Berichtszeitraum: 01.10.2020 bis 30.09.2023	Förderkennzeichen: 15S9422C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)	
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: Vlrtual REmote RObotics for Radiometrie Sorting (VIRERO), Teilprojekt: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 bis 30.09.2023	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 654.221,30 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: joerg.franke@faps.fau.de

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Abschlussbericht - Teil I - Kurzbericht

1. Zielsetzung des Vorhabens

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

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

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

Die Entwicklung der robotergestützten Sortieranlage, des immersiven und lernfähigen Teleoperationssystems, die räumliche Charakterisierung hochindividueller Handhabungsobjekte

sowie autonome Roboterfähigkeiten zur Handhabung und Sortierung der Abfallteile liegen im Forschungsfokus des Lehrstuhls FAPS.

2. Durchführungskonzept/Arbeitsprogramm

Gemäß der Vorhabenbeschreibung gliedert sich das Durchführungskonzept in fünf Arbeitspakete (AP): AP1 „Versuchsanlage“, AP2 „Basisfähigkeiten“, AP3 „Radiologische Charakterisierung“, AP4 „Digitaler Teilezwilling“ und AP5 „AV- & KI-Operatorentlastung“. Der Lehrstuhl FAPS ist dabei wie folgt in die F&E-Arbeiten des Gesamtvorhabens involviert:

AP1 (a) bis (c): Planung, Aufbau und Optimierung der Versuchsanlage

AP2 (b): Interoperable Fernansteuerung und Kollisionsvermeidung der Roboter

AP4 (a) und (b): Räumliche Charakterisierung und Fusion zum digitalen Teilezwilling

AP5 (a) bis (d): AV- & KI-Operatorentlastung

3. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse und Aussagen zum Nutzen sowie der Anwendungsmöglichkeiten der Projektergebnisse

Ziel des Arbeitspakets AP1 war es, am Lehrstuhl FAPS in Erlangen einen Versuchsstand zu errichten, der für die Entwicklung und Bewertung eines Systems zur roboterbasierten Handhabung und Sortierung nuklearer Reststoffe unter realitätsnahen Bedingungen dient. Dazu wurde ein hochmodularer und skalierbarer Aufbau mit Industrierobotern, Sensorik und Sicherheitstechnik realisiert. Wichtig waren die Auswahl geeigneter Komponenten und die Simulation von Einsatzszenarien zur Optimierung des Systems.

Das Arbeitspaket 1 (a) beschäftigte sich intensiv mit der Absicherung des Konzepts durch simulative Untersuchungen verschiedener Lösungsvarianten. Hierzu gehörte die Auswahl der Hauptroboter für das Handling der Schrottteile, wobei die begrenzte Arbeitsfläche und die Flexibilitätsanforderungen ausschlaggebende Faktoren waren. Simulationen dienten der Analyse der Bewegung der Roboter und der Identifizierung optimaler Modelle für die spezifischen Einsatzbedingungen. Aufgrund der Simulationsergebnisse wurden zwei siebenachsige Robotermodelle für das Handling ausgewählt, die eine höhere Flexibilität in den engen Räumen der Fässer boten. Zudem wurde ein weiterer Roboter für Schneidvorgänge und ein viertes System zur dynamischen Positionierung eines Kamerasystems integriert.

Im Arbeitspaket 1 (b) erfolgte die Implementierung eines Teleoperationssystems mit VR-Technologie und Gestenerkennung zur präzisen Steuerung der Robotersysteme. Daten von Punktewolken generierenden Kameras in eine VR Umgebung, die die Versuchsanlage repräsentiert, integriert und so ein Augmented-Virtuality System zur Teleoperation von Robotersystemen für das Handling unbekannte Schrottteile realisiert. Es wurden weiterhin zusätzliche Eingabe und Steuerungsmethoden beispielsweise über einen Datenhandschuh zur Ansteuerung von Greifern realisiert.

In Arbeitspaket 1 (c) wurde eine komplexe Softwarearchitektur auf Basis des Robot Operating Systems (ROS) und Unity für Teleoperation und teilautonome Aufgaben entwickelt und umfangreiche Tests der Entwickelten Komponenten durchgeführt. Dabei konnte die Teleoperierte Nutzung der Anlage zur Handhabung und zum robotergestützten Schneiden von Schrotteilen demonstriert werden.

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 lag der Schwerpunkt auf der räumlichen Charakterisierung von Abfallteilen, um eine effiziente Neusortierung und potenzielle Freigabe des Materials zu ermöglichen. Durch die Entwicklung von angepassten Pipelines für die Bildverarbeitung wurde eine präzise geometrische Abgrenzung der Teile erreicht. Die so generierten Informationen bilden die Basis für automatisierte Handlungsempfehlungen und unterstützen die autonome Systemfähigkeit der Anlage. Es wurden verschiedene Segmentierungsverfahren um, um eine zuverlässige Erkennung und Klassifizierung von Abfallteilen zu erreichen. Durch den Einsatz von Deep-Learning-Methoden und Zero-Shot-Segmentierungstechniken konnten unbekannte Objekte effektiv segmentiert werden, was eine wichtige Grundlage für die Automatisierung des Sortierprozesses darstellt.

Im Arbeitspaket 5 stand die Verbesserung der Nachkonditionierung durch eine Kombination aus Unterstützung der Bediener und der Implementierung autonomer Systemfähigkeiten im Vordergrund. Ein Kernstück bildete die Entwicklung eines Graphical User Interfaces, das auf Unity basiert und Handlungsempfehlungen sowie beispielsweise Greifposen vorschlägt. Die Umsetzung autonomer, kollisionsfreier Greiffähigkeiten wurde durch den Einsatz von Algorithmen zur Bestimmung optimaler Greifposen und durch die Verwendung von Tiefenkameras für präzise Umgebungserfassungen ermöglicht. Die Realisierung eines teilautonomen Systems wurde mittels des Generativ Grasp Convolutional Neural Network (GG-CNN)-Ansatz umgesetzt. Darüber hinaus wurde ein System zur automatisierten uninformierten Manipulation von Haufwerken entwickelt, das eine Vereinzelung von Schrottteilen für eine effizientere Handhabung ermöglicht.

Zusätzlich erforschte das Arbeitspaket 5 die Möglichkeit, Eingaben von Nutzenden für mitlernende Ansätze zu nutzen, um die Qualität der autonomen Prozesse zu verbessern. Durch die Kombination von Reinforcement Learning mit menschlichen Korrekturen und Optimierungen konnten Greifvorgänge effizienter gestaltet und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine verbessert werden. Aufgrund der positiven ersten Ergebnisse mit Reinforcement Learning wurde ein System für das rein virtuelle Training von Agenten entwickelt, um Strategien für das Greifen unbekannter Objekte in virtuellen Umgebungen zu lernen und diese auf reale Roboter und Objekte zu übertragen. Dieses Training, welches ein Belohnungssystem nutzt und über 2 Millionen Zyklen durchgeführt wurde, führte trotz langsamer Ausführung zu sehr guten Ergebnissen beim Greifen und Abräumen realer unbekannter Schrottteile.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 15S9422C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der beim Autor.

Ort	Datum	Stempel/Unterschrift
Erlangen	03.04.2024	

Berichtszeitraum: 01.10.2020 bis 30.09.2023	Förderkennzeichen: 15S9422C
Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)	
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: Vlrtual REmote RObotics for Radiometrie Sorting (VIRERO), Teilprojekt: Immersives, lernfähiges Teleoperationssystem und autonome Roboterfähigkeiten	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 bis 30.09.2023	Gesamtförderbetrag des Vorhabens: 654.221,30 €
Projektleiter/-in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke	E-Mail-Adresse des/der Projektleiters/-in: joerg.franke@faps.fau.de

Abschlussbericht - Teil II

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

1 Ergebnisse im Arbeitspaket 1

Das Ziel des Arbeitspakets AP1 bestand darin, einen prototypischen Versuchsstand am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) in Erlangen aufzubauen, der die Entwicklung und spätere Bewertung einer Anlage zur robotergestützten Sortierung von nuklearen Abfällen ermöglicht. Dieser Aufbau soll realen und kommerzialisierbaren Anlagen möglichst nahekommen, um eine spätere Anpassung zu erleichtern und reale Bedingungen zu simulieren. Zusätzlich wurde bei AiNT ein Messsystem zur gamma-spektrometrischen Charakterisierung von Schrottteilen entwickelt und getestet. Eine spätere Integration beider Versuchsstände soll eine Validierung des Anwendungsfalls und der Gesamtentwicklung ermöglichen.

1.1 Ergebnisse im Arbeitspaket 1 (a)

Im Rahmen des Arbeitspakets (a) wurde die Planung und der Aufbau der Versuchsanlage mit besonderem Fokus auf die Auswahl von Komponenten durchgeführt, die für den Einsatz in kerntechnischen Anlagen geeignet sind und die dortigen Auflagen erfüllen. Die Systemkomponenten des Versuchsstandes umfassten hauptsächlich Industrie-Knickarmroboter samt zugehöriger Steuerungen, einen Sortiertisch, Greifer/Werkzeuge für das Sortieren und Bearbeiten von Abfällen/Schrottteilen, Sensorik/Messtechnik am Roboter und im Raum sowie Sicherheitstechnik. Ein Sicherheitskonzept für den Versuchsstand wurde entwickelt und integriert.
Die Planung des Gesamtsystems und die Integration der Komponenten erforderten eine hohe Modularität und Skalierbarkeit. Dies wurde durch die Integration verschiedenartiger Standard-Greifer und spezieller Scher-/Schneidwerkzeuge erreicht, die am jeweiligen Roboterflansch angebracht werden. Aus Kostengründen wurden keine automatisierten Werkzeugwechsler eingesetzt.
Nach der Planung und erfolgreichen Integration wurde eine Validierung der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems vorgenommen, wobei die Funktionalitäten in Bezug auf die Sortieranforderungen im Fokus standen. Nach dieser Validierung war der Demonstrator einsatzfähig und stand für weitere Forschungs- und Entwicklungsaufgaben des
Projektes zur Verfügung.

Ausgangspunkt der Absicherung des Konzeptes war zuvor eine simulative Untersuchung mehrere Lösungsvarianten für den avisierten Use-Case, der Entnahme von Schottteilen aus einem Eingangsfass, der Sortierung der Teile als Vorbereitung für eine Charakterisierung und ein Einsortieren in Ausgangsfässer, nach einem optional möglichen, zwischengelagerten Schneidvorgang. Die Auswahl des Hauptroboters für das Handling im Fass wurde stark durch den begrenzten Arbeitsraum im Fass und die erforderliche Flexibilität des Roboters beeinflusst. Mittels Simulation konnte die Bewegung des Roboters in relevanten Situationen analysiert werden. Die Simulation beinhaltete zwei Robotermodelle: SIA20F und TX2-90, die aufgrund ihrer Eigenschaften und vorangegangenen Erfahrungen als Hauptkandidaten betrachtet wurden. Beide Modelle boten ähnliche Arbeitsbereiche und Traglasten, wobei der TX2-90 eine bessere Wiederholgenauigkeit und Prozessgeschwindigkeit aufwies. Der SIA20F zeichnete sich jedoch durch einen zusätzlichen Freiheitsgrad aus, was ihn in engen Räumen vorteilhaft machte. Insbesondere innerhalb der Fässer ermöglichte dieser zusätzliche Freiheitsgrad, wie in Abbildung 1 dargestellt, dem SIA20F, Kollisionen zu vermeiden, die beim TX2-90 unvermeidlich waren, wenn versucht wurde, näher an der Wand des Fasses zu greifen. Daher fiel die Entscheidung auf zwei sieben-achs Roboter (SIA20F und SIA10F) als Handling-Roboter, da sie eben in den spezifischen Bedingungen eine höhere Flexibilität und Eignung bieten. Der SIA20F wird zusätzlich an einer achten Linearachse aufgehängt, um auch den Fassboden erreichen zu können.

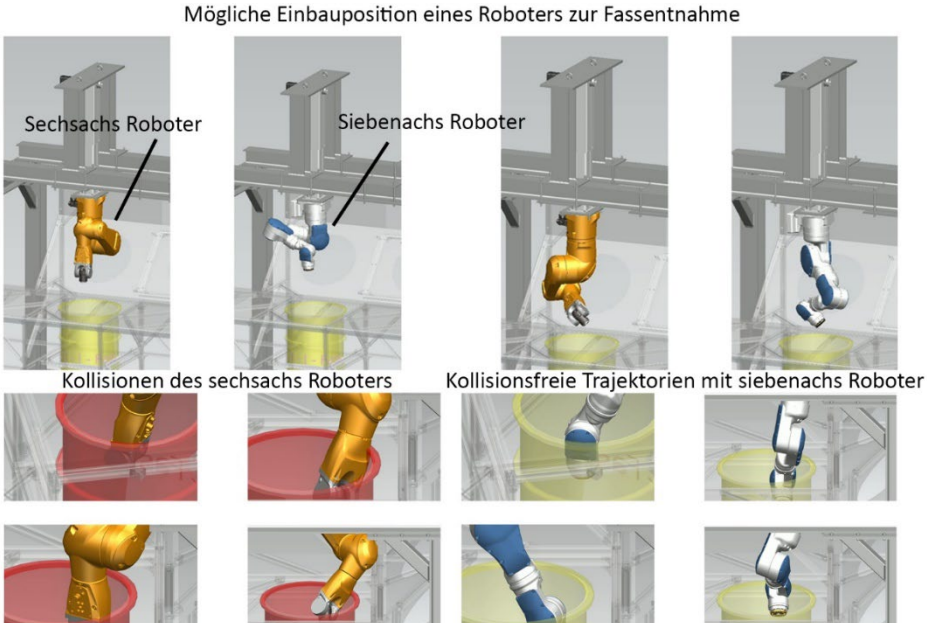

Abbildung 1: Aufgrund eines kleineren Konfigurationsraums kommt es bei simulierten Trajektorien in ein Entnahmefass häufiger zu Kollision im Vergleich zu rechts unten dargestellten Bewegungen mit einem sieben-achs Roboter.

Zum späteren Trennen von Schrottteilen wurde ein GP110 Roboter der Firma YASKAWA gewählt und Erreichbarkeitsanalysen für mögliche Schneidvorgänge durchgeführt. Zusammenfassend wurden nach der Simulation zwei Positionen in Betracht gezogen: Eine neben dem Arbeitstisch mit einem großen Arbeitsbereich, die jedoch eine zusätzliche Stütze benötigte, und eine weitere, weiter vom Tisch entfernte Position, die direkt am Boden realisiert werden konnte und ebenfalls den Anforderungen entsprach. Um Kosten zu sparen und die Installationskomplexität zu reduzieren, wurde entschieden, den GP110 am Boden mit einem Abstand von 1245 mm zum Arbeitstisch zu installieren.

Zusätzlich zu den beiden Handhabungsrobotern und dem Schneidrobotern wurde ein vierter Roboter der Firma Stäubli vom Typ TX60 in die Anlage integriert, um ein Kamerasystem zur Beobachtung bei der geplanten Teleoperation der Robotersysteme zur Handhabung von

Schrottteilen dynamisch positionieren zu können. Insgesamt ergab sich aus den Simulationsstudien der in Abbildung 2 dargestellte Aufbau.

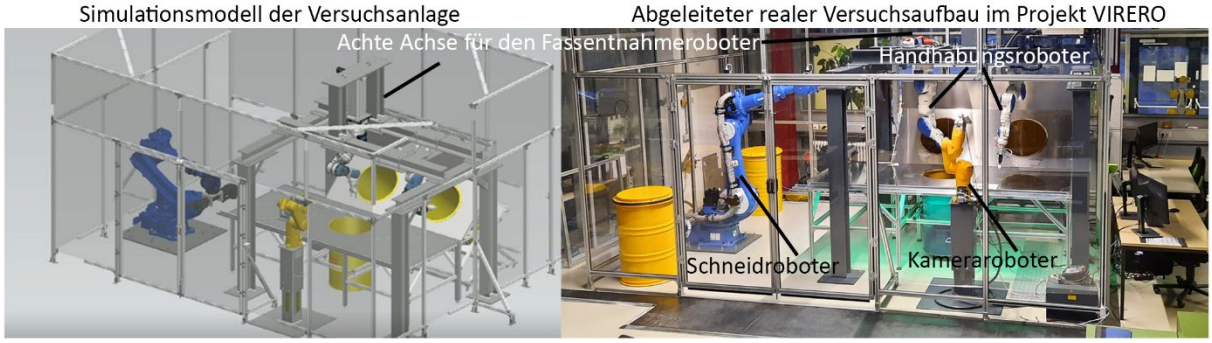

Abbildung 2: Aus einem Simulationsmodell wurde die rechts dargestellte Versuchsanlage mit vier Robotersystemen zur Handhabung, zum Schneiden und zur dynamischen Kameraführung entwickelt und aufgebaut.

Neben der Integration der Robotersysteme wurden ebenfalls Untersuchungen zur Integration von 3D-Punktewolken generierenden Kameras durchgeführt. Diese Kamerasysteme werden im Projekt VIRERO genutzt, um bei der Teleoperation zur Durchführung notwendiger Prozesse eine Visualisierung von dynamischen Objekten beziehungsweise Schrotteilen zu ermöglichen. Bei der Festlegung der Kamerapositionen für die Überwachung wurde zunächst die Microsoft Azure Kinect DK und später Kameras vom Typ ZED2i der Firma Stereolabs als primäre Kamera für die Umgebungsaufnahmen genutzt. Die Bewertung der Installationspositionen berücksichtigte die Sicht der Kameras, einschließlich der Abdeckung, der Vollständigkeit des Zielbereichs und des Blickwinkels zwischen den Kameras.

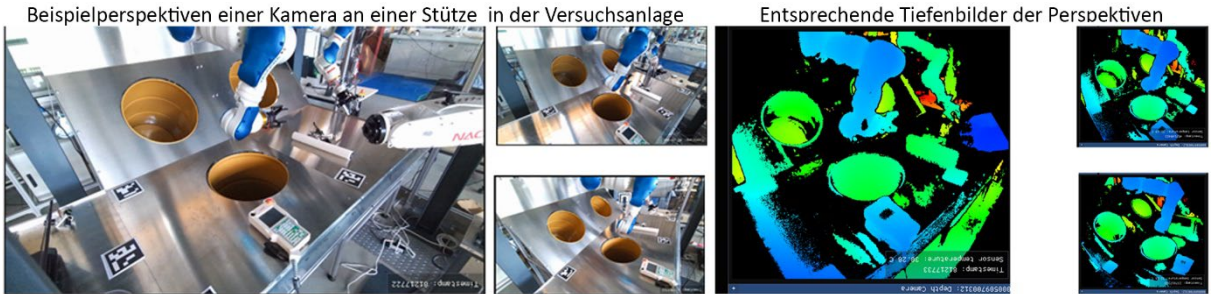

Abbildung 3: Mit Versuchen an der realen Anlage wurden möglichst verdeckungsfreie Kamerapositionen ermittelt.

Für die Ecken der Versuchsanlage festgestellt, dass die Kameras am besten an auf der Vorderseite der verbauten Stahlstützen positioniert werden können. Der Hauptgrund hierfür ist, dass beide Handhabungsroboter von diesem Punkt aus sichtbar sind. Zweitens bietet sich hier eine bessere Sicht auf den Arbeitstisch und es kann insbesondere im Tiefenbild ein größerer Bereich erfasst werden. Darüber hinaus ermöglicht dieser aufgrund des kleineren Winkels zwischen den beiden Kameras und dem Objekt eine bessere Überdeckung der Punktwolke beobachteter Objekte auf dem Sortierbereich, was einen späteren Fusionsprozess unterstützen sollte. An der Rückseite der Versuchsanlage wurden Kameras als Ergänzung zu den Frontkameras in Betracht gezogen, um die Sicht auf Objekte zu vervollständigen, die von den Frontkameras verdeckt werden. Zudem kann eine Tiefenkamera von diesem Punkt aus einen größeren Bereich im Inneren der Fässer erfassen. Im Prototypen werden insgesamt vier Kameras an den Ecken des Arbeitstisches, an der Rückseite und später am Flansch des SIA20F Roboters montiert. Da im Arbeitsbereich zwei Roboter tätig sind, die gleichzeitig zwei Kameras verdecken können, stellt ein System mit vier Kameras sicher, dass mindestens zwei Kameras jederzeit Sicht auf ein beliebiges Objekt haben.

Um ein das Schneiden von Schrottteilen realisieren zu können, wurde weiterhin ein Werkzeug zum robotergestützten Schneiden integriert. Nach einem Auswahlprozess wurde eine Rettungsscher der Firma Weber gewählt. Bei der Integration der Rettungsschere RSU 210 Plus E-Force in das System wurden die Rahmenbedingungen hinsichtlich Gewichts der Schere, ihrer Baugröße, der Schneidkraft und der Energieversorgung berücksichtigt. Da eine Fernsteuerung vonseiten des Herstellers nicht vorgesehen war, musste zunächst ein passender Adapter entworfen, simuliert und hergestellt werden, um die Schere am Roboter anbringen zu können. Für die Ansteuerung wurde eine Siemens Simatic 1510 SP als Basis gewählt. Auf dieser Grundlage wurden weitere notwendige Komponenten ausgewählt. Die Steuerung der Scherenhydraulik erfolgt über ein Ventil, das von einem Schrittmotor betrieben wird. Dieser Motor ist an das Modul TM-Stepdrive angeschlossen, welches eine Ansteuerung des Motors über eine Simatic SPS ermöglicht. Die Inbetriebnahme der gesamten Anordnung wurde schließlich im STEP 7 TIA Portal vorgenommen.

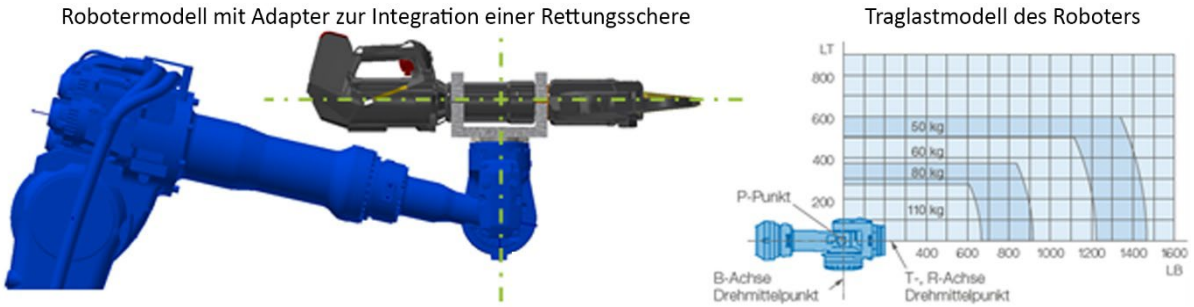

Abbildung 4: Bei der Integration der Rettungsschere wurde die Traglast des Robotersystems zusammen mit einem digitalen Modell zur Erreichbarkeitsanalyse berücksichtigt.

1.2 Ergebnisse im Arbeitspaket 1 (b)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 (b) wurden erreichte Meilensteine parallel zu den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Projekts integriert und bewertet. Zu den durchgeführten Tests gehörten die Überprüfung der räumlichen Charakterisierung und Modellierung der Umgebung als Elemente einer Kollisionsüberprüfung, sowie der Empfehlungen für Greifposen und das autonome Greifen von charakteristischen Abfällen mit vorheriger Zustimmung des Operators.

Angesichts der Tatsache, dass die Beschaffenheit des zu behandelnden Abfalls vor dem Öffnen eines Behälters oftmals unbekannt ist und daher ein breites Spektrum an Materialien und Strukturen erwartet wird, wurden die Testszenarien mit einer Vielfalt an Gegenständen aus unterschiedlichen Materialien gestaltet. Die Auswahl der Gegenstände für die Tests umfasste Gebrauchsgegenstände wie Handschuhe, Werkzeuge einschließlich Zangen und Schraubenziehern, Behälter aus verschiedenen Materialien wie Metall und Kunststoff, mechanische Bauteile wie Ventile und Filterkerzen sowie Steinzeug. Diese umfassende und vielfältige Auswahl an Testobjekten diente dazu, die Versuchsanlage und ihre Komponenten auf ein breites Spektrum von realen Situationen vorzubereiten und deren Effektivität im Umgang mit den verschiedenen Arten von Abfall, die in der Realität angetroffen werden könnten, zu evaluieren.

Zunächst wurden Schnittversuche durchgeführt. Für die Schnittversuche kamen verschiedene Gegenstände zum Einsatz, die aus Metallen wie Aluminium- und Stahlprofile, Gewindestangen und Stoßdämpferkolben bestanden und, die beispielhafte Teile annähern, die in realen Anwendungsszenarien vorkommen können. Diese wurden frei schwingend aufgehängt, um die Schneidkräfte zu minimieren und eine freie Beweglichkeit bei auftretenden Kräften zu gewährleisten. Die Schere konnte erwartungsgemäß alle Gegenstände vollständig trennen. Bei härteren und dickwandigeren Materialien musste die Schere mehr Kraft aufwenden, was dazu

führte, dass die Schnittreste mit hoher Geschwindigkeit weggeschossen wurden und der verbleibende Teil stark schwang. Insbesondere bei Aluminium kam es zu einem Zersplittern in mehrere Teile.

Abbildung 5: In Schneidversuchen mit frei hängenden Teilen konnten Schrotteile unabhängig von ihrer Härte zuverlässig mit einem Schnitt getrennt werden.

Um der Bewegung von Schrottteilen beim Schneiden Rechnung zu tragen und die beteiligen Robotersysteme vor den Prozesskräften beim Schneiden zu schützen wurde das in Abbildung 6 dargestellte flexible Aufnahmesystem entwickelt und integriert. Es wurde ein pneumatisch betriebenes System zur Klemmung von Reststoffen mit einer flexiblen Aufhängung integriert. Die entwickelte pneumatische Klemmvorrichtung erfüllte alle gestellten Anforderungen: Sie konnte die Testobjekte fest verspannen, wodurch diese beim Zerkleinern nicht gelöst wurden. Zudem war die Vorrichtung in der Lage, den Bewegungen verbiegenden Testobjekten zu folgen und Rückstellkräfte aufzufangen. Weiterhin wurde ein Feder-Dämpfersystem entwickelt, um einerseits eine ausweichende Bewegung der Schneidobjekte beim Schneiden zu erlauben und gleichzeitig mittels eines ansteuerbaren Pneumatikzylinders die Nachschwingphase nach einem Schneidvorgang zu verkürzen.

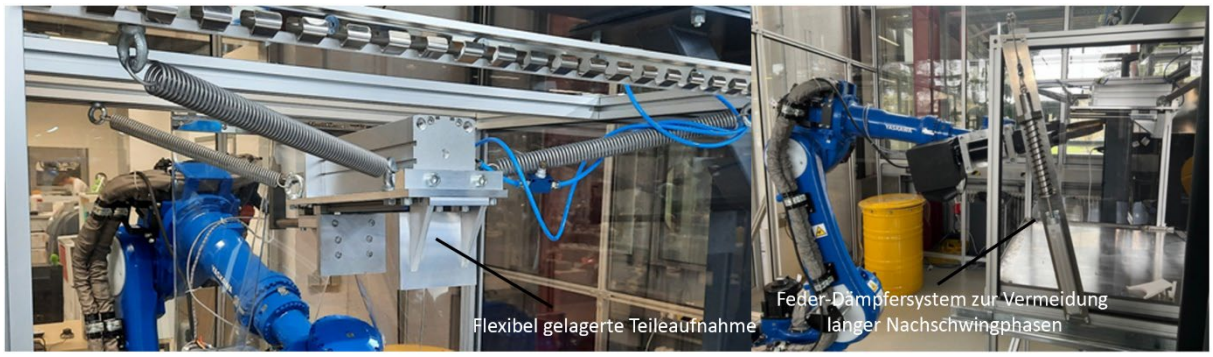

Abbildung 6: Ein flexibles System zum Halten von Schneidteilen entkoppelt die beteiligten Robotersysteme von den hohen Prozesskräften (links). Mit einem Feder-Dämpfersystem kann ein Nachschwingen nach einem Schneidvorgang aktiv unterbunden werden.

Weiterhin wurden zum einen Konzepte für eine lokale Einhausung der Schneidzone entwickelt und in der Versuchsanlage getestet, um bei Schneidvorgängen abgesprengte Teile zuverlässig lokal begrenzt auffangen zu können. Dabei wurden Polycarbonatplatten genutzt. Für die Öffnungen zur Einbringung der Teile und des Schneidroboters wurden verschiedene Konzepte wie die in Abbildung 7 dargestellten Lamellenvorhänge und Türen entwickelt und untersucht. Versuche zeigen, dass in jedem Fall Türen benötig werden, da Lamellenvorhäng keinen zuverlässigen Schutz von einem Herausschleudern von Schneidteilen bieten, insbesondere auf der Seite des Schneidroboters, der durch die Vorhänge durchgeführt werden muss. Dies gilt auch wenn der Roboter selbst mit zusätzlichen Vorhangteilen für Bereiche unterhalb des Flansches ausgestattet wird. Da die Einführung einer lokalen Schutzeinhausung die Bewegungsfreiheit des integrierten GP110 Roboters zur Führung der Trennschere weiter stark einschränkt und Versuche zum robtergestützten Schneiden gezeigt haben, dass effektiv nur wenige Freiheits-

grade zum effizienten Schneiden notwendig sind, wurde ein in Abbildung 8 dargestelltes Konzept auf der Basis kostengünstiger und robuster Linearachsen zum Führen der Schere entwickelt.

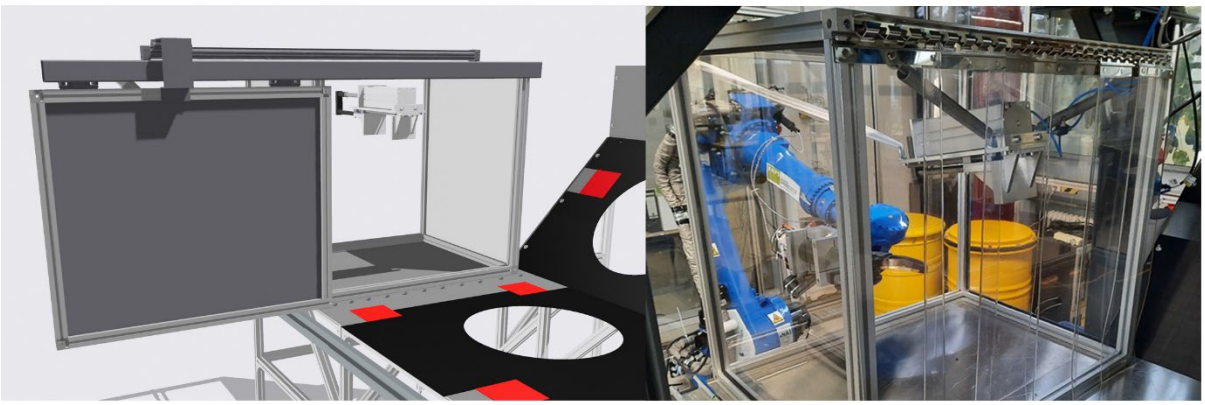

Abbildung 7: Ein Konzept zur Abschottung der lokalen Scheindzone während Schneidvorgöngen auf Basis von Türen (links) funktioniert im Gegensatz zur (rechts) dargestellten Variante mit Vorhängen zuverlässig.

In Arbeitspaket 1 (b) wurden umfangreiche Versuche zur Durchführung von Handhabungsaufgaben mittels Teleoperation dargestellt. Das System zur Teleoperation wird im nachfolgenden Abschnitt (c) näher dargestellt. Bei allen Versuchen wurden zunächst die Eingabegeräte des VIVE Pro Systems des Herstellers HTC genutzt. Probanden, die Teile greifen sollten, die ihnen in der VR Umgebung über Punktewolken angezeigt wurden, konnten die Robotersysteme grundsätzlich sehr genau in Bezug zu den Greifteilen positionieren. Versuche haben allerdings ergeben, dass das Öffnen und Schließen der Greifer an den Robotern über Knöpfe an den Game Controllern des VIVE Systems häufig zu unwillkürlichen Bewegungen der Hände der Nutzenden führten und damit die eigentlich gute zuvor eingenommene Roboterpositionierung verschlechterten. Daher wurde ein System zur Erfassung von Handgesten entwickelt und integriert.

Die Ansteuerung wurde mithilfe des SteamVR Plugins in der im Projekt durchgehend verwendeten Game-Engine realisiert Unity, um eine virtuelle Umgebung für die Bedienung von Robotern mittels VR-Headsets VIVE Pro zu schaffen. Die Anbindung an das ebenfalls im Projekt zur Steuerung verwendete Robot Operating System (ROS) ermöglichte eine präzise Steuerung der Robotergelenke beziehungsweise der Greifer basierend auf den Eingaben durch die VR-

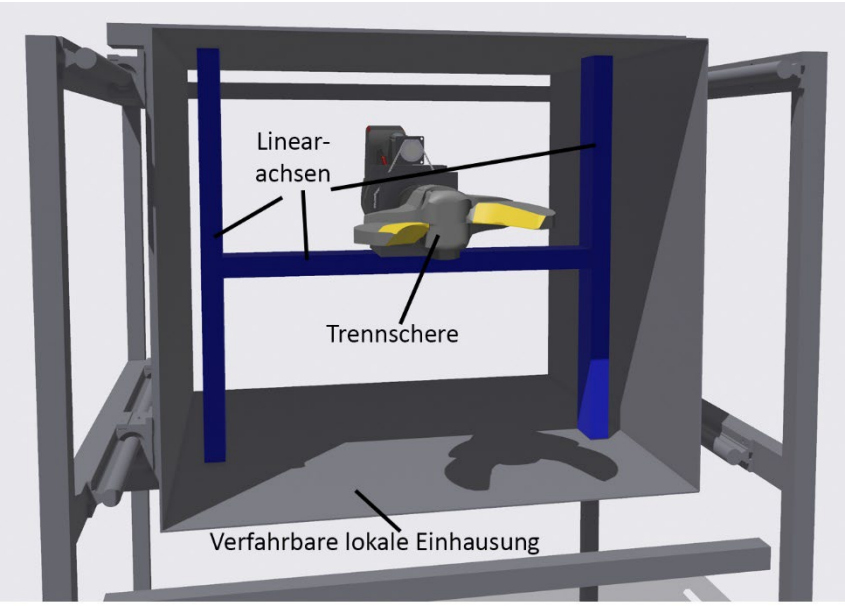

Abbildung 8: Auf der Basis von Linearachsen lässt sich ein effizientes Kinematikkonzept zur Führung der Trennschere realisieren.

Controller. Ein wichtiger Bestandteil des Systems war die Entwicklung einer Gestensteuerung mittels eines Datenhandschuhs, der es erlaubte, die Bewegungen und Gesten des Nutzers direkt auf die Roboterbewegungen zu übertragen. Durch die Gestensteuerung konnten spezifische Funktionen wie das Starten und Stoppen der Bewegung des Roboters intuitiv umgesetzt werden. Die Kombination aus VR-Technologie und Gestenerkennung ermöglichte eine innovative und ergonomische Form der Roboterteleoperation. Trotz der erfolgreichen Umsetzung und der Vorteile wie der präzisen Steuerung und ergonomischen Bedienung wurden auch Herausforderungen wie die Notwendigkeit der genauen Kalibrierung von Gesten und die potenzielle Ermüdung bei langem Halten bestimmter Gesten identifiziert.

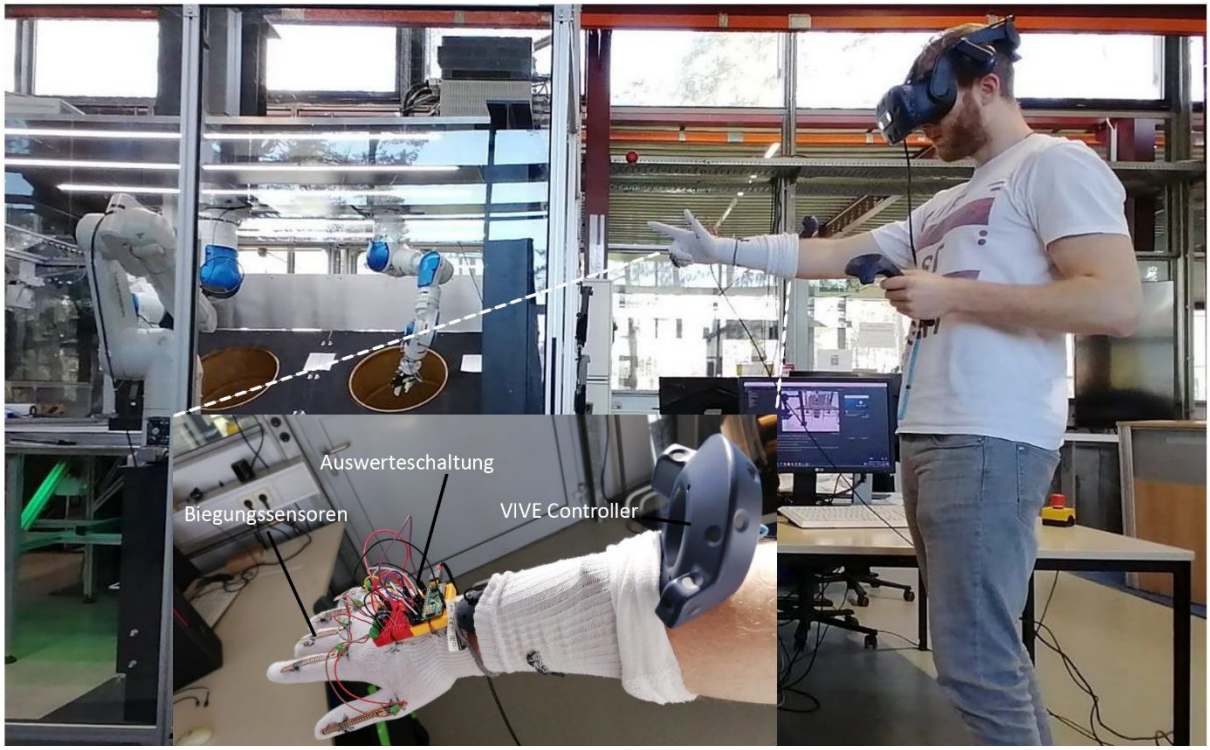

Abbildung 9: Um beispielsweise ungewollte Bewegungen durch Nutzende beim Öffnen und Schließen des Greifers zu vermeiden wurde ein System zur Handgestensteuerung entwickelt und integriert.

1.3 Ergebnisse im Arbeitspaket 1 (c)

Um umfangreiche Untersuchungen mit der am Lehrstuhl FAPS gebauten Versuchsanlage durchführen zu können, wurde neben dem im Vorangegangen beschriebenen Hardwareaufbau eine komplexe Softwarearchitektur mit zwei wesentlichen Systemteilen auf Basis des Robot Operating Systems in der Version ROS 1 Noetic und der Grafik Engine Unity aufgebaut. Die Systemarchitektur kombiniert für Teleoperation und teilautonome Aufgaben verschiedene Technologien: 3D-Kamerasysteme für die Umgebungswahrnehmung, deren Positionierung im vorangegangenen Abschnitt beschrieben wurde, weitere Sensoren beispielsweise zur Abstandsüberwachung der Greifer von Objekten, Steuerungskomponenten und ein Virtual-Reality-System. Ein Abstraction-Layer bindet die Kamerasysteme in ROS ein, wobei die Kameras für eine umfassende Umgebungserfassung genutzt und an Robotersystemen befestigt oder stationär installiert sind. Die Integration diverser Kameras mit unterschiedlichen Perspektiven ermöglicht es, je nach Situation die optimale Kamera auszuwählen. Der Hauptrechner der Anlage ist mit den Steuerungen der Roboter, Endeffektoren und vier ZED 2i Stereokameras verbunden, welche über USB-Glasfaserkabel angeschlossen wurden. Während drei der Rechner Ubuntu 20.04 mit ROS nutzen, läuft der vierte Rechner unter Windows 10 und ist für die Te-

leoperation in Virtual Reality mittels SteamVR und Unity konfiguriert. Die insgesamt vier Computer der VIRERO-Anlage sind über einen 10Gb Netzwerkswitch verbunden und kommunizieren mittels ROS Messages. Die zeitliche Synchronisation der Systeme ist essenziell, da Zeitstempel für die Datenübertragung genutzt werden. Ohne Synchronisation können Verzögerungen auftreten, die zu Problemen wie verzögerten Transformationen, verspäteten Bildströmen und nicht rechtzeitig aktualisierten Punktewolken führen, was wiederum Kollisionen verursachen kann. Um dies zu vermeiden, werden die Uhren der Computer über eine Netzwerkverbindung und das Network-Time-Protocol synchronisiert. Ein Rechner dient dabei als Zeitserver für die anderen, um inkonsistente Zeiten auszugleichen.
Für eine immersive Nutzererfahrung wird das Virtual-Reality-Headset VIVE Pro des Herstellers HTC eingesetzt, das eine Augmented-Virtuality-Umgebung durch die Überlagerung von dynamisch mit Kameras erfassten Teilen mit der statischen Anlagen- und Roboterdarstellung schafft. Alle bekannten Objekte und Elemente werden dabei nicht direkt als Punktewolken, sondern als gerenderte CAD-Daten dargestellt, um die Nutzerfreundlichkeit und Ergonomie zu verbessern. Die Ansteuerung der Roboter erfolgt über zwei Modi: kollisionsfreie Trajektorienplanung und direkte Posenachführung, wobei zwischen diesen Modi direkt in der VR-Umgebung gewechselt werden kann. Die Trajektorienplanung nutzt das ROS Paket MoveIt für das sichere Anfahren von Zielpositionen, während die direkte Posenachführung für reaktive, präzise Bewegungen basierend auf kartesischer Geschwindigkeitsvektorsteuerung sorgt. Die Auswahl des Betriebsmodus erfolgt durch die Positionierung des Kontrollers in einer virtuellen Sphäre um den Endeffektor des Roboters.

Abbildung 10: Ausschnitt aus einem Beispielvideo zur Demonstration einer komplexen Teleoperationsaufgabe bie der ein beispielhaftes Schrottteil aufgenommen, geschnitten und dann in Zielfässer geworfen wurde.

In Versuchen wie in Abbildung 10 dargestellt konnte gezeigt werden, dass sich teleoperiert komplexe Aufgaben durchführen lassen. Nutzende waren beispielsweise in der Lage ein Teil vom Sortiertisch oder aus dem Fass aufzunehmen, das Teil dann in die Spanneinrichtung zu verbringen und diese zuschließen. Dann konnte der Schneidroboter genutzt werden, um ein Beispielteil zu trennen. Aufgrund der der Augmented-Virtuality-Darstellung konnten geschnittene Teile wiedergefunden und mittels Handhabungsroboter in ein Zielfass geworfen werden. Weiterhin konnten Versuche zur Handhabung kleiner Teile wie beispielsweise M6 Schrauben erfolgreich durchgeführt werden. Auch das teleoperierte Aufnehmen und Benutzen eines Besens konnte gezeigt werden. Ebenfalls durchgeführte umfangreiche Versuche zur Teilunterstützung und zu autonomen Funktionen werden aus Platzgründen in den späteren Beschreibungen der Ergebnisse der Arbeitspakete dargestellt.

2 Ergebnisse im Arbeitspaket 2 (b)

Die Bereits im vorangegangenen dargestellte Softwarearchitektur erlaubt die synchrone Teleoperation und allgemein die simultane Ansteuerung von mehreren Robotersystemen.
Wie beschrieben zeigten Versuche den Nutzen der natürlichen Vorgabe von 6DoF-Zielposen für den Bediener. Allerdings stellte die Qualität und Exaktheit der Punktewolken in Bezug auf ihre Übereinstimmung mit der realen Welt eine große Herausforderung dar. Diskrepanzen von mehreren Millimetern bis hin zu Zentimetern bei ungünstiger Positionierung von Kameras sowie Verdeckungen erschwerten die teleoperierte Aufgabenerfüllung, beispielsweise bei Greifvorgängen. Um diese Probleme zu adressieren wurden die Daten der in der Anlage verbauten Kameras zu einer Gesamtdarstellung fusioniert. Dies beinhaltete den Einsatz von mitgeführten Roboter-Kameras am Roboter für Greifprozesse. Während ein Roboter teleoperiert wurde, um eine Aufgabe zu erfüllen, richtete sich der Greifroboter aufgrund des Prozesses automatisch so aus, dass dessen Kamerablickwinkel einer Draufsicht auf die Greifszene entsprach. Durch die Fusion der Datenströme von stationären und mitgeführten Kameras konnte eine umfassendere und dichtere Punktewolke erzeugt werden. Diese, näher an den Greifobjekten gewonnen Daten erscheinen besser für einen Umgebungsrepräsentation geeignet, als die weiter entfernterer Kameras.

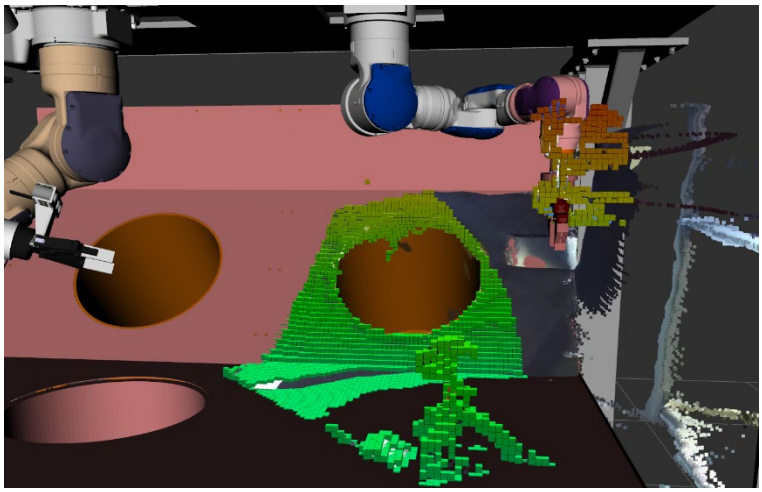

Abbildung 11: Fusioniert Punktewolken von mehreren in der Versuchsanlage verbauten Kameras können zum Aufbau einer Octomap zur Kollisionsvermeidung mit dynamischen Teilen in der Anlage genutzt werden.

Die so erzeugten Punktewolken konnten weiterhin nach der Fusionierung für die Erstellung einer sogenannten Octomap genutzt werden. Diese voxelbasierte Karte kann forthin zur Kollisionsprüfung herangezogen werden. Somit ist es möglich nicht nur Kollisionen der Roboter untereinander oder mit Teilen der bekannten Infrastruktur zu vermeiden, sondern auch Kollisionen mit dynamisch im Arbeitsraum befindlichen Schrottteilen. Zur Umsetzung waren dazu Versuche zur Ermittlung günstiger Toleranzparameter zur Selbstfilterung der Roboter aus den Ausgangsdaten sowie Untersuchungen und die Entwicklung von Strategien für die Umgang mit zwangsläufig entstehenden Artefakten am Rande der Sichtfelder der einzelnen Kameras notwendig. Da der beschriebene Ansatz vollständig in MoveIt integrierte wurde, ist eine Nutzung der Daten auch für die von Framatome weiterentwickelte, prädiktive Kollisionsvermeidung bei der Teleoperation nutzbar.

3 Ergebnisse im Arbeitspaket 4

Das wesentliche Ziel des Arbeitspakets 4 war die Ermöglichung der Neusortierung und gegebenenfalls Freigabe von Material durch die Kombination radiologischer und räumlicher Charakterisierung von Abfallteilen. Die Segmentierung von Bilddaten soll dabei eine geometrische Abgrenzung der Teile sowie zu eine 6DoF-Posebestimmung zur Schätzung der Teileposition und -lage im Raum dienen. Diese Daten können mit den Ergebnissen einer radiologischen Charakterisierung fusioniert werden, um einen digitalen Zwilling der zu sortierenden Abfälle zu erstellen. Die gewonnenen Informationen dienen in der Versuchsanlage am Lehrstuhl FAPS vornehmlich sowohl der Ableitung von Handlungsempfehlungen innerhalb der Anlage als auch als Basis für die Bereitstellung autonomer Systemfähigkeiten.

3.1 Ergebnisse im Arbeitspaket 4 (a)

Für die räumliche Charakterisierung und Erkennung von Abfallteilen wurden Algorithmen zur Verarbeitung von Bilddaten und gegebenenfalls zusätzlich von Punktewolken entwickelt, darunter eine hybride Segmentierungsmethode, die verschiedene Segmentierungsverfahren kombiniert. Dies umfasste Kanten-, Regionenwachstums-, Höhendatenbasierte Ansätze sowie die Untersuchung der Verbesserung durch semantische Segmentierung und die Evaluation von CNNs für die Segmentierung unbekannter 3D-Objekte. Das Ziel war eine zeiteffiziente, zuverlässige und eindeutige Segmentierung und gegebenenfalls eine Wiedererkennung zuvor erfasster Abfallteile.
Ein zunächst dazu untersuchter Ansatz war die automatische Erzeugung von Datensätzen, einschließlich Labeling-Daten für die Objekterkennung mit dem bekannten Single-Shot-Detection Ansatz YOLOv3 auf der Basis automatisch aufgenommener Bilddaten. Ziel war die Entwicklung eines Ansatzes, bei dem zunächst mit einer robotergeführten Kamera Aufnahmen von neuen Objekten aus unterschiedlichen Perspektiven erstellt wurden. In diesen Aufnahmen wurden mit Ansätzen zur Kantenddetektion passgenaue Bildausschnitte erstellt, die möglichst nur das Objekt selbst enthalten. Der Hintergrund des Sortiertisches in der Anlage wurde weitgehend entfernt. Diese vorverarbeiteten Daten wurden zur Erstellung von annotierten Datensätzen zur Nachtrainieren des verwendeten Modells von YOLOv3 genutzt.

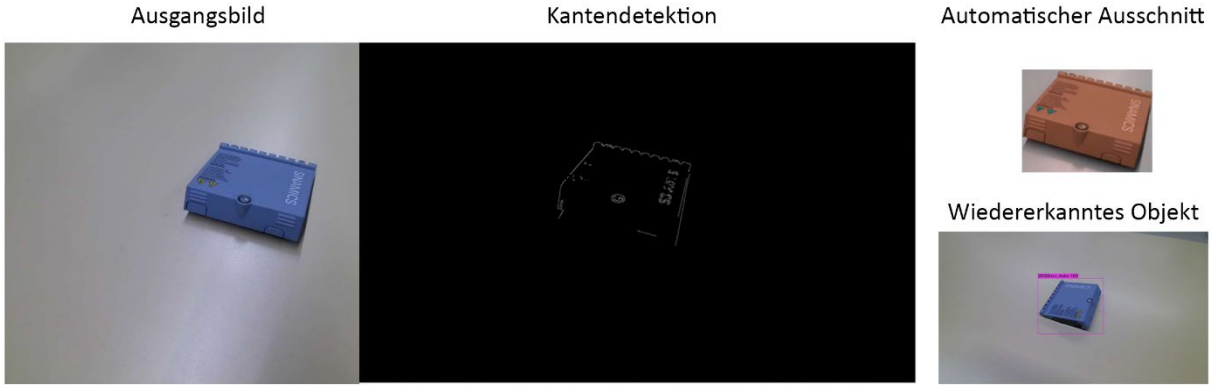

Abbildung 12: Mittels automatisierter Aufnahme und Vorverarbeitung von Bildern lassen sich Trainigsdatensätze automatisch in der Versuchsanlage erstellen um zuvor unbekannte Objekte mittels YOLO wiederzuerkennen.

Eine automatisch generierte Label-Dateien wurde mit einem manuell erstellten Datensatz verglichen, um festzustellen, ob der automatische Ansatz die Qualität manueller Label erreichen und diese ersetzen kann. Fotos wurden dazu sowohl automatisch als auch manuell gelabelt und anschließend ein YOLOv3-Modell damit trainiert. Die Unterschiede zwischen den Methoden wurden anhand der Erkennungsrate beurteilt. Vor dem Training mussten drei Konfigura-

tionsdateien von YOLOv3 angepasst werden, darunter die Klassendatei, die Datenpfadkonfiguration und die Netzwerkkonfiguration, wobei spezifische Anpassungen wie die Anzahl der Zielkategorien und Filter notwendig waren. Das Training fand auf einer CUDA-fähigen NVIDIA Tesla K80 GPU statt und umfasste 2000 Iterationen, wobei jeweils nach 1000 Iterationen Backup-Gewichte gespeichert wurden.
Die Trainingsresultate wurden mit zwei Bildern von Zielobjekten, die nicht im Datensatz enthalten waren, überprüft. Die Ergebnisse zeigten, dass bei manuellem Labeling eine Erkennungsrate bei jeweils sieben verschiedenen Testobjekten von 99% erreicht wurde, allerdings stimmten die Bounding Boxes aufgrund der geringen Datenmenge nicht komplett überein. Verglichen mit den Ergebnissen des automatischen Labeling, das ebenfalls eine Erkennungsrate von 99% erreichte und bei denen die Bounding-Box-Ränder im Wesentlichen mit denen des manuellen Labelings übereinstimmten, konnte festgestellt werden, dass bei passenden Parameterkonfigurationen der vorverarbeitenden Kantenextraktion, die automatisch generierten Label-Daten eine hohe Qualität aufwiesen und das automatische Labeling mit den manuellen Ansatz vergleichbare Ergebnisse liefert.
Als ein weiterer Absatz zum Segmentieren von unbekannten Objekten wurde die frei verfügbare Lösung Segment Anything der Firma Meta untersucht, eine der ersten Zero-Shot-Methoden, die ohne vorheriges Training auskommt. Nach der Entwicklung und Erprobung verschiedener Ansätze erwies sich der nachfolgend beschrieben Ansatz zur Segmentierung unbekannter Schrottteile auf dem Sortiertisch der Versuchsanlage als besonders effektiv.
Der Ansatz umfasst mehrere Schritte, beginnend einer RGB-Aufnahme sowie einer Tiefenbild-Aufnahme des Sortierbereichs mit der in der Anlage am SIA20F Roboterflansch angebrachten ZED2i Kameras vor und nach dem Platzieren von Testobjekten. Ziel war die Erstellung Differenzmaske, basierend auf den Unterschieden zwischen den Pixeln der Objekte auf dem Arbeitstisch und den restlichen Bildpixel. Diese Maske entstand durch den Vergleich der RGB-Aufnahmen vor und nach dem Platzieren der Objekte und wurde anschließend über das nachfolgend erstellte Tiefenbild gelegt. Dadurch konnte ein Tiefenbild generiert werden, das spezifische Informationen über die Höhe der zu segmentierenden Objekte in Bezug auf die Tischebene enthält.

Aus diesem Tiefenbild wurde der Punkt mit dem geringsten Abstand zur Tiefenkamera ausgewählt und zusammen mit der RGB-Aufnahme des Arbeitstisches an das Segmentierungsmodul "Segment Anything" übermittelt. Auf Basis dieser Eingaben erstellte "Segment Anything" eine Segmentierungsmaske, die mit der Differenzmaske verglichen wurde, um die Übereinstim-

Abbildung 13: Die Segmentierung von unbekannten Objekten mit Segment Anything wurde in sechs unterschiedlichen Szenarien untersucht wobei die Aufgabe mit höherer Versuchsnummer zunehmend schwerer druch das Einführen von Verdeckungen und spiegelnden Objekten gestaltet wurde.

mungsrate zu überprüfen. Masken, die einen festgelegten Schwellenwert überschritten, wurden für die Entfernung aus dem Tiefenbild ausgewählt und als Begrenzungsrahmen gespeichert. Dieser Prozess wurde wiederholt, bis keine Objekte mit einer Höhe über der Tischebene im Tiefenbild vorhanden waren. Dadurch wurde der Anwendungsfall eines sukzessiven Abräumens des Tisches durch ein schrittweises Entfernen von Objekten aus den Versuchsbilder simuliert.
Die Bewertung des Ansatzes erfolgte anhand der sechs in Abbildung 13 dargestellten Versuchsdatensätzen mit insgesamt 64 RGB-Aufnahmen und 320 annotierten Masken, welche eine breite Palette an Objekteigenschaften abdeckten. Der Ansatz lieferte überwiegend sehr gute Ergebnisse. Es zeigte sich eine Tendenz zur Übersegmentierung bei Objekten mit Bohrungen wie beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt, starken Farbwechseln oder ausgeprägten Kanten, was aber bei nachgelagerten Greifvorgängen weniger kritisch ist, als eine Untersegmentierung. Beispielsweise bei der in einem späteren Abschnitt beschriebenen Nutzung von "Generativ Grasp" könnte die Ermittlung von Griffpunkten durch Nutzung der Begrenzungsrahmen optimiert werden, was eine verbesserte Griffqualität erwarten lässt. Zur Projektlaufzeit, wurden die beiden Ansätze getrennt betrachtet.

3.2 Ergebnisse im Arbeitspaket 4 (b)

Im Rahmen der Arbeiten zu AP4 (b) fand ein Workshop mit allen Projektpartnern statt, um das weitere Vorgehen zur Integration der radiologischen Charakterisierung und der robotergestützten Sortieranlage abzustimmen. Ursprünglich sollte die entwickelte Anlage für die radiologische Charakterisierung nach der Entwicklung bei AiNT dort ab- und in Erlangen wiederaufgebaut werden. Aufgrund des Fehlens eines Kontrollbereichs am LS FAPS-Standort war dies allerdings nicht sinnvoll. Die Partner einigten sich darauf, die Charakterisierungsanlage im Kontrollbereich beim Partner AiNT zu belassen und in Erlangen ein MockUp der Charakterisierungsstation an die Versuchsanlage anzudocken. Durch den Verzicht auf die Wiederinbetriebnahme der Anlage in Erlangen konnte die Entwicklung eines Konzeptes zum Materialtransport zwischen dem Sortierbereich und der Charakterisierungsstation erfolgen. Ein entwickeltes Konzept sieht vor, einen Teil des Sortiertisches permanent auf zwei Förderbänder zu setzen

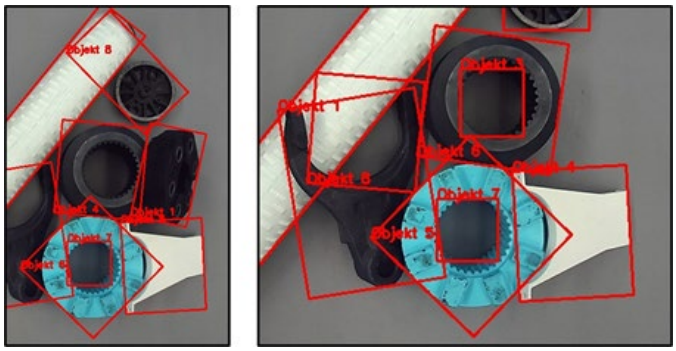

Abbildung 14: Bei der Segmentierung mit Segement Anything, mit dem im Projekt entwickelten Vorgehensmuster, wurden Teile mit Bohrungen teilweise mit mehreren in Rot dargestellten Rahmen sgementriert

und die Anlageneinhausung zu erweitern, um den Tisch unter ein MockUp der Charakterisierungsstation zu fahren, wobei die Position des Tisches durch einen Lasersensor erfasst wird. Alle Antriebskomponenten werden außerhalb der Schutzeinhausung für bessere Wartbarkeit platziert. Zum Projektende war der Aufbau des MockUps noch nicht abgeschlossen. Ein weiteres Ergebnis der Abstimmungsrunden der Projektpartner war die Identifikation relevanter Schrotteile, wie Filterkerzen, Sägeblätter und Rohrabschnitte, die in Versuchen in den Arbeitspaketen 4 und 5 genutzt wurden. Da die Greifergebnisse bei Versuchen zur autonomen Handhabung im Arbeitspaket 5 bereits auf Basis der Daten der in der Versuchsanlage am Lehrstuhl

FAPS verbauten Tiefenkameras, sehr vielversprechend verliefen, ist eine Einbindung der per Lasersensor in der Charakterisierungsstation gewonnen Daten absehbar nicht zwingend erforderlich.

4 Ergebnisse im Arbeitspaket 5

Das Arbeitspaket 5 fokussierte auf die Verbesserung der zeit- und kosteneffizienten Nachkonditionierung durch eine Kombination aus Unterstützung der Bediener und der Implementierung autonomer Systemfähigkeiten. Ein zentrales Element war die Entwicklung eines prozessbegleitenden Expertensystems zur Entlastung der Operatoren, welches auf erweiterten virtuellen Arbeitsumgebungen basiert. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung optimaler Greifposen basierend auf Punktewolkendaten und der Realisierung des autonomen, kollisionsfreien Greifens von Abfallteilen. In einer ersten Phase sollten Nutzenden Greifpose-Empfehlungen zur Verfügung gestellt werden, gefolgt von der Implementierung autonomer Greiffähigkeiten in einer zweiten Phase. Um die Autonomie weiter zu steigern und die Häufigkeit von Fehlern sowie dann notwendigen Operatorinterventionen zu verringern, wurden KI-basierte, mitlernende Systemfähigkeiten zur Selbstoptimierung entwickelt.

4.1 Ergebnisse im Arbeitspaket 5 (a)

Das im Projekt VIRERO realisierte, Unity basierte VR System wurde als zentrale Schnittstelle für Nutzende entwickelt. Das System soll den Zustand des Systems visualisieren, die Ansteuerung ermöglichen sowie Handlungs-, Greif- und Sortierempfehlungen als Entscheidungshilfen für Operatoren geben. Dazu wurden zunächst beispielhafte Elemente eines Graphical-User-Interface (GUI) für die VR Ansteuerung einer komplexen Roboterzelle umgesetzt, wobei für die GUI Elemente die drei folgenden Kategorien definiert wurden. Informieren umfasst Bedienelemente, die Nutzende beispielsweise durch das farbliche Hervorheben von Roboterachsen oder die Einblendung von Nahaufnahmen der Greiferposition über verschiedene Situationen aufklären, wobei lediglich die Wahrnehmung und das Verständnis im Fokus stehen, ohne dass eine direkte Interaktion erforderlich ist. Interagieren präsentiert Bedienelemente, die eine aktive Interaktion des Benutzers mit dem System erlauben, wie beispielsweise das Einzeichnen von Schnittlinien auf Objekten für das Zerschneiden von Teilen oder das Anpassen von Karten und Bildinformationen über Schieberegler. Kontrollieren bezieht sich auf Bedienelemente, die eine direkte Manipulation der Roboter und ihrer Aktionen ermöglichen, indem sie etwa das manuelle Verstellen einzelner Achsen für komplexe Roboterposen oder das Einstellen der Verfahrensgeschwindigkeit zur Anpassung der Handhabung der Materialien erlauben.
Um die Präzision beim Greifvorgang zu erhöhen und Fehlpositionierungen aufgrund eingeschränkter Blickwinkel in VR- oder AR-Umgebungen zu vermeiden, wurde ein Bedienelement aus der Kategorie Informieren eingeführt, das ein zusätzliches Fenster mit einer Nahaufnahme der aktuellen Greiferposition anzeigt, sobald der Greifer sich in einer bestimmten Nähe zum Tisch befindet. Diese in Abbildung 15 beispielhaft dargestellt visuelle Hilfestellung basiert auf

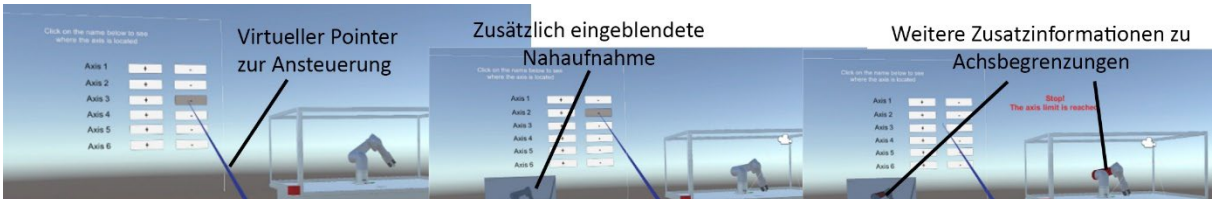

Abbildung 15: Bei Bewegungen eines Roboters können kontextabhängig weitere Informationen mit dem entwickelten GUI System eingeblendet werden.

der kontinuierlichen Berechnung des Abstandes zwischen Tisch und Greifer und erleichtert eine Ausrichtung des Robotergreifers durch Anzeige im Sichtfeld der Nutzenden.
Da es sich bei bereits der entwickelten Versuchsanlage um ein komplexes System handelt und reale Anlagen absehbar in unterschiedlichen Systemkonfigurationen aufgebaut werden können, wurde weiterhin eine Navigationshilfe für wesentliche Komponenten der Anlage entwickelt. Dieses System kann bidirektional mit einer Menüstruktur der Anlagenkonfiguration genutzt werden. Entweder können Nutzende in der VR Umgebung auf Objekte wie beispielsweise Roboter oder Kamerasysteme klicken, worauf hin sich das entsprechende (Unter-)menü öffnet. Weiterhin wurde der umgekehrte Weg implementiert: Klicken Nutzende auf ein „Finden Symbol“ neben dem Menüeintrag wird ein dreidimensionaler Navigationspfeil eingeblendet, der die Blickrichtung in der virtuellen Anlage zu entsprechenden Objekt leitet, bis diese im Zentrum des Blickfeldes ist.
In der Kategorie Informieren wurden neben weiteren Elementen die folgenden beiden kurz beschriebenen GUI-Elemente realisiert.
Die Funktion "Karte bearbeiten" ermöglicht es dem Bediener, eine beispielhafte Intensitätskarten hinsichtlich ihrer Level und Bildauflösung mittels zweier Schieberegler anzupassen, wobei die Strahlungsstufen und die Bildauflösung in vier Stufen variieren können. Die Herausforderung besteht darin, die Farben entsprechend den Strahlungsstufen zuzuordnen, wobei das HSV-Farbmodell anstelle des RGB-Modells verwendet wurde, um eine präzise und intuitive Handhabung der Farbzuordnung zu ermöglichen. Damit wurden Parametereinstellungen an Tiefenbilder, wie Beispielhaft in Abbildung 17 gezeigt ermöglicht.

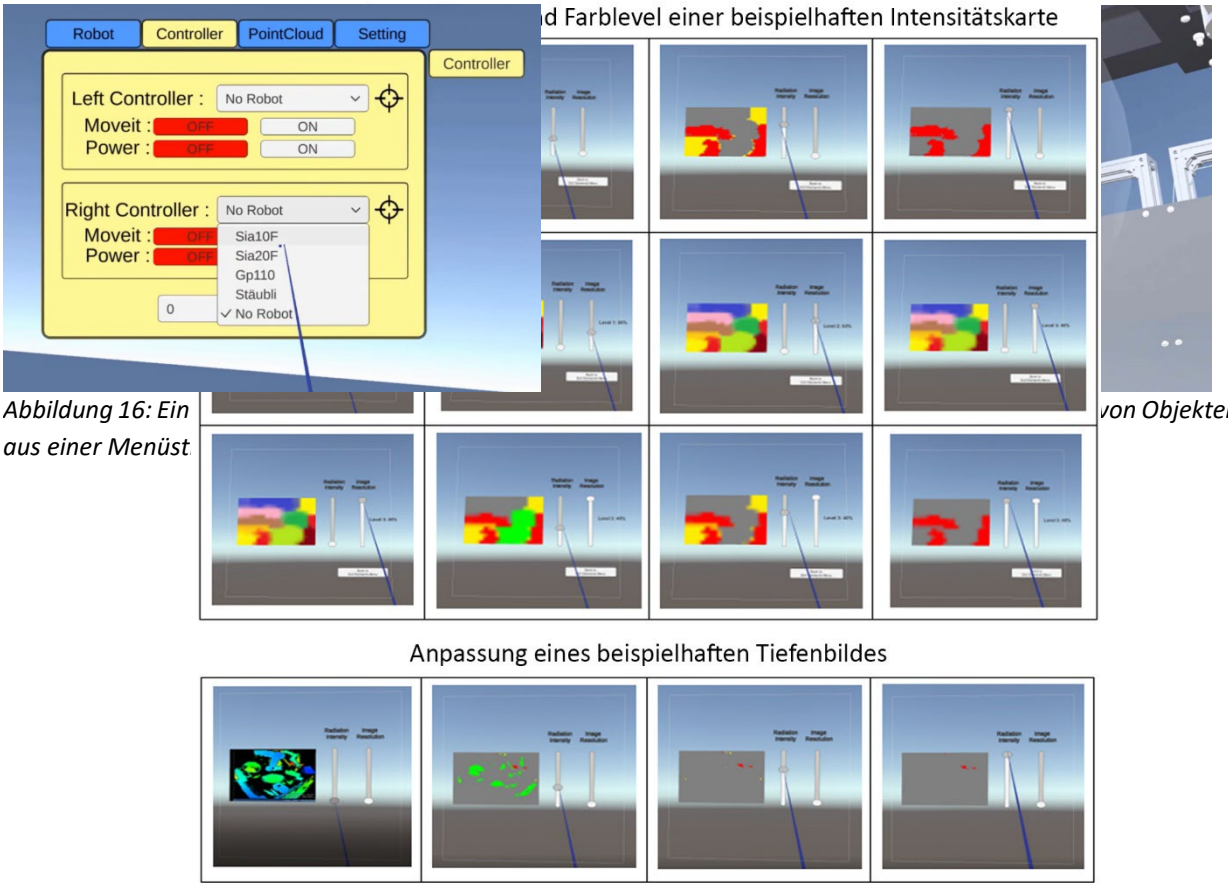

Abbildung 16: Ein *von Objekten aus einer Menüst*

Abbildung 17: Mit angepassten GUI Elementen wurde die Konfiguration der Darstellung von Bildinformationen in der VR Umgebung ermöglicht.

Die Funktion "Schnittlinie einzeichnen" bietet die Möglichkeit, Schnitt- oder Trennlinien auf Objekten zu zeichnen, um diese je nach Größe und Strahlungsverteilung für die Entsorgung oder weitere Verarbeitung vorzubereiten. Dies geschieht über ein Benutzerinterface, das drei Optionen zur Verwaltung der Linie bietet: Neuzeichnen, Verschieben und Akzeptieren der Linie, wodurch eine flexible Anpassung der Schnittführung je nach Anforderung ermöglicht wird.
Um Element aus der Kategorie Kontrollieren zu Testen wurde zwei unterschiedliche Ansteuerungsarten umgesetzt und durch Tests mit jeweils fünf Personen untersucht. Zum einen können mit dem realisierten System Achsen beispielsweise eines Roboters oder der achten Achse des SIA20F Roboters über eingeblendete +/- Symbole einzeln in positiver oder negativer Richtung gedreht werden. Der zweite implementierte Ansatz spielgelt die Orientierung des VIVE Handcontrollers auf eine zuvor ausgewählte Roboterachse. Während die +/--Symbole intuitiv bedient werden konnten, haben alle befragten Personen auch nach einer Nutzungszeit von jeweils 10 Minuten keine Bevorzugung des zweiten implementierten Ansatzes.
Neben die GUI Elementen wurden auch einfache Tutorials zu Nutzung der Menüstruktur, der Bedienelemente und der Navigationshilfen umgesetzt. Wie in dargestellt, werden Nutzende dabei schrittweise an die Verwendung des VR-Systems herangeführt.

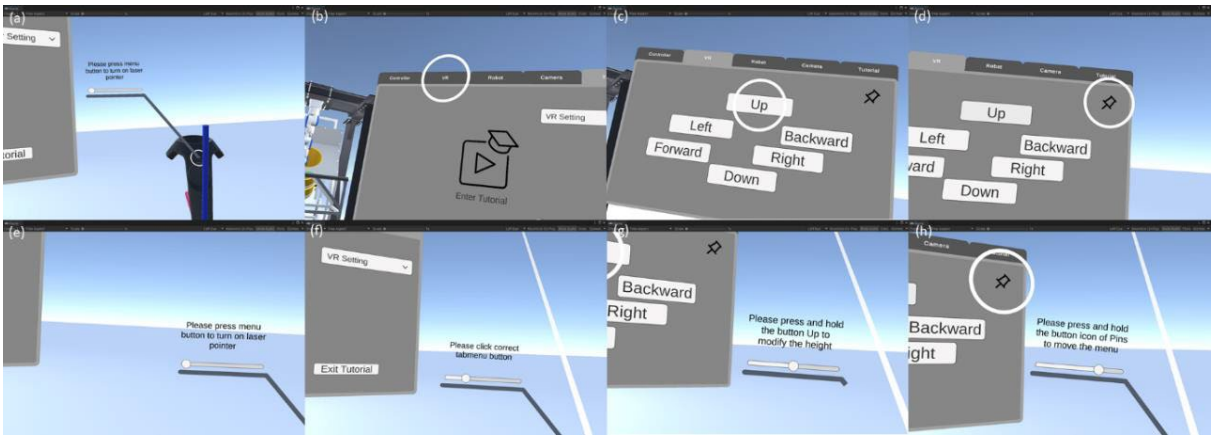

Abbildung 18: Durch die Schrittweise, interaktive textuelle Erläuterung von GUI Elementen und einer bespielhaften Funktionserklärung können Nutzende durch interaktive Tutorials an die Benutzung der Anlage herangeführt werden.

4.2 Ergebnisse im Arbeitspaket 5 (b)

Arbeitspaket 5 (b) zielte darauf ab, Greifposen zu bestimmen und ein autonomes, kollisionsfreies Greifen von Abfallteilen zu ermöglichen, wobei zunächst dem Operator Greifpose-Empfehlungen innerhalb einer erweiterten Realität (AV) angeboten werden sollten und anschließen die Einführung des autonomen Greifens nach Bewertung und Integration verschiedener Algorithmen erfolgen sollte. Da aber erste Versuche zur angepassten Nutzung des Paketes Generative Grasp Convolutional Neural Network (GG-CNN) sehr vielversprechend liefen, konzentrierten sich die Arbeiten zunächst auf das autonome Greifen. Anschließend wurde auf dieser Basis auch die in einem nachfolgenden Abschnitt dargestellten Teilautoomen Fähigkeiten umgesetzt.

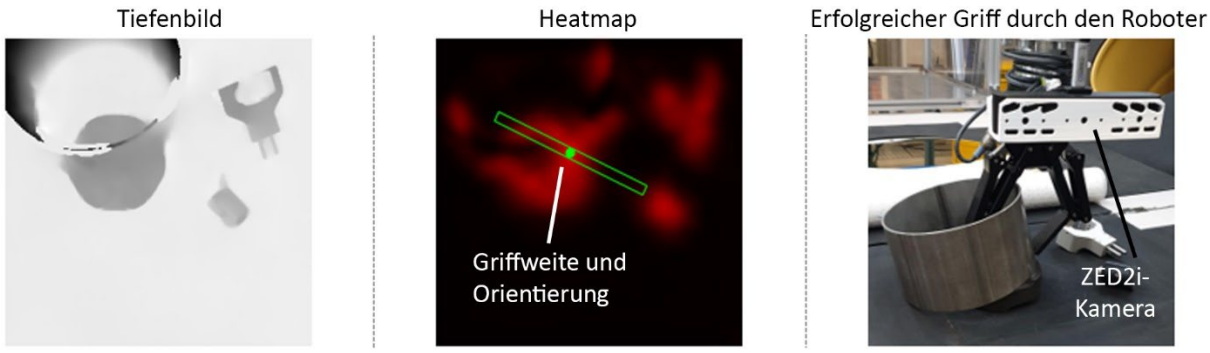

Abbildung 19: Mittels GG-CNN konnten bei beispielhaften Schrottteilen autonom Greifpositionen ermittelt werden.

In Versuchen wurden mittels GG-CCN wie in Abbildung 19 dargestellt aus Tiefenbildern eine Heatmap erzeugt und in dieser besonders geeignete Griffpunkte und Orientierungen identifiziert. Die so ermittelten Positionen wurden dann mit dem ROS Paket MoveIt auf autonom kollisionsfrei geplanten Bahnen angefahren. Im Rahmen dieser Versuche wurde festgestellt, dass ZED 2i Kameras mit der ZED SDK Version 4.0.8 und der Neural Depth Engine 2.0 besonders geeignet sind, um Griffposen mit hoher Präzision zu ermitteln, wobei Objekte ab einer Höhe von 3 mm zuverlässig detektiert werden konnten. Diese Genauigkeit übertraf die Leistung des Intel RealSense Modells D435 deutlich, allerdings waren reflektierende Oberflächen und intensive Lichteinstrahlung Probleme, die jedoch durch bauliche Anpassungen wie eine diffuse Beleuchtung in der Versuchsanlage minimiert werden konnten. Die Verwendung der neuesten Softwareversion brachte weitere Herausforderungen mit sich, insbesondere beim Umgang mit Artefakten, die durch die Tiefenmessung mit der neueren Softwareversion in höherem Maße entstanden. Diese Tiefendaten wurden zur Erstellung dynamischer Kollisionskarten auf der Basis einer Octomap genutzt. Hier mussten geeignete Parameter zur Selbstfilterung in Abwägung der Artefaktreduktion und gleichzeitig der Kollisionssicherheit gefunden werden.
Anschließend wurden Greifversuche mit den in Abbildung 20 dargestellte Objekte untersucht. Insgesamt wurden dabei 96 Greifversuche mit zwei Kameraabständen von 42 cm und 67 cm durchgeführt, von denen 54 erfolgreich verliefen, woraus sich eine Greiferfolgsquote von 56 % ergab. Gemittelt über die gleichgewichteten normierten Werte betrug der Greiferfolg 68 %.

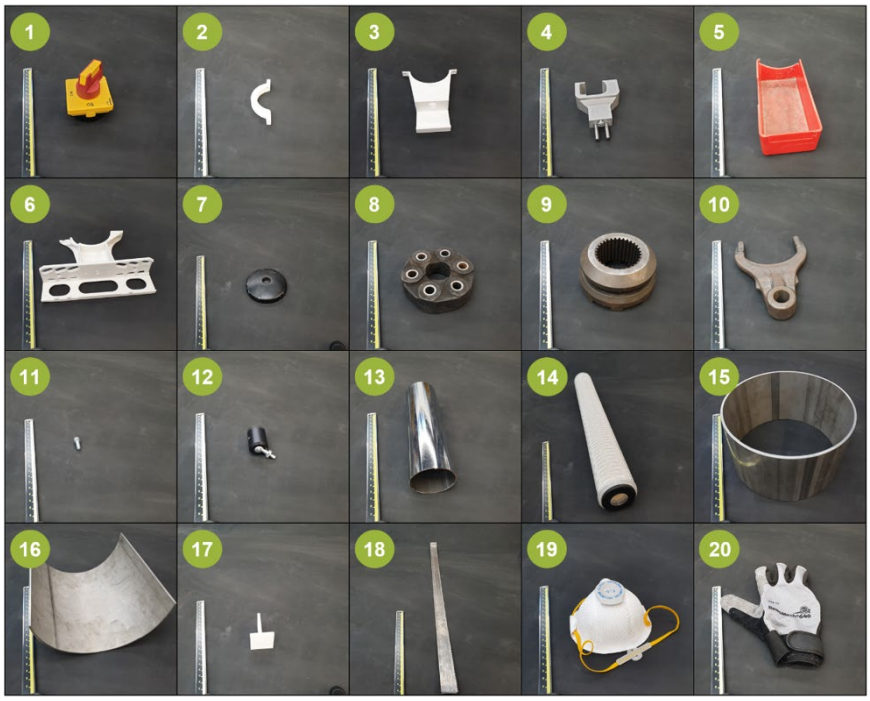

Abbildung 20: Für autonome Greifversuche wurde ein Spektrum an unterschiedlichen Teilen gewählt.

Von den erfassten Objekten konnten mit zwei Ausnahmen alle Transporte realisiert werden. Nach diesen waren noch bei circa 91 % der 53 platzierten Gegenstände die Griffstabilität gegeben. Während der Tests kam es elfmal zu einer Kollision, und die Objektdetektion des Greifers hat im Mittel in über 80 % der Fälle funktioniert. Daraus resultierte, dass von allen Vorgängen 44 % komplett erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Ähnlich wie bei der vorherigen Messung traten etwa in 11 % der Greif- und Transportfälle Kollisionen auf. Besonders auffällig war bei dieser Versuchsreihe das Objekt 11, welches in dieser Konfiguration kein einziges Mal erfolgreich gegriffen werden konnte.
Die Testobjekte 4, 6, 8, 12, 13, 17, 19 und 20 konnten mit einer Wahrscheinlichkeit von 100 % erfolgreich mit dem Greifer aufgenommen und transportiert werden. Im Kontrast zu den Messungen aus einer Höhe von 42 cm zeigte sich beispielsweise anhand des Testobjekts 12, dass die Einschätzung der Position durch das GG-CNN aus einem Abstand von 67 cm weniger differenziert ausfiel. Dies führte dazu, dass das Objekt an der Schraube, die einen deutlich geringeren Durchmesser im Vergleich zum Hauptkorpus des Gegenstands aufwies, gegriffen wurde. Neben diesen Versuchen zur Bewertung der Greifeignung von einzelnen Teilen, wurden auch umfangreiche Versuche zu Griffen aus Haufwerken wie in Abbildung 21 dargestellt durchgeführt. Hierbei zeigte sich in Abhängigkeit der Teile eine ähnliche Leistungsfähigkeit wie bei individuellen Teilen, die allerdings von den prozentualen Greiferfolgen durch weg unter den Erfolgsraten der Einzelversuche lag. Daher wurde wie in einem späteren Abschnitt beschrieben ein System zur Vorvereinzelung entwickelt.
Das beschriebene System auf Basis des GG-CNN Ansatzes wurde ebenfalls zur Realisierung

Abbildung 21: Auch das erfolgreiche Greifen von Teilen aus Haufwerken konnte wie hier beispielhaft gezeigt umgesetzt werden.

einer Beispielhaften Umsetzung für ein teilautonomes System genutzt. Dabei wurde nicht einzelne, sondern eine Vielzahl an möglichen Greifpunkten in der Heatmap des GG-CNN Ansatzes identifiziert und danach vorverarbeitet. So wurden beispielsweise Punkte mit einer starken räumlichen Streuung über fünf sequentielle Aufnahmen hinweg aussortiert. Weiterhin wurden in Clustern von mehreren Punkten, die sich meist auf ein gleiches Greifobjekt beziehen, die schwerpunktnächsten Greifpunkte des Clusters selektiert. Die anderen Punkte des Clusters wurden verworfen. Anschließenden wurden beispielsweise die fünf im Vorverarbeitungsschritt erzeugten und selektierten Greifpunkte als Pfeile über den Positionen in der VR Umgebung dargestellt. Nutzende können somit zu greifenden Teile über eine Auswahl des jeweilen

Pfeils selektieren. Das System bewegt dann einen Roboter autonom über die Greifposition. Nun konnte entweder manuell gegriffen, oder ein autonomer Griff ausgelöst werden.

4.3 Ergebnisse im Arbeitspaket 5 (c)

Um Teile aus einem Haufwerk vereinzeln zu können und so einen autonomen Vorbereitungsschritt beispielsweise für eine anschließende Handhabung zu realisieren, wurde ein System zur automatisierten uninformierten Manipulation von Haufwerken umgesetzt. Die grundlegende Idee dabei war es, mit einem flexiblen unempfindlichen Endeffektor Teile auseinanderzuschieben und so eine Vereinzelung herzustellen. In dem System wurden die gewonnen Informationen einer oder mehrere Tiefenkameras aus unterschiedlichen Perspektiven genutzt, um den Pixelwert und damit letztlich die höchste Position in einem Haufwerk auf dem Sortiertisch in der Versuchsanlage zu bestimmen. Anschließend wurden unterschiedliche Bewegungen in der Ebene dieses höchsten Pixels mit dem in dargestellt flexiblen Greifer durchgeführt. Dadurch werden zufällig Teile auseinandergeschoben und es ergibt sich häufig eine weniger chaotische eher vereinzelte Anordnung der Teile auf dem Sortiertisch. Dieser Vorgang kann mit einer festgelegten Anzahl von Iterationen durchgeführt werden wobei sich sehr häufig das beschriebene Verhalten des Haufwerks beobachten lässt. Masterarbeiten zu diesem autonomen Vereinzelungsansatz laufen aktuell noch nach dem Projektende weiter und zielen auf eine Integration, zum einen mit dem beschriebenen Ansatz auf Basis von Segment Anything, um ein dynamisches Abbruchkriterium des Vorsortierens zu erreichen. Weiterhin soll der Vorverarbeitungsschritt auch bei Ansätzen zum autonomen Greifen genutzt werden. Weiterhin wird der Greifer auch fortlaufend für Greifversuche genutzt.

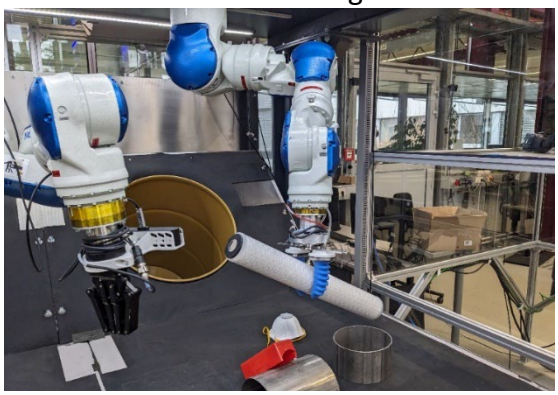

Abbildung 22: Der am rechten Roboter befestigte Soft Gripper kann neben Greifversuchen auch für einen neuen Ansatz zum autonomen Vereinzeln von Haufwerken durch das Verschieben von Teilen genutzt werden.

4.4 Ergebnisse im Arbeitspaket 5 (d)

Im Projekt VIRERO wurden im Rahmen von Arbeitspaket 5 (d) zunächst in umfangreichen Versuchen erforscht, wie Eingaben von Nutzenden als Eingangsdaten für mitlernende Ansätze nutzbar gemacht werden können. Dazu wurden zunächst Aktionen von menschlichen Nutzenden in der VR-basierten Teleoperationsumgebung aufgezeichnet. Die Nutzer mussten dabei zum einen komplette Greifoperationen durchführen. Weiterhin wurde das VR System und Unity genutzt, um auf Basis des Unity Pakets MLAgents Systeme mittels Reinforcement Learning auf die gleichen Greifaufgaben von zuvor bekannten Teilen zu Trainieren. In einem weiteren Szenario wurden menschliche Nutzer dazu aufgefordert, nur die fehlerhaften Abschnitte von Greifvorgängen des Reinforcement Learning Systems zu korrigieren. Anschließend wurde das mittels Reinforcement Learning vortrainierte System (RL) zusätzlich mit Vorgaben von Menschen bei kompletten Greifvorgängen (RL-IL) und mit Vorgaben von Menschen, die nur

fehlerhafte Abschnitte verbessern, nachtrainiert (REF). Ergebnisse, die in Abbildung 23 dargestellt sind zeigen, dass Systeme, die mit menschlichen Vorgaben nachtrainiert wurde, bessere Ergebnisse bei Versuchen zum tatsächlichen Greifen von realen Objekten im Vergleich zu reinem Reinforcement Learning liefern. Es zeigt sich aber auch, dass solche Systeme langsamere Trajektorien im Vergleich zu reinem RF generieren, da sie unnötig menschliche Bewegungen wie beispielsweise leichtes Zittern mitgelernt haben.

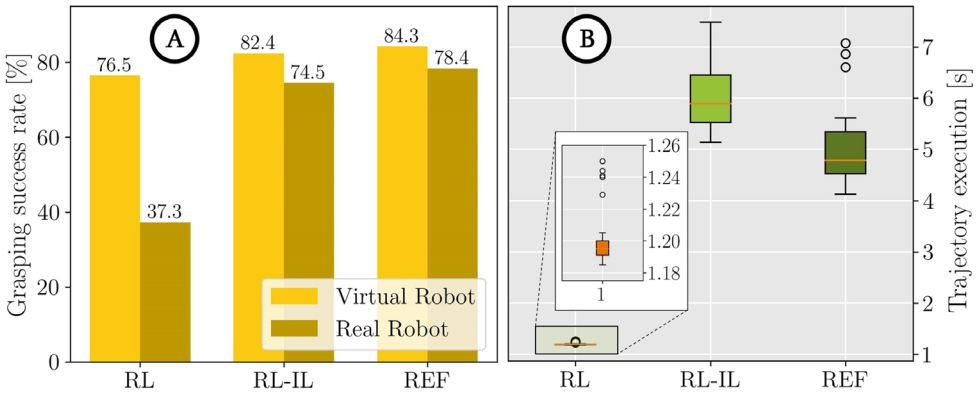

Abbildung 23: Systeme die mit Daten von menschlichen Nutzern nachtrainiert wurden (RL-IL und REF) zeigen bessere (A) aber langsamere (B) Ergebnisse bei der Ausführung von echten Greifaufgaben mit einem realen Roboter im Vergleich zu reinem Reinforcement Learning (RL).

Aufgrund der guten ersten Ergebnisse mit Reinforcement Learning wurde dieser Ansatz weiterverfolgt und ein System zum rein virtuellen Training von Agenten aufgebaut, um den Übertrag von rein in virtuellen Umgebungen gelernten Strategien zum Greifen von unbekannten Objekten auf eine Ausführung mit echten Robotern und Gegenständen zu verbessern. Dazu wurde zunächst ein Rewardsystem entwickelt, dass einen Agenten belohnt, wenn ein Greifteil zwischen die Greiferbacken gebracht wird. Negative Rewards werden für ziellose Bewegungen vergeben. Bei Kollisionen wird ein unendlicher negativer Reward vergeben und das Training abgebrochen. Ein Training über 2 Mio. Zyklen ausschließlich mit den in Abbildung 23 dargestellten einfachen Objekten und einer Variation von Texturen beispielsweise des Tisches führt in - immer noch sehr langsamen - realen Versuchen zu sehr guten Ergebnissen beim Greifen und Abräumen realer unbekannter Schrotteile.

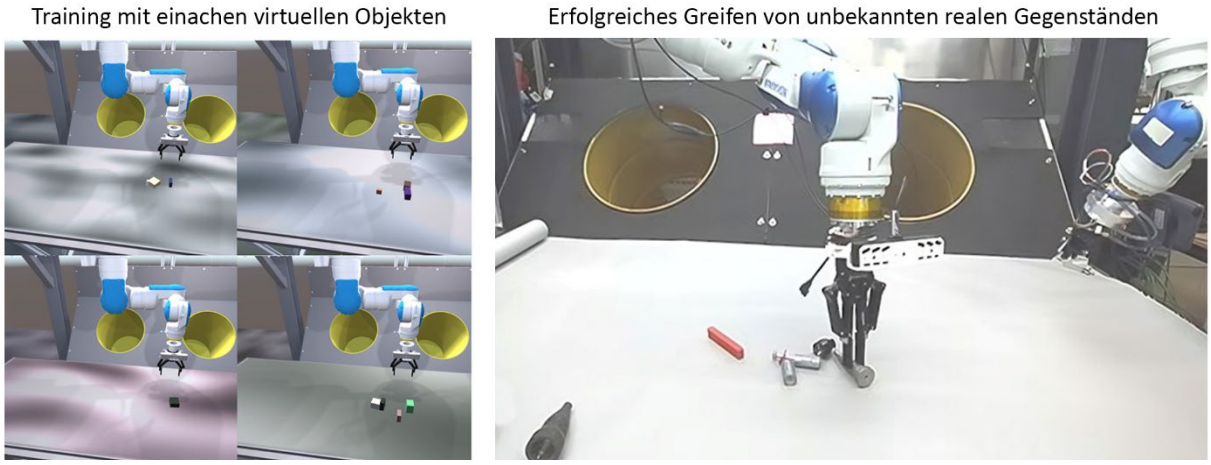

Abbildung 24: Durch ein rein virtuelles Training von Reinforcement Learning Agenten mit einfachen geometrischen Objetken (links) konnte ein System realisiert werden, das reale unbekannte Objekte greift und in ein Fass wirft (rechts).

5 Veröffentlichungen im Projektzeitraum mit Beteiligung des LS FAPS und geplante weitere Veröffentlichungen

- S. REITELSHÖFER. Tele-Operation of Multi-Robotic Systems with Augmented Virtuality for Semi-Automated Handling and Cutting of Radioactive Waste; *ICOND 2021*, Aachen
- HAVENITH, A., M. DÜRR, C. HELMES, K. KRYCKI, T. HANSMANN, B. HANSMANN, F. REISENHOFER, F. SIMONS, M. WANGNICK, S. KOHN, F. QUERFURTH, O. SOMMER, A. KLEIDEITER, N. MUHAMAD ALI, S. REITELSHÖFER, A. BLANK und J. FRANKE. Robotergestützte Sortierung radioaktiver Abfälle zwecks volumenoptimierter Konditionierung - VIRERO. In: *15th International Symposium "Conditioning of Radioactive Operational & Decommissioning Wastes" including 15th Status Report of BMBF "Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities",* 2021, S. 113-126
- FU, B., B. HAAKE, C. HELMES, J. LIN, K. WLASAK, S. KOHN, O. SOMMER, A. WEBER, M. EDER, F. QUERFURTH, NAEEL, MUHAMAD, ALI NAEEL, J. FRANKE und S. REITELSHÖFER. Robotergestützte Sortierung radioaktiver Abfälle zwecks volumenoptimierter Konditionierung - VIRERO. In: KONTEC23, Hