

## **Roboterassistierte Sortierung radioaktiver Abfälle zwecks volumenoptimierter Konditionierung – VIRERO®**

**Frank Querfurth, Sebastian Kohn, Oliver Sommer, Max Eder, Felix Lilge, Ansgar Kleideiter,  
Muhamad Ali Naeel**  
Framatome GmbH  
91052 Erlangen, Paul-Gossen-Str. 100  
[frank.querfurth@framatome.com](mailto:frank.querfurth@framatome.com)

**Dr. rer. nat. Christopher Helmes, Dr.-Ing. Andreas Havenith, Dr. Bo Fu; Birgit Haake und Kevin  
Wlasak**  
AiNT GmbH  
52222 Stolberg, Cockerillstraße 100  
[havenith@nuclear-training.de](mailto:havenith@nuclear-training.de)

**Dr.-Ing. Sebastian Reitelshöfer, Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke**  
Lehrstuhl FAPS (FAU)  
91058 Erlangen, Egerlandstr. 9  
[sebastian.reitelshoefer@faps.fau.de](mailto:sebastian.reitelshoefer@faps.fau.de)

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Innerhalb des F&E-Projektes VIRERO® (Virtual Remote Robotics for radiometric sorting, 10/2020 – 09/2023) wird eine Sortieranlage für radioaktive Abfälle – zum Zweck der effizienten radiologischen Charakterisierung und volumenoptimierten Konditionierung – entwickelt und aufgebaut. Mittels der errichteten Versuchsanlage wird mit realitätsnahen Reststoffteilen die Technologie für diverse Anwendungsfälle (auch solche mit hoher Dosisleistung) evaluiert und adaptiert. Mit radioaktiven Abfällen gefüllte Fässer werden an die Sortieranlage automatisiert angeflanscht, roboterassistiert entleert, radiologisch charakterisiert und darauf aufbauend neusortiert sowie begleitend dokumentiert. Die Verwendung von modernen Industrierobotern, innovativer Sensorik aus der Robotik und Kerntechnik sowie eine immersive, lernfähige Teleoperation ermöglichen es, die mit dem hochindividuellen Charakter der Abfälle einhergehenden Herausforderungen bei den Handhabungs- oder Zerlegeaufgaben zu bewältigen und zugleich die Strahlenexposition des Betriebspersonals zu reduzieren.

### **EINLEITUNG**

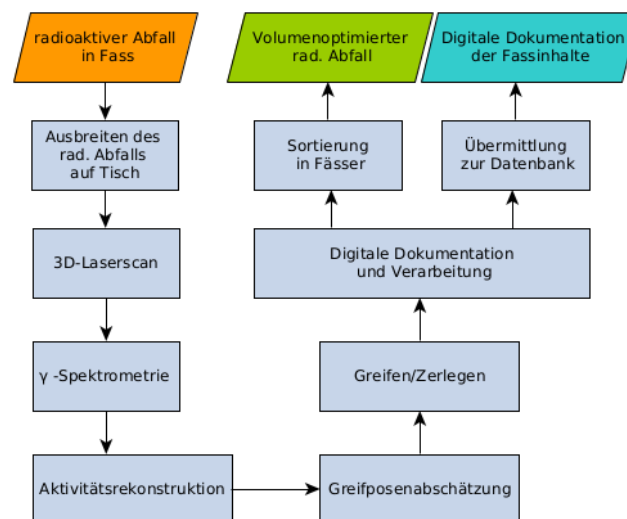
Seit dem 01. Januar 2020 dürfen kernkraftwerksbetreibende Unternehmen (EVU), gemäß dem Gesetz zur Neuordnung der Verantwortung in der kerntechnischen Entsorgung, vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle an die BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH übergeben, sofern diese fachgerecht verpackt sind. Durch das begrenzte verfügbare Volumen des Endlagers ist eine Volumenoptimierung der Abfälle durch die EVUs als Verursacher wirtschaftlich attraktiv. In dem Projekt VIRERO® wird eine solche Volumenoptimierung durch eine teleoperierte Zerlegung und Neusortierung radioaktiver Abfälle mit hohen Ortsdosisleistungswerten (ODL-Werten) entwickelt und erprobt. Hierbei liegt der Fokus auf Betriebsabfällen wie z.B. Filterkerzen, Beutelfiltern oder metallischen Abfällen. Durch eine intelligente Zerlegung und Neusortierung lassen sich insbesondere hochradioaktive Abfallstücke (Hotspots) vom restlichen Abfall absondern, wodurch eine volumenoptimierte Verpackung des Abfalls erwirkt werden kann. Die Zerlegung und Sortierung des Abfalls erfolgt mittels innovativer Robotertechnik, welche im ersten Schritt mittels Virtual Reality (VR) Verfahren ferngesteuert und mit zusätzlichen Elementen in der VR unterstützt wird, so dass zusammenfassend im Projekt VIRERO® eine Augmented Reality Lösung entwickelt wird. Im weiteren Projektverlauf wird ergänzend zu diesem Ansatz das Automatisierungspotenzial einzelner Schritte ermittelt, wobei die Objekterkennung eine wesentliche Rolle spielt. Die Separation der Hotspots und die Sortierung basiert auf einer Vielzahl von Dosisleistungsmessungen oder orts aufgelösten gammaspektrometrischen Messungen und einer

hierauf aufbauenden Aktivitätsrekonstruktion aller Abfallteile. Diese Aktivitätsrekonstruktion wird durch die Kopplung von innovativer Kernstrahlungsmesstechnik mit industriell bewährter Laserscan-Technik erreicht. Dank der inhärenten Modularisierung der Gesamtanlage kann VIRERO® flexibel beim Abfallverursacher oder -konditionierer errichtet werden. Hierdurch entfallen etwaige Transporte der radioaktiven Abfälle zu Konditionierungsstätten. Durch die Modularisierung der Versuchsanlage entsteht weiterhin eine Zweiteilung bzgl. der Entwicklung. Aktuell geschieht die Entwicklung von VIRERO® an zwei nahezu unabhängigen Versuchsständen. Ein Versuchsstand für die Entwicklung der automatisierten Aktivitätsrekonstruktion wird von AiNT GmbH in Aachen entwickelt und jeweils ein Versuchsstand für die Erforschung der durch Augmented Reality gestützten teleoperierten Zerlegung und Sortierung von radioaktiven Abfallteilen an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg am Lehrstuhl für Fertigungsautomation und Produktionssysteme (FAPS) und bei der Framatome GmbH - beide in Erlangen. Eine Zusammenführung der Versuchsstände ist im weiteren Projektverlauf geplant.

## ERGEBNISSE

### GESAMTPROZESS

Der Ablauf der volumenoptimierten Sortierung ist schematisch in **Abbildung 1** dargestellt. Die radioaktiven Reststoffen werden aus dem Fass robotergestützt entnommen, und auf einem leicht zu dekontaminierenden Messtisch ausgebreitet. Die zu sortierenden Reststoffe werden anschließend mittels 3D-Laserprofilscannings geometrisch als eine Punktwolke erfasst. Nach der geometrischen



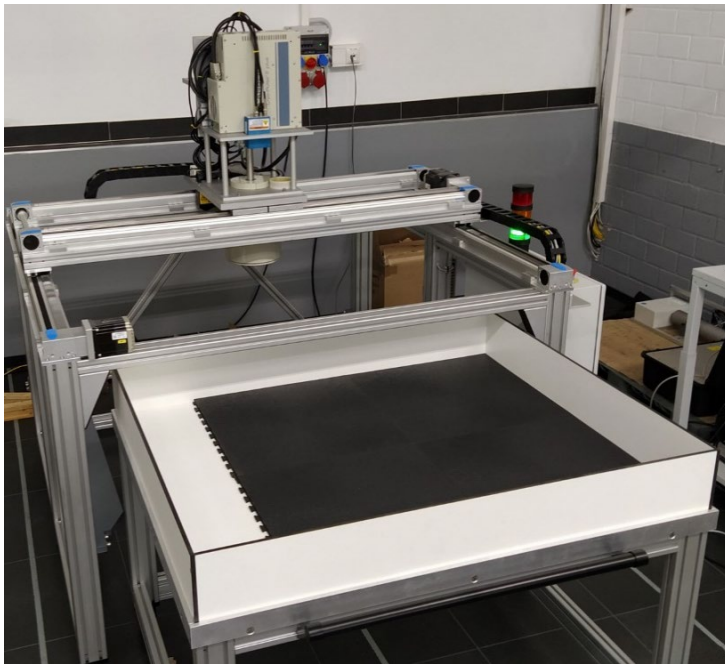
**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der volumenoptimierenden Neu-Sortierung und Dokumentation von Altabfall mit VIRERO®.

Charakterisierung erfolgt eine Vielzahl kollimierter gammaspektrometrischer Messungen mit einem von drei energieauflösenden Detektoren oder eine ODL-Messung mittels eines Geiger-Müller Zählrohrs. Für die anschließende Rekonstruktion der (nuklidspezifischen) Aktivitätsverteilung des Inventars auf dem Messtisch werden die räumliche und die radiologische Charakterisierung gemeinsam betrachtet, sodass die Gammaselbstabschirmung berücksichtigt wird und etwaige radiologische Hotspots erkannt und anschließend separiert werden können. Mithilfe der nachfolgenden Greifposenabschätzung werden die Abfallteile entweder gegriffen oder, falls nötig, zerlegt. Nach erfolgter digitaler Dokumentation der charakteristischen Eigenschaften der resultierenden Abfallteile werden diese in geeignete bereitstehende Abfallfässer, hauptsächlich nach aus der Aktivitätsrekonstruktion abgeleiteten Kriterien, volumenoptimiert verpackt. Zur Ergänzung der digitalen Dokumentation können noch bedarfsgerecht weitere Verarbeitungsschritte erfolgen, z. B. eine Fotodokumentation bis hin zu einer separaten 3D-Karte der Einzelteile oder Messungen des Gewichts. Diese Informationen fließen wiederum, wenn relevant, in den Sortierprozess ein, welcher (teil-) automatisiert ist und in Form von Zustimmungsaufforderungen an den Operator erfolgen kann. Das Ergebnis des Sortierverfahrens sind Behältnissen

mit volumenoptimiertem radiologischem Abfall gekoppelt mit der automatischen Generierung einer bedarfsgerechten digitalen Dokumentation.

## RÄUMLICHE UND RADIOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG

Der Messtisch ist in **Abbildung 2** zu sehen. Die verfahrbare Wanne misst 100 x 150 cm<sup>2</sup> und nimmt Messgut mit einer maximalen Höhe von 20 cm auf. Mittels der X-Y-Lineareinheiten wird der Messschlitten, auf welchem der 3D-Laserscanner sowie einer von drei radiologischen Detektoren samt Kollimator montiert sind, zu diskreten Messpositionen über dem Tisch bewegt. Nach der Bestückung des Messtisches wird zunächst eine zusammenhängende Punktwolke des befüllten Tisches mit dem 3D-Laserscanner aufgenommen. Anschließend erfolgt die radiologische Charakterisierung indem kollimierte Messungen an gerasterten Messpositionen vorgenommen werden.



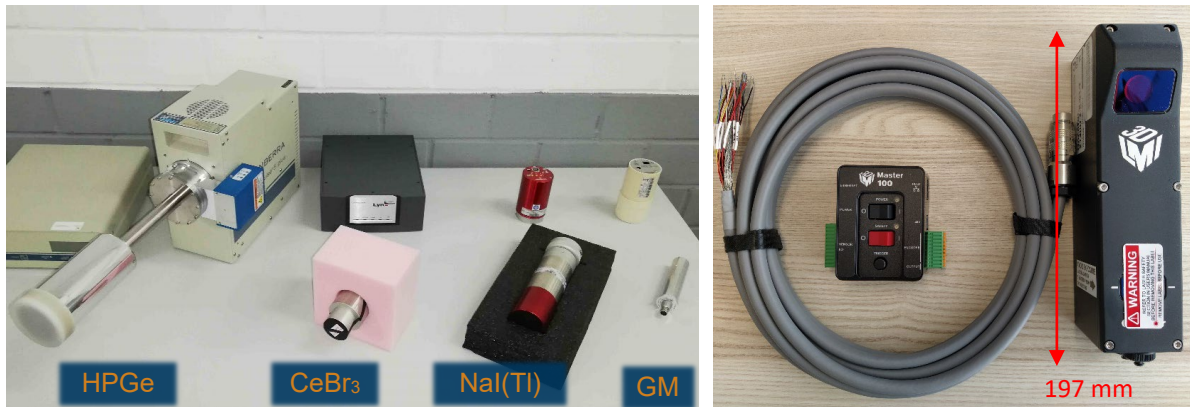
**Abbildung 2:** Prototyp des Messtisches für die gekoppelte räumliche und radiologische Charakterisierung. Die zu charakterisierenden Reststoffe werden auf dem rollbaren Messtisch vereinzelt ausgebreitet und in die Messanlage geschoben. Auf dem Messschlitten ist der kollimierte HPGe-Detektor zu sehen, der 3D-Profilscanner ist durch die Führungsschiene des Schlittens verdeckt.

Die geometrische Charakterisierung der zu sortierenden Abfallteile erfolgt unter Einsatz eines industriellen 3D-Linienprofilscanners welcher eine optische Abtastrate von bis zu 5 kHz besitzt und Höhenunterschiede von min. 25 µm erkennt. Für eine vollständige Erfassung des Messguts ist ein Scan in mehreren Bahnen notwendig, da die maximale Messbreite 194 mm beträgt. Die Höhenprofile werden nachgehend in eine gemeinsame Punktwolke überführt. Diese Punktwolke dient einerseits als Eingangsgröße für die Aktivitätsrekonstruktion und andererseits der Greifposenabschätzung durch die Roboter in der nachgeschalteten Sortierung. Das der radiologischen Charakterisierung vorgeschaltete Laserscanning erfolgt instantan bei einem zügigen Überfahren der Abfallteile. So können Bereiche ohne Messgut von einer überflüssigen radiologischen Charakterisierung ggf. ausgenommen werden. Der in dem Prototyp verwendete Laserscanner ist in **Abbildung 3** (rechts) dargestellt.

Im Rahmen von VIRERO® werden radiologische Charakterisierungsverfahren über den Stand von Wissenschaft und Technik hinaus weiterentwickelt. Dazu wird der Einsatz von drei unterschiedlich sensitiven gammaspektrometrischen Detektoren und eines Geiger-Müller Zählrohrs erprobt. Die gammaspektrometrischen Detektoren sind ein hochsensitiver HPGe-Halbleiterdetektor (rel. Photopeakeffizienz  $\varepsilon = 40\%$ ) und zwei Szintillationsdetektoren mit Kristallen aus CeBr<sub>3</sub> ( $\varepsilon = 16\%$ ) und NaI(Tl) ( $\varepsilon = 30\%$ ). Diese Detektoren sind für niedrige (HPGe) bis mittlere (Szintillationsdetektoren) Ortsdosisleistungen ausgelegt. Das Geiger-Müller Zählrohr ist für ODL-Werte bis 10 Sv/h einsetzbar, sodass auch hochaktive Abfälle charakterisiert werden können, besitzt allerdings, im Gegensatz zu den vorgenannten Detektoren, keine Energieauflösung. Die beschriebenen Detektoren sind in **Abbildung 3** (links) dargestellt. Ein variabler Kollimator ermöglicht radiologische Messungen des Strahlungssignals aus einzelnen räumlichen Partitionen auf dem Messtisch an diskreten Messpositionen.



Eine Anpassung des Sichtfelds jedes Detektors und damit der zu messenden Partitionen wird durch drei unterschiedliche Kollimatoren sichergestellt. Der Kollimator besteht aus Hartblei.

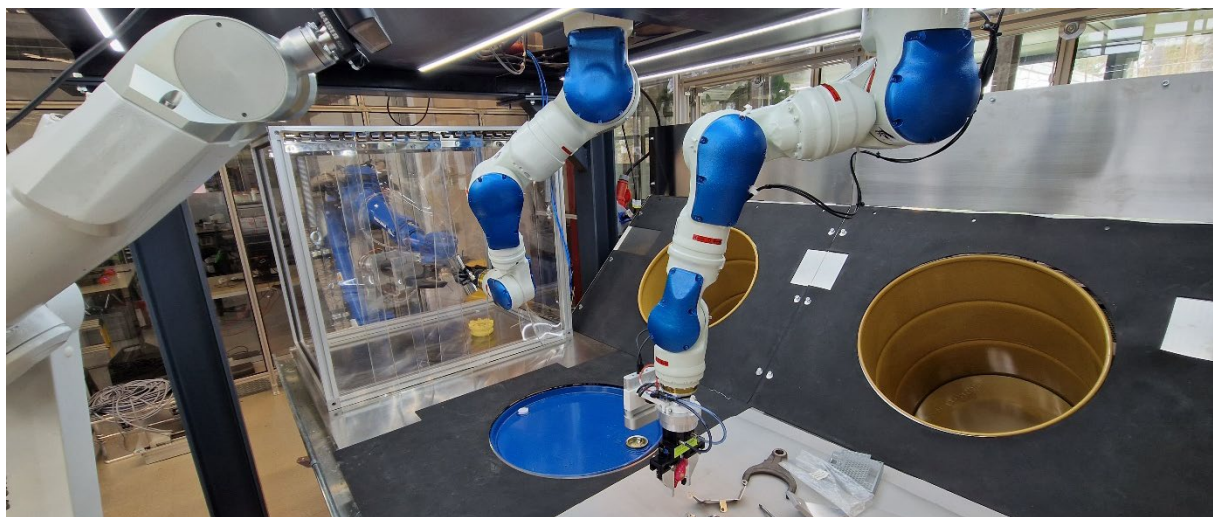


**Abbildung 3:** (links) Energieauflösende Detektoren und ODL-Sonde in v.l.n.r. absteigender Energieauflösung. (rechts) 3D-Laserprofilscanner mit Auslesehardware.

Mit der räumlichen und radiologischen Charakterisierung als Eingangsdaten wird anschließend unter Zuhilfenahme nuklearphysikalischer Simulationen des Gammatransports und der Detektoreffizienz das Aktivitätsinventar auf dem Messtisch nuklidspezifisch rekonstruiert, sofern einer der drei energieauflösenden  $\gamma$ -Detektoren für die radiologischen Messungen eingesetzt wird. Das Ergebnis der gekoppelten Charakterisierung ist eine nuklidspezifische und höhenabhängige Heatmap der rekonstruierten Aktivität, sodass radiologische Hotspots zuverlässig als solche identifiziert werden und bei Bedarf separiert werden können.

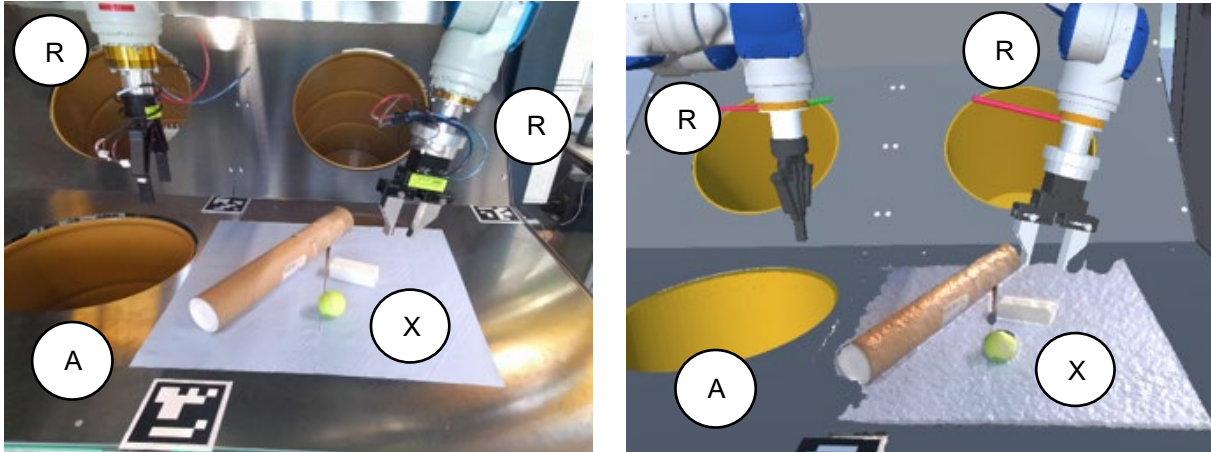
### ROBOTERGESTÜTZTE FERNHANTIERUNG

Um Abfälle radiologisch zu charakterisieren muss das Material zunächst aus dem Abfallfass entnommen werden. Mehrere Roboterkinematiken, Sensoren und Peripheriesysteme, wie Greifer und Vereinzelungswerkzeuge, sind in die Testanlage integriert, um den Abfall zu handhaben. Große Stücke können mit einer mechanischen Schneidschere zerkleinert und dann mit den anderen Abfällen zur radiologischen Charakterisierung auf den Messtisch verteilt werden.



**Abbildung 4:** In der aktuellen Testanlage sind Flansche für drei 200-Liter Fässer integriert. Mit insgesamt vier Robotersystemen können Teile aus unterschiedlichen Perspektiven sortiert, geschnitten und beobachtet werden. Der über dem im Bild verschlossenen Entnahmefass montierte Roboter wird zusätzlich über eine externe Hubeinrichtung in das Fass bewegt. Zur räumlichen Dokumentation kommt eine Stereokamera zum Einsatz, die auf dem Roboter (rechts) zusätzlich zum Greifer montiert ist und durch die Blickrichtung des Bedieners intuitiv gesteuert werden kann.

Die teleoperierten Handhabungsaufgaben der teilautomatisierten Sortierung des Roboters erfordern eine exakte Darstellung der Umgebung und der Abfallteile im gesamten Arbeitsbereich der Sortieranlage. **Abbildung 5** zeigt die reale (links im Bild) und virtuelle Umgebung (rechts im Bild), jeweils aus der gleichen Perspektive. Die Anlage (A) und die Yaskawa-Roboter (R) sind als CAD-Modell in die VR-Umgebung integriert. Die zu sortierenden Komponenten (X) werden in VR während der Laufzeit mit der Tiefenwahrnehmung einer am Stäubli-Roboter montierten 3D-Kamera rekonstruiert.



**Abbildung 5:** Vergleich der realen Ansicht der Sortiertabelle (links) mit dem VR-Modell für Teleoperation (rechts). Beides durch die Blickrichtung einer Stereokamera, montiert auf einem Stäubli-Roboter, welcher intuitiv der Kopfbewegung des Operators folgt.

Die in VIRERO® avisierte Augmented Reality Lösung zeichnet sich durch eine intelligente und individuell einstellbare Einblendung von zusätzlichen Informationen, wie z.B. Achswerten, erkannten Teileigenschaften bis hin zu Handlungsempfehlungen aus und soll die Bedienerakzeptanz und die Nutzerfreundlichkeit steigern, um letztlich einen erfolgreichen Sortierprozess zu gewährleisten.

## INTEGRATION EINES TRENNWERKZEUGS

Zur volumenoptimierten Konditionierung aktivierter Schrottteile kann das Trennen von Teilen einen wichtigen Beitrag leisten. Werden beispielsweise in einer vorangegangenen radiologischen Charakterisierung an einem Bauteil Zonen mit hoher Aktivierung neben solchen mit einer geringen oder gar keiner Aktivität identifiziert, kann durch ein Abtrennen der einzelnen Segmente eine signifikante Reduzierung des Volumens für Abfälle mit hoher Dosisleistung erreicht werden. Hardwareseitig wurde für das Abtrennen hochaktiver Regionen von einem Reststoffteil ein Robotersystem mit einem Trennwerkzeug ausgerüstet. In der in **Abbildung 4** dargestellten Versuchszelle ist dazu ein Yaskawa GP110 Roboter mit einem Flanschadapter zur Aufnahme einer hydraulischen Trennschere ausgestattet. Bei der Trennschere handelt es sich um eine Rettungsschere vom Typ RSU 210 Plus der Firma Weber. Der mechatronische Flanschadapter erlaubt die Ansteuerung der Trennschere über die Ventilstellungen, welche ursprünglich für eine manuelle Betätigung ausgelegt sind.



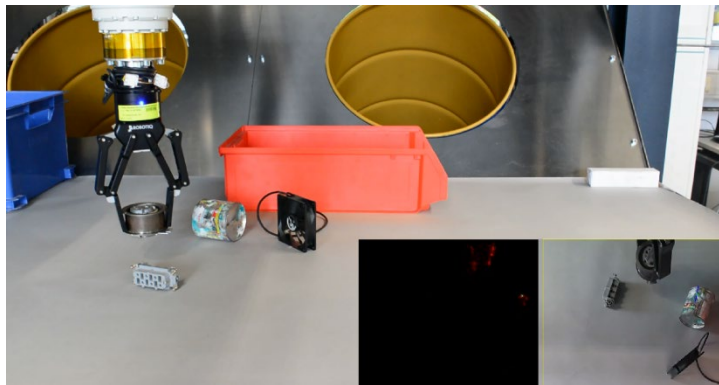
**Abbildung 6:** Werden massive Teile wie Aluminiumprofile, Lochbleche, Gewindestangen oder Meisel aus gehärtetem Stahl geschnitten (links), können abgeschleuderte Stücke in einer lokalen Einhausung aufgefangen werden (rechts).

Dieser Ansatz, zusammen mit der Möglichkeit zur Nutzung angepasster Gehäuseteile begünstigt einen einfachen Austausch des Scherenwerkzeuges sowie die Realisierung verschiedener Schutzklassen zur Staub- und mediengeschützten Einhausung der Scherensteuerung in späteren Produktivzellen.

Wie in **Abbildung 6** links dargestellt, lassen sich mit dem Trennwerkzeug alle Arten von zu erwartenden Schrottteilen zuverlässig scheiden. Versuche zeigen, dass es bei den Schneidvorgängen massiver Teile zu einem „Absprengen“ losgeschnittener Teile kommen kann. Aus diesem Grund ist in die Versuchsanlage wie in **Abbildung 6** rechts dargestellt eine lokale Schutzeinhausung integriert, in welche die am Schneidprozess beteiligten Roboter durch Lamellenvorhänge einfahren. Eventuell abgeschleuderte Teile werden so zuverlässig in der Schneidzone aufgefangen und können anschließend teleoperiert eingesammelt und sortiert werden.

### AUTOMATISIERTES GREIFEN ZUVOR UNBEKANNTER OBJEKTE

Die zentrale Herausforderung bei der robotergestützten automatisierten Handhabung und Weiterverarbeitung von Teilen, die im Rahmen des Forschungsprojektes VIRERO® betrachtet wird, ist der Umstand, dass es sich bei den zu handhabenden Teilen stets um grundsätzlich unbekannte Objekte handelt.



**Abbildung 7:** Mittels GG-CNN und angepassten Bildaufnahmestrategien können unbekannte Schrottteile automatisiert von einem Sortiertisch gegriffen werden (links). In den Ausschnitten rechts ist eine Heatmap günstiger Greifpunkte aus der Perspektive einer mitgeführten Kamera dargestellt.

Der überwiegende Anteil aktueller Ansätze zur automatisierten Erkennung und zum Greifen von Teilen stützt sich auf lernende Verfahren zur robusten Bestimmung von Klasse, Pose oder von Greifpunkten. Diese Verfahren sehen dabei nahezu immer eine Trainingsphase vor, bei welcher annotierte Beispieldaten genutzt werden, um durch eine Anpassung der Modelle die gewünschte Erkennungsleistung der zugrundeliegenden Verfahren auch bei leichter Variation von Objekten oder deren Umgebung zu erreichen. Dieses Vorgehensmodell ist im vorliegenden Anwendungsfall VIRERO® nicht zielführend, da die Variabilität der Teile so groß ist, dass ein Training für alle möglichen Variationen und Teile nicht möglich ist. Weiterhin führen eine teilweise Jahrzehnte lange Nutzung oder Einlagerung sowie Verschmutzungen zu substantiell verändertem Aussehen auch bei Teilen gleicher Bauart. Es existieren allerdings Ansätze wie beispielsweise das in [2] beschriebene Generative Grasp Convolutional Neural Network (GG-CNN), welches auch bei unbekannten Teilen gute Resultate bei Greifvorgängen erzielen kann. Um die Leistung von GG-CNN für den Anwendungsfall in VIRERO® zu optimieren, werden 3D Kameras robotergeführt über unbekannte Greifobjekte bewegt, wobei die Kameras schrittweise an Ansammlungen von Objekten wie in **Abbildung 7** dargestellt herangeführt werden. Für verschiedene Abstände werden die Anzahl und die Varianz mittels GG-CNN erkannter Greifpunkte bestimmt. Anschließend wird in der Position mit der größten Anzahl erkannter Punkte eine mehrfache Ermittlung von Greifpunkten durchgeführt, wobei anschließend das Teil mit der geringsten Schwankung seiner mehrfach ermittelten Greifpose für den nächsten Greifvorgang ausgewählt wird. Dieser Ansatz bildet die Grundlage zur automatisierten Sortierung unbekannter Schrottteile aus kerntechnischen Anwendungen.



## AUSBLICK / FAZIT

Die im Projekt angestrebte Augmented Virtuality Lösung wird durch den Einsatz aktueller Kamerasysteme unterstützt und als zielführend betrachtet. Zusätzlich werden 2D- und 3D-Darstellungen berücksichtigt, da ein dauerhafter Einsatz der VR-Brille aus ergonomischer Sicht nicht wünschenswert ist. Auch der Einsatz in realistischen Strahlungsfeldern wird im Projekt berücksichtigt, so wurden verschiedene Varianten der Roboterkinematiken bzgl. ihrer Strahlenhärte evaluiert um in einer realistischen Umgebung mit den hier vorgestellten Verfahren operieren zu können. Um VIRERO® industriell einzusetzen wurden Risikoanalysen durchgeführt und ein Interventionskonzept entwickelt. Zusätzlich wurde eine Kollisionskontrolle implementiert, welche dem Operator frühzeitig mögliche Gefahren signalisiert und in einem sicheren Rahmen individuell einstellbar ist. Der Projektfortschritt ist auch im entsprechenden FORKA-Halbjahresbericht zu finden, siehe [1].

Das Projekt VIRERO® wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Förderkonzepts FORKA (Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen) gefördert und ist dem Forschungsfeld „Abfallbehandlung, Abfalldeklaration und Zwischenlagerung“ zuzuordnen. Das Förderkennzeichen des Projektes ist 15S9422 A / B / C. Für den Inhalt des dieses Artikels sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

## REFERENCES

- [1] Fortschrittsberichte FORKA; <https://www.grs.de/de/projekttraeger/forschung-rueckbau-kerntechnischer-anlagen/fortschrittsberichte-forka> (Stand: 12.04.2022)
- [2] D. Morrison, P. Corke, J. Leitner; Closing the Loop for Robotic Grasping: A Real-time, Generative Grasp Synthesis Approach; Robotics: Science and Systems (RSS), 2018.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.05172>