse für alle Benutzerrollen hinzugefügt. Sie ist außerdem auf den rollenspezifischen Seiten für Dozenten (z. B. Kurserstellung und Meine Kurse) und Lernende (z. B. Dashboard, Meine Kurse, Kursdetails und Wissensüberprüfung) verfügbar. Englisch ist standardmäßig voreingestellt, und Benutzer können jederzeit zwischen Deutsch und Englisch wechseln; der Chat-Assistent antwortet dann in der ausgewählten Sprache. Dadurch kann die gesamte Plattform nun je nach individueller Sprachpräferenz zweisprachig genutzt werden.
- Im Backend implementierte Logik, die basierend auf der im Frontend gewählten Sprache die passende Eingabeaufforderung (Deutsch oder Englisch) auswählt. Dadurch wird sichergestellt, dass das Sprachmodell stets versteht, welche Sprache es

verwenden soll, wenn es dem Benutzer antwortet.

- Es wurde eine Funktion implementiert, die nach der Anmeldung automatisch die Datei „Gamma-scanning-EducTUM.md“ zur Seite „Mein Dokument“ jedes Dozenten als Vorlage hinzufügt, um die empfohlene Markdown-Struktur für die Kurserstellung zu demonstrieren. Wenn ein Kursleiter die Datei löscht und sich später erneut anmeldet, wird die Vorlage erneut zur Seite „Meine Dateien“ hinzugefügt, um die weitere Verwendung des Standardformats zu fördern.
- Die Dashboard-Seite für die Lernendenrolle wurde implementiert, um Statistiken wie eingeschriebene, abgeschlossene, laufende Kurse, bestandene, nicht bestandene Prüfungen und an den Chat-Assistenten gestellte Fragen anzuzeigen.
- Für die Lernerrolle wurde eine Seite „Meine Kurse“ implementiert, auf der sowohl eingeschriebene Kurse als auch empfohlene Kurse angezeigt werden. Für jeden Kurs können Lernende den Kursinhalt über eine spezielle Schaltfläche einsehen und sich anmelden oder abmelden; die Abmeldung erfordert eine Bestätigung (Ja/Nein) und der Kurs wechselt dann entsprechend zwischen den Abschnitten „Eingeschrieben“ und „Empfohlen“.
- Für die Rolle des Lernenden wurde eine Seite zur Wissensbewertung implementiert, die fünf Fragen zu Themen wie Kernenergie, Strahlung und Stilllegung mit Textfeldern enthält, in die die Lernenden ihre Antworten einreichen können. Die Antworten werden mit dem DeepSeek-R1 (70B)-Modell ausgewertet, das dann passende Einstiegsthemen vorschlägt; wenn diese Themen mit Kursen übereinstimmen, die von einem Kursleiter erstellt wurden, wird der Lernende zur Seite „Meine Kurse“ weitergeleitet, wo die relevanten Kurse im Abschnitt „Empfehlungen“ hervorgehoben sind.
- Für die Administratorrolle wurde eine Konfigurationsseite zur Wissensüberprüfung implementiert, die es Administratoren ermöglicht, den Fragebogen zur Lernerbewertung einschließlich der Fragen und der damit verbundenen Themen zu verwalten.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

- Sammeln, Validieren und Integrieren neuer Dateien zur LLM-Optimierung
- Anbindung neuer Datenbankelemente und Backend-Prozesse (z. B. für Lernenden-Quizzes)
- Erweiterung des Prüfungsmodus, um Lernenden die Teilnahme an Prüfungen zu ermöglichen
- Klonoption für Kurse hinzufügen und Abschnitt „Meine Kurse“ erweitern
- Fortschrittsbalken und Geschwindigkeitsoptimierung der PDF/Markdown-Pipeline implementieren
- Abruf vorhandener Kurse zur Information der Benutzer bei wiederholtem Material-Upload
- Verbesserung des LLM-Bewertungsmechanismus zur umfassenderen Fehlerführung
- Erstellung eines Wissensgraphen
- Das Modell llama3:70b-instruct für den Nuklearbereich optimieren
- Einfügen der Seiten für die Administratorrollen und eine Dropdown-Funktion zur Sprachauswahl
- Es ist geplant, den bestehenden Server aufzurüsten oder einen neuen zu beschaffen, um die KIKO-Plattform unter zwei separaten Domains bereitzustellen: eine für das Produktionssystem und eine für eine Testumgebung.
- Beschaffung eines eigenen Domainnamens für die KIKO-Plattform, damit die

Beteiligten der TUM über eine einzige, einheitliche URL auf das System zu Testzwecken zugreifen können.

- Einfügen der Datenbankmigrationstools, z. B. Alembic, Prisma
- Migrieren von Streamlit auf das ReactJS-Framework für die Benutzeroberfläche
- Einfügen einer Funktion „Passwort vergessen“ oder Passwort-Wiederherstellung

Weiterhin sind kleinere Umwidmungen geplant, da unvorhersehbare geringe Kostenpunkte entstanden sind. Eine größere Umwidmung im Bereich Vergabe von Aufträgen soll entstehen, da eine qualifizierte Person für die Experimente nicht gefunden werden konnte.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Dieses Teilprojekt läuft in enger Abstimmung mit den anderen beiden Teilprojekten, geleitet durch die Radiochemie der TU München bzw. die actimondo eG. Regelmäßige Treffen sichern ab, dass die Projektziele des Gesamtvorhabens eingehalten werden können. Insbesondere wird dadurch sichergestellt, dass Wissen bzw. Informationen aus dem EducTUM Projekt in KIKO einfließen kann. Die Zusammenarbeit mit dem KISS Projekt wurde durch weiterführende Gespräche bzw. regelmäßige Treffen in abgestimmten Terminen weiter vertieft und ausgebaut.

6. Berichte und Veröffentlichungen

- Sanjay Gupta hat am 16. September in Dresden am **FORKA-Doktorandenseminar** teilgenommen. Das Programm umfasste einen Nachmittagsausflug zum Forschungsstandort Rossendorf mit geplanten Besuchen bei VKTA und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). Die Besichtigungen vor Ort boten praktische Einblicke in angewandte Forschungsumgebungen und halfen uns, unsere eigene Arbeit in den Kontext der laufenden Aktivitäten bei VKTA und HZDR einzuordnen.
- Herr Gupta hat am 24. September 2025 auf der **Fachtagung zu Data Science und künstlicher Intelligenz** [11] an der Fachhochschule Südwestfalen (FHSWF) in Meschede ein Poster mit dem Titel **KIKO: A GenAI Platform for Adaptive, Collaborative Learning** vorgestellt.
- Amir Kazemzadeh hat am 24. September 2025 auf der **Fachtagung zu Data Science und künstlicher Intelligenz** [11] an der Fachhochschule Südwestfalen (FHSWF) in Meschede ein Poster mit dem Titel **Data Engineering for Large Language Models** vorgestellt. Dieses Poster beleuchtete unsere Errungenschaften und Details der Datenverarbeitungs-Pipeline von KIKO.
- Herr Kazemzadeh und Herr Gupta präsentierten eine Live-Demonstration von **KIKO: A GenAI Platform for Adaptive, Collaborative Learning** im Workshop **Augmenting Collaborative Problem-Solving: Exploring the Design and Use of GenAI for Groupwork** [12] auf der CSCW 2025, die am 19. Oktober 2025 in Bergen, Norwegen, stattfand.
- Vom 20. bis 22. Oktober 2025 nahmen wir an der **CSCW 2025-Hauptkonferenz** in Bergen, Norwegen [13], teil. Die Konferenz bot die Gelegenheit, aktuelle Forschungsergebnisse zu computergestützter kooperativer Arbeit und generativer KI zu verfolgen und unser Projekt mit Forschern und Praktikern zu diskutieren

Literatur

- [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] Dirk Merkel. *Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment*. <https://www.docker.com>. 2014.
- [5] Minghao Li u. a. *TrOCR: Transformer-based Optical Character Recognition with Pre-trained Models*. 2022. arXiv: 2109.10282 [cs.CL].
URL: <https://arxiv.org/abs/2109.10282>.
- [6] Zach Nussbaum u. a. *Nomic Embed: Training a Reproducible Long Context Text Embedder*. 2024. arXiv: 2402.01613 [cs.CL].
- [7] Qwen Team. *Qwen2.5-VL*. Jan. 2025. URL: <https://qwenlm.github.io/blog/qwen2.5-vl/>.
- [8] AI@Meta. „Llama 3 Model Card“. In: (2024). URL: https://github.com/meta-llama/llama3/blob/main/MODEL_CARD.md.
- [9] Alejandro Hernández-Cano u. a. *Apertus: Democratizing Open and Compliant LLMs for Global Language Environments*. <https://arxiv.org/abs/2509.14233>. 2025.
- [10] DeepSeek-AI. *DeepSeek-R1: Incentivizing Reasoning Capability in LLMs via Reinforcement Learning*. 2025. arXiv: 2501.12948 [cs.CL]. URL: <https://arxiv.org/abs/2501.12948>.
- [11] Fachhochschule Südwestfalen. *Fachtagung zu Data Science und Künstlicher Intelligenz*. Event page (Meschede, 24.09.2025).
- [12] URL: https://www.fh-swf.de/de/ueber_uns/events_3/veranstaltungen/events/eventseiten/meschede_5/fachtagung_zu_data_science_und_kuenstlicher_intelligenz.php (besucht am 16.12.2025).
- [13] Augmented Collaboration. *Accepted Workshop Submissions*. URL: <https://www.augmentedcollaboration.info/submissions> (besucht am 16. 12. 2025).
- [14] ACM CSCW 2025. *Program overview*. CSCW Main Conference (Oct 20–22, 2025, Bergen, Norway). URL: <https://cscw.acm.org/2025/index.php/program-overview-3/> (besucht am 16.12.2025).

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9452B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: actimondo eG		
Vorhabenbezeichnung: VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Datenqualität und Community-Management		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2025 bis 29.02.2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 179.469,09 €
Projektleiter/-in: Dr. John Kettler		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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)

Im Berichtszeitraum hat das Team von actimondo zentrale Arbeiten zur Umsetzung des Arbeitsprogramms in den Modul Wissensspeicher & Agenten und Frontend & Nutzerzugang durchgeführt. Ein Schwerpunkt lag auf dem Aufbau eines strukturierten Wissenspools als fachliche und technische Grundlage für die KI-gestützte Wissensvermittlung im Projekt KIKO. Hierzu wurde das Themenfeld Ontologien systematisch bearbeitet. Es wurde eine grundlegende Ontologiestruktur für den Anwendungsbereich Rückbau kerntechnischer Anlagen erarbeitet, die fachliche Konzepte, Relationen und Terminologien konsistent abbildet. Parallel dazu wurde geprüft, in welchem formalen Daten- und Austauschformat die Ontologie vorliegen muss, um daraus einen Knowledge Graph ableiten und in KI-basierte Systeme integrieren zu können. Auf dieser Basis wurde ein erster Ontologie- und Knowledge-Graph-Prototyp implementiert und in das Verbundvorhaben eingebracht. Der Prototyp dient als Referenzstruktur für die weitere inhaltliche und technische Ausgestaltung der Wissensbasis im Projekt.

Darüber hinaus war actimondo aktiv in die Erprobung und Bewertung des projektweiten Demonstrators eingebunden. Der von den Verbundpartnern entwickelte Demonstrator wurde an mehreren Stellen getestet, insbesondere im Hinblick auf Nutzbarkeit, Wissensabfrage und Anbindung an die Wissensstruktur. Die Ergebnisse flossen in die Rückkopplung an die Entwicklungspartner ein. Ein weiterer Arbeitsstrang betraf den Aufbau erster Lern- und Kursformate für die geplante KI-gestützte Lernplattform. Hier wurden initiale Kursstrukturen konzipiert und inhaltlich vorbereitet, um die spätere Integration in adaptive Lernpfade zu ermöglichen. Parallel dazu wurde an der Weiterentwicklung des Frontends gearbeitet, insbesondere an der Schnittstelle zur Community-Plattform „Digital Smart Campus“, die im KISS-Projekt entwickelt wird. In diesem Zusammenhang wurden die funktionalen und technischen Anforderungen an die Schnittstelle analysiert, mögliche Integrationsszenarien bewertet und erste Vorarbeiten zur Anbindung der Systeme durchgeführt.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Im kommenden Berichtszeitraum liegt ein zentraler Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung und Finalisierung des Ontologiekonzepts. Aufbauend auf den bisherigen Arbeiten wird ein modularer Ontologie-Baukasten ausgearbeitet, der es ermöglicht, themenspezifisch angepasste Ontologien für unterschiedliche Anwendungsfelder im Rückbau kerntechnischer Anlagen bereitzustellen. Dieser Ansatz trägt der fachlichen Heterogenität der Themen Rechnung und erlaubt eine flexible Erweiterung. Die Ausgestaltung erfolgt in enger Abstimmung mit den Verbundpartnern, um fachliche Konsistenz, Praxisrelevanz und Anschlussfähigkeit an die KI-Module sicherzustellen.

Parallel dazu wird der Aufbau des Wissenspools systematisch fortgeführt. Ein wesentlicher Fokus liegt dabei auf der Zusammenstellung, Strukturierung und Kuratierung qualitätsgesicherten Fachwissens. Ziel ist es, eine belastbare Wissensbasis für Ontologien, Knowledge Graphen und KI-gestützte Anwendungen zu schaffen. In diesem Kontext erfolgt ein intensiver Austausch mit dem KISS-Projekt, da dort vergleichbare Anforderungen an Wissensmanagement, Community-basierte Inhalte und Plattformintegration bestehen. Die Zusammenarbeit mit den dortigen

Verbundpartnern wird gezielt genutzt, um Synergien zu heben und Doppelarbeiten zu vermeiden.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die technische und funktionale Anbindung an die Community-Plattform „Digital Smart Campus“, die im KISS-Projekt in einer erweiterten Version fertiggestellt wird. Ziel ist es, die Brücke zwischen KISS und KIKO bis zur Jahresmitte umzusetzen, sodass Inhalte, Nutzerinteraktionen und perspektivisch auch KI-gestützte Funktionen projektübergreifend genutzt werden können.

Darüber hinaus wird die Arbeit am Demonstrator kontinuierlich fortgesetzt. Dies umfasst sowohl die weitere technische Erprobung und funktionale Erweiterung als auch die Entwicklung zusätzlicher Kurs- und Lernprogramme, die gezielt für Tests mit relevanten Zielgruppen eingesetzt werden. Die Ergebnisse dieser Erprobungen dienen als Grundlage für die iterative Verbesserung der Plattform, der Lernformate und der zugrunde liegenden Wissensstrukturen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Wie im ursprünglichen Projektantrag vorgesehen, besteht ein enger fachlicher und konzeptioneller Austausch mit den parallellaufenden 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

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9452C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Technische Universität München, ZTWB Radiochemie München (RCM)		
Vorhabenbezeichnung: VP: Die Plattform zur KI-gestützten Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen (KIKO) TP: Intelligentes Tutoring und Human Performances (KIKO)		
Laufzeit des Vorhabens: 01.03.2025 bis 29.02.2028	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 343.814,16 €	
Projektleiter: Dr. Thomas Bücherl	E-Mail-Adresse des Projektleiters: 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 sechstufigen 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

Die Arbeiten im Berichtszeitraum unterteilten sich im Wesentlichen in drei Bereiche:

- Test der jeweils bereitgestellten Lernplattform auf Funktionsfähigkeit und Anwenderfreundlichkeit,
- Bereitstellung und Aufbereitung von Daten für die Nutzung im KI-Modul,
- Vorbereitende Schritte für die geplante Durchführung von Laborexperimenten mittels Elektroenzephalographie (EEG).

Ein wesentlicher Punkt für die Durchführung zielgerichteter Arbeiten durch RCM ist die Verfügbarkeit eines funktionsfähigen KI-Moduls. Dieses wird von der Arbeitsgruppe von Prof. Thomas Kopinski, Fachhochschule Südwestfalen (FH-SWF), der die prinzipielle Leitung des Verbundprojekts innehat, entwickelt und in einer Lernplattform online bereitgestellt. Die jeweils aktuellen Revisionen des KI-Moduls sowie der Lernplattform wurden zunächst hinsichtlich ihrer allgemeinen Funktionalität von mehreren Mitarbeitern der RCM geprüft. Festgestellte Probleme und mögliche Verbesserungs- und Optimierungspunkte wurden an das Entwicklerteam an der FH-SWF weitergeleitet und von diesem zügig umgesetzt. Parallel hierzu wurde bei der RCM das Verständnis aufgebaut, wie das in die Lernplattform integrierte KI-Modul zur Verfügung gestellte Daten verarbeiten kann. Hierfür wurden erste unkuratierte Daten in Form von pdf-Dateien, die einzelne Abschnitte aus dem Vorhaben EducTUM (FKZ 15S9443) enthielten, Bachelorarbeiten und andere Daten, hochgeladen und die Antworten der KI auf unterschiedlichste Fragen zu diesen Daten analysiert. Das Ergebnis dieser im Berichtszeitraum wiederholt durchgeführten Tests gab wichtige Hinweise, wie die letztendlich von der RCM bereitzustellenden Daten geeignet aufzubereiten sind, zeigten aber auch die deutlichen Entwicklungssprünge in der Entwicklung des KI-Moduls im letzten Halbjahr. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen war die (mittlerweile umgesetzte) Forderung, dass einmal hochgeladene und in die KI übernommene Daten mit dem entsprechend durchgeführten Anlernen der KI wieder gelöscht werden können. Hierdurch können Daten, die sich als ungenau oder fehlerhaft herausstellen, nachträglich wieder aus der KI entfernt werden und beeinflussen die Antworten nicht mehr. Während dieser Tests stellte sich heraus, dass von den ursprünglich vorgesehenen Eingabeformaten eine Übernahme von Daten im pdf-Format im Berichtszeitraum nicht zielführend in der KI berücksichtigt wurde. Als Datenformat wurde für die weiteren Schritte deshalb das Markdown-Format festgelegt und eine entsprechende Vorlage von den Entwicklern der FH-SWF bereitgestellt, die Abschnitte für die Daten (d. h. das eigentliche Wissen) sowie für Verständnisfragen in Form einer Liste mit möglichen Antworten, von denen nur eine korrekt ist, und freitextbasierte Antworten enthält.

Für die im ersten Halbjahr 2026 durchzuführende Demonstration der prinzipiellen Nutzbarkeit einer KI-basierten Wissensplattform haben sich die Vorhabenpartner auf den Themenbereich Strahlenschutz geeinigt. Mögliche Wissenspools hierzu (d. h. Lehrpläne) wurden hinsichtlich ihrer Eignung weiter diskutiert. Vom Kooperationspartner actimondo wurde eine umfangreiche Liste mit Themenbereichen hierzu erstellt. Parallel wurde an der RCM eine existierende Unterweisung zum Thema „Grundlagen des Strahlenschutzes“, die sich in vielen Jahren der Praxis bewährt hat, als Ausgangspunkt für die Erstellung der erforderlichen Markdown-Dateien gewählt. Es wurde begonnen einzelne Themenbereiche der sehr bildlastigen und mit wenigen meist stichwortartigen Textabschnitten versehenen Unterweisungsfolien aus dem pdf- bzw. PowerPoint-Format in entsprechende Markdown-Dateien umzusetzen. Das KI-Modul kann aktuell nur bedingt visuelle Elemente aus Markdown-Dateien berücksichtigen, weshalb nicht nur die stichwortartigen Erklärungen, sondern auch die unterstützenden Grafiken in geeignete Texte zu transferieren sind. Zusätzlich werden ergänzende Texte mit Erklärungen und Informationen

eingebunden, die in einer normalen Unterweisung aus zeitlichen Gründen in der Regel keine Berücksichtigung finden, für die KI als Hintergrundinformation bei Beantwortung von Fragen voraussichtlich nützlich sein wird.

In (virtuellen) Treffen wurde die geplante Durchführung von Laborexperimenten mittels Elektroenzephalographie (EEG) zur Überprüfung von Lernerfolgen bei Nutzung der KI weiter konkretisiert. Als Grundlage für die Experimente wurde das bei der RCM in Umsetzung befindliche Thema „Grundlagen des Strahlenschutzes“ festgelegt. Für eine bessere Planung der Experimente wurde die komplette Unterweisung „Grundlagen des Strahlenschutzes“ im pdf-Format zu Verfügung gestellt und parallel im Vorhaben EducTUM damit begonnen, die Inhalte der Unterweisung dort in entsprechende Webseiten zu transferieren. Im Webauftritt EducTUM stehen dann ergänzende, ausformulierte und mit Grafiken und Animationen versehene Informationen zu den Unterweisungsfolien zur Verfügung, welche zur Beantwortung von möglichen Fragen im Vorfeld der Planungen genutzt werden können.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die Arbeiten im ersten Halbjahr 2026 werden sich im Wesentlichen auf die Bereitstellung der erforderlichen Daten für die Demonstration der prinzipiellen Nutzbarkeit einer KI-basierten Wissensplattform fokussieren und hier im speziellen auf die weitere Umsetzung der Unterweisung „Grundlagen im Strahlenschutz“ in die entsprechenden Markdown-Dateien und die Erstellung der jeweiligen Fragekataloge.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Es besteht ein Bezug zum Vorhaben EducTUM (FKZ 15S9443). Deren Inhalte sollen einerseits als Datenbasis für die KI-basierte Wissensplattform KIKO genutzt werden, andererseits soll der Webauftritt von EducTUM für die Bereitstellung von Informationen in Form ergänzender, ausformulierte und mit Grafiken und Animationen versehener Informationen für das geplante Laborexperiment in KIKO genutzt werden.

6. Berichte und Veröffentlichungen

keine

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9453A
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Fachhochschule Südwestfalen		
Vorhabenbezeichnung: VP: Artificial licensing support-application for B34, (Alisa34) TP: Entwicklung einer KI-gestützten Applikation für automatisierte Lizenzierungsprozesse		
Laufzeit des Vorhabens: 02/2025 bis 01/2028	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 1.127.176,94€	
Projektleiter/-in: Prof. Dr. Thomas Kopinski	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: kopinski.thomas@fh-swf.de	

1. Zielsetzung des Vorhabens

Wir entwickeln eine KI-gestützte Software, die Antrags-, Arbeits- und Genehmigungsprozesse im Rückbau am Beispiel B34 beschleunigt. Das System unterstützt Stakeholder bei nicht-wesentlichen Änderungen, erkennt Widersprüche und Fehler, schlägt Verbesserungen vor und sichert Wissen langfristig. 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. Das Vorhaben ist in fünf Module gegliedert: Datenbasis, LLM/RAG, KI-Sicherheit, autonome Agentensysteme und Softwareentwicklung – ergänzt durch Inbetriebnahme und Betrieb eines projektspezifischen KI-Servers

(Verweis auf Framatome Zwischenbericht)

Module	2025				M 1	2026				M 2	2027				2028	M 3
	Q 1	Q 2	Q 3	Q 4		Q 1	Q 2	Q 3	Q 4		Q 1	Q 2	Q 3	Q 4	Q1	
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 Arbeitsprogramm Punkten)

Modul 1: Datenbasis (Framatome GmbH & FH Südwestfalen)

Einsatz von GraphRAG

Im Rahmen von Modul 1 wurde der Einsatz von GraphRAG weiter vertieft und praktisch umgesetzt. Wir bauen einen domänenspezifischen Knowledge Graph auf, gesteuert durch eine modulare Ontologie. So werden unstrukturierte Rückbau-Texte semantisch konsistent strukturiert. Evaluation gegen Ground Truth zeigt: hohe Präzision bei einfachen Texten, aber sinkenden Recall bei komplexen Dokumenten – besonders bei Relationsextraktion. Ziel war es, die Nachvollziehbarkeit, faktische Genauigkeit und strukturelle Konsistenz von LLM-Ausgaben durch die Einbindung eines domänenspezifischen Knowledge Graphs gezielt zu erhöhen.

Zu diesem Zweck wurde ein domänenspezifischer Knowledge Graph als strukturierte Wissensbasis aufgebaut. Die Grundlage bildet eine modulare Ontologie, die nach dem Ansatz des Modular Ontology Modeling (MOMo) entwickelt wurde. Die Ontologie definiert zulässige Entitäten, Relationen und Eigenschaften und fungiert damit als formales Schema für die Wissensrepräsentation. Auf dieser Basis können unstrukturierte Textinhalte kontrolliert und semantisch konsistent in einen Knowledge Graph überführt werden.

Aufbauend auf einer modularen Pipeline wurden drei vorsegmentierte deutschsprachige Texte mit steigender fachlicher und struktureller Komplexität aus dem Bereich des Rückbaus kerntechnischer Anlagen verarbeitet. Für jeden dieser Texte wurde eine eigene Ontologie erstellt, um die Extraktion gezielt zu steuern und auf den jeweiligen Textinhalt zu begrenzen. Die Extraktion der Wissens Elemente erfolgte LLM-gestützt und wurde mit unterschiedlichen Ansätzen realisiert, darunter Neo4j, LangChain sowie eine eigene, selbst implementierte Lösung.

Die resultierenden Knowledge Graphs wurden systematisch gegen manuell erstellte Ground-Truth-Graphen evaluiert. Die Bewertung erfolgte getrennt für Knoten, Relationen und Properties anhand der Metriken Precision, Recall und F1-Score sowie zusätzlich auf Ebene des Gesamtgraphen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einfachen Texten eine sehr hohe Präzision erreicht werden konnte (bis zu 1.0 für Knoten und bis zu 0.9 für Relationen). Mit zunehmender Textkomplexität nahm der Recall über alle Ebenen hinweg deutlich ab. Während die Knotenpräzision vergleichsweise stabil blieb (> 0.6), zeigte sich insbesondere bei der Relationsextraktion ein

deutlicher Leistungsabfall (teilweise ≈ 0.2). Dies identifiziert die zuverlässige Extraktion semantisch korrekter Relationen als zentrales Problem bei komplexeren Eingabetexten.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass Ontologien als strukturelles Rückgrat eine notwendige Voraussetzung für semantische Konsistenz und strukturelle Kohärenz in LLM-basiert erzeugten Knowledge Graphs darstellen. Als zentrales Ergebnis liegt nun eine modulare und wiederverwendbare Pipeline vor, die Ontologierstellung, Konvertierung, LLM-gestützte Extraktion, Post-Processing und Evaluation integriert und als Grundlage für weiterführende Arbeiten im Kontext von GraphRAG dient.

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 Dokumentpipeline wurde robuster und effizienter gemacht: adaptive OCR je nach Dokumenttyp, Metadaten-Extraktion via PyMuPDF und speicherschonende Verarbeitung großer PDFs im Streaming. Tabellen werden strukturiert erkannt und zellweise per OCR extrahiert; VLM-Unterstützung (z. B. für Formeln) erhöht die Informationsdichte. Retrieval ist mit FAISS/LangChain optimiert.

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 Linienstrukturen 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.

“Für sichere und nachvollziehbare KI werden kausale Modelle untersucht, die Entscheidungen quantifizierbar und interpretierbar machen. Erste Prototypen zeigen, wie regulatorische Szenarien als probabilistische Modelle abbildbar sind, um Risiken wie Compliance-Fallen sichtbar zu machen.”

Derzeit wird an der Entwicklung von Prototypen für kausale Modelle gearbeitet und es werden weitere Forschungen zu SOTA-Methoden und -Theorien im Zusammenhang mit der Sicherheit

und Ausrichtung von KI durchgeführt [Da Costa, 2025]. Nachstehend finden Sie ein Beispiel dafür, wie ein Regulierungsszenario in ein probabilistisches Programm für statistische Vorhersageergebnisse umgewandelt werden kann. Es zeigt, wie eine regulatorische Änderung einen Dominoeffekt nach sich ziehen und zu einer unerwarteten Compliance-Falle oder einem „Catch-22“ führen kann.

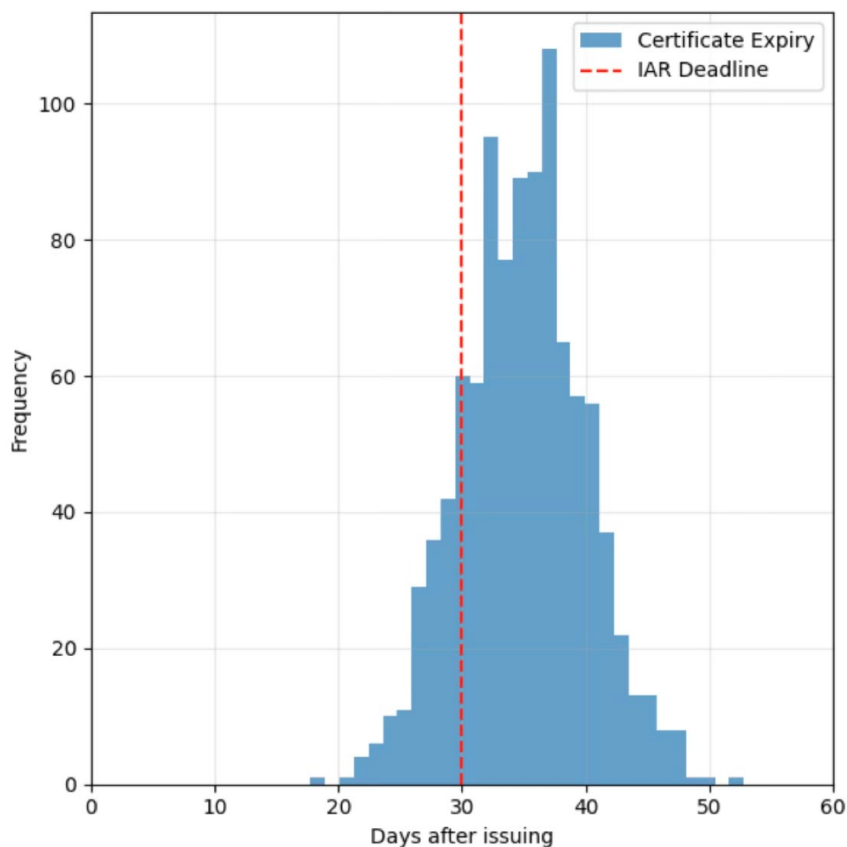
Scenario: Regulatory Compliance Trap*

Nuclear waste is being transported internationally from Germany to France, and is **subject to both German and French regulations**. France requires an **Import Authorization Request (IAR)** at least **30 days before shipping**. Eventually, France imposes the additional requirement of a **Final Safety Inspection (FSI)**, to be carried out by German authorities.

Unknowingly, the **FSI usually takes ~20 days** and has a **15-day validity period, which must also be valid by the 30 day IAR timeline**. This creates a restricted window of validity: **FSIs completed too early will fail compliance**.

*Everything about the above scenario is fictitious. Any resemblance to reality is coincidence.

Es wurde nachgewiesen [Wong et al. 2023], dass LLMs bei der Umwandlung von Text in Code zu leistungsfähigen Weltmodellierern werden. Wir haben dieses Prinzip getestet, indem wir ein LLM das Szenario lesen und ein probabilistisches Modell zur Darstellung desselben codieren ließen. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis einer Simulation der Versandereignisse mit diesem Modell, das den Benutzern anzeigt, dass das Modell vorhersagt, dass 17% der Zertifikate vor dem Versanddatum ablaufen werden.



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** – Optimiert 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.

Eine erste Version des agentenbasierten Workflows **AgentRF (Agentic Reasoning Framework)** wurde implementiert. Ziel ist ein modularer Multi-Agenten-Workflow auf Basis von LLMs, der objektive Fragen zur Dokumentation des kerntechnischen Rückbaus beantwortet.

Zur Evaluation wurde ein **Datensatz mit 45 objektiven Frage–Antwort-Paaren** erstellt, abgeleitet aus einem verfügbaren Teilbereich der Rückbaudokumentation (u. a. Sicherheitsberichte und Umweltverträglichkeitsprüfungen). Die Komplexitätskategorisierung der Fragen orientiert sich

am GAIA-Benchmark [3] (Single-Fact Retrieval vs. Multi-Fact Retrieval mit mehrstufiger Schlussfolgerung).

Die Architektur basiert auf einem **Multi-Agenten-Workflow** aus Sprachmodellen (z. B. Mistral-8B) mit einer an ReAct [4] angelehnten Reasoning Loop: Das System prüft iterativ, ob die vorhandene Evidenz für eine Antwort ausreicht, und nutzt Tool-Calling, um bei Bedarf RAG-as-a-Tool auszuführen. Das Design ist bewusst modular, sodass alternative Retrieval- und RAG-Komponenten (z. B. GraphRAG, AgenticFusion) integrierbar sind.

Erste Auswertungen zeigen, dass für einfache Fragen keine Tool-Aufrufe erforderlich waren, während für komplexere Fragen durchschnittlich 1,80 Tool-Aufrufe nötig waren. Die Bearbeitungszeit pro Frage liegt derzeit bei 28,8 s (Median). Als nächste Schritte sind (i) die **Integration des AgentRF-Orchestrators** mit weiteren Komponenten, (ii) die **Reduktion von Latenzen**, sowie (iii) **Qualitätssicherungsmechanismen** geplant (z. B. Selbstkonsistenz [5] durch Mehrfachgenerierung und Abstimmung). Zusätzlich wird eine **Human-in-the-Loop-Komponente (HITL)** vorgesehen, um Agenten bei Hindernissen zu überwachen und gezielt zu steuern

Modul 5: Softwareentwicklung (Schwerpunkt: FH Südwestfalen)

Im Rahmen von Modul 5 wurde zunächst ein strukturiertes Requirements Engineering durchgeführt. Hierzu fanden Gespräche mit den relevanten Stakeholdern statt, um die fachlichen und funktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde System systematisch zu erheben. Ziel war es, ein gemeinsames Verständnis über den Funktionsumfang, die Zielsetzung sowie die Nutzungsszenarien des Systems zu entwickeln.

Parallel zur Anforderungserhebung wurden Mockups erstellt, welche die geplanten Funktionalitäten visuell abbilden. Diese Mockups dienten einerseits als Diskussionsgrundlage zur Validierung und Verfeinerung der Anforderungen im weiteren Requirements-Engineering-Prozess, andererseits als konzeptionelle Basis für die spätere Implementierung. Durch diese parallele Vorgehensweise konnten Anforderungen frühzeitig konkretisiert und Missverständnisse reduziert werden.

Zu den bereits konzeptionell gemockten Funktionalitäten zählen insbesondere:

- ein Chat-Interface zur Interaktion mit einer KI,
- die strukturierte Erhebung von Anforderungen an zu erstellende Abbau-Dokumente,
- eine KI-gestützte Überarbeitung und Optimierung der erstellten Dokumente,
- die Möglichkeit zum Hinzufügen und Verwalten von Anhängen zu einzelnen Dokumenten,
- sowie eine Übersicht über alle erstellten Dokumente zur Verwaltung und Nachverfolgung.

Diese Vorarbeiten bilden die Grundlage für die anschließende technische Umsetzung und stellen sicher, dass die Implementierung eng an den identifizierten Nutzer- und Systemanforderungen ausgerichtet ist.

Update MW:

Die Umgebung von DevOps innerhalb einer kerntechnischen Anlage bedeutet, dass Standardpakete und -tools nicht verfügbar sind und zunächst vom Sicherheitsteam überprüft werden müssen. Dies führt zu einem Stop-and-Go-Prozess, bei dem die Verfügbarkeit des benötigten Software-Tools eher die Ausnahme als die Regel ist. Trotzdem wurden auf der DevOps-Seite viele neue Komponenten implementiert.

Wir haben eine ausgeklügelte und robuste Continuous-Integration-Pipeline (CI) auf GitLab erstellt, in der unsere Docker-Container gebaut, getestet und an das Framatome-Container-

Repository ausgeliefert werden, wo sie von unserem Host-Server verwendet werden. Die automatisierte Versionierung und Tagging-Funktion erhöht die Versionen intelligent im SemVer-Format, entlastet die Entwickler von der Koordination und erstellt eine Zuordnung zwischen der Repo-Versionierung und den veröffentlichten Docker-Images. Es wurden viele weitere Optimierungen und Caching-Methoden implementiert, und diese solide Grundlagenarbeit wird eine hervorragende Basis für die Entwicklung von Alisa34 bilden.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die 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.

Ziel ist ein integriertes Alpha-Produkt für interne Tests: KG/GraphRAG und RAG sollen zusammengeführt, auf dem KI-Server gehostet und durch Frontend/Backend ergänzt werden. Parallel wird die Integration aller Komponenten (Agenten-Framework, GraphRAG, Datenverarbeitung) weiter vorangetrieben.

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.

Update

For the upcoming Q1 and Q2 of 2026, we are driven to get a functioning end-to-end prototype into the hands of users for testing, for iterative development. There is an open matter of which language models will be available and what their performance will be. We are investigating a performance benchmark comparing some green-listed Framatome options (namely, Mistral), with other open-source alternatives, on Q&A-type tasks on nuclear regulatory documents. Depending on these results, we may pursue a request for green-listing more models at Framatome (which would also be appreciated by the Framatome AI-community at large).

There remains the work of unifying all existing components, KG, Graph-RAG, Fusion-RAG, data processing, Agentic Reasoning Framework, GRAIL world modeling, into one. We expect this will mainly be a matter of straightforward work, and not one of challenging blockers, though it would be naive to expect all the software tools we will be needing to be readily available in the Framatome ecosystem.

The frontend designs have been proceeding well with instruction from Framatome users. These are reaching a stable first-draft state that can be used in our alpha prototype. These designs will no doubt be refined with time as well.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Keiner

6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine

Zitierte Werke

- [1] Lancelot Da Costa et al., "Possible Principles for Aligned Structure Learning Agents," arXiv:2410.00258, preprint, arXiv, July 15, 2025, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.00258>.
- [2] Lionel Wong et al., "From Word Models to World Models: Translating from Natural Language to the Probabilistic Language of Thought," arXiv:2306.12672, preprint, arXiv, June 23, 2023, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.12672>.
- [3] Mialon, Grégoire, et al. "Gaia: a benchmark for general ai assistants." The Twelfth International Conference on Learning Representations. 2023.
- [4] Yao, Shunyu, et al. "React: Synergizing reasoning and acting in language models." The eleventh international conference on learning representations. 2022.
- [5] Wang, Xuezhi, et al. "Self-consistency improves chain of thought reasoning in language models." arXiv preprint arXiv:2203.11171 (2022).

Berichtszeitraum: 01.07.2025 bis 31.12.2025		Förderkennzeichen: 15S9453B
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Framatome GmbH		
Vorhabenbezeichnung: Artificial licensing support-application for B34 (Alisa34) TP: Entwicklung von KI-Sicherheitskomponenten für auditierbare KI-Modelle		
Laufzeit des Vorhabens: 02/2025 bis 01/2028		Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 555.949,54 €
Projektleiter/-in: Dr. Alexander Baumann		E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: 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.

	2025				M1	2026				M2	2027				2028	M3
Module	Q1	Q2	Q3	Q4		Q1	Q2	Q3	Q4		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	
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)

Allgemeine Arbeiten (mehrere Module betroffen)

Es wurden mehrere Leistungstests an verschiedenen Sprachmodellen durchgeführt und ihre Fähigkeiten geprüft, RAG-artige Fragen korrekt zu beantworten, wenn Dokumente mit Bezug zur atomrechtlichen Genehmigung bereitgestellt werden. Darüber hinaus wurden die Antworten auf Fragen, die sich auf Inhalte im Knowledge-Graph-Format beziehen, bewertet. Die Ergebnisse waren, mit einigen Ausnahmen, insgesamt vielversprechend. Diese Tests wurden federführend vom Projektpartner FH Südwestfalen durchgeführt und ihr zugehöriger Halbjahresbericht enthält weitere Einzelheiten zu den Ergebnissen.

Modul 3: KI-Sicherheit und kausale Modellierung

Um sichere und transparente KI-Entscheidungen zu gewährleisten, werden KI-Systeme entwickelt, die interpretierbar und deren Entscheidungen quantifizierbar sind. Die kausalen KI-Modelle, die in diesem Projekt entwickelt werden, erlauben es, die „Entscheidungen“ der Modelle nachzuvollziehen und somit eine bessere Interpretation dieser zu erzielen.

Modul 5: Softwareentwicklung

Viele DevOps-Operationen wurden abgeschlossen, um sicherzustellen, dass das System reibungslos und effizient läuft.

- Ein git-Untermodul-Framework wurde eingerichtet, um die verschiedenen Module zu verbinden, aus denen Alisa34 besteht.
- Ein automatisiertes Testsystem wurde erstellt, um sicherzustellen, dass die Funktionalität der erzeugten Module gewährleistet ist und keine Fehler auftreten, wenn neuer Code zusammengeführt wird.
- Die CI/CD-Pipeline wurde so konfiguriert, dass sie automatisch Alisa34-Versionen inkrementiert, neue Images erstellt und diese Images testet. Viele leistungsfähige Upgrades wurden in die CI/CD-Pipeline für einen effizienten Aufbau aufgenommen.

4. Geplante Weiterarbeit (mit Referenz zu Arbeitsprogrammpunkten)

Die aktuellen Pläne für Q1 und Q2 des Jahres 2026 konzentrieren sich auf die Implementierung des Alpha-Produkts auf dem dedizierten KI-Server. Hierbei sollen insbesondere die technischen Hürden, die aufgrund der sicherheitsfokussierten IT-Infrastruktur auftreten, überwunden werden und geeignete Automatisierungsprozesse für CI/CD (Continuous Integration / Continuous Delivery/Deployment) etabliert werden.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Alpha-Produkts, sollen die Benutzertests ausgeweitet und das Frontend-Design sowie die Backend-Anforderungen weiter spezifiziert werden.

Das Graph-RAG und das agentische Framework sollen voll implementiert und erweitert werden. Sie ermöglichen es den Nutzern, die gespeicherte Dokumentendatenbank mit KI zu erkunden und abzufragen.

Da eingehende Dokumente wie bspw. Stellungnahmen i. d. R. als handschriftliche, gescannte Dokumente vorliegen und somit nicht durchsuchbar sind, soll zudem ein erstes OCR (Optical Character Recognition) implementiert werden, das es dem Nutzer erlaubt, die Stellungnahmen zu durchsuchen.

5. Bezug zu anderen Vorhaben

Kein Bezug.

6. Berichte und Veröffentlichungen

Keine Berichte oder Veröffentlichungen.

**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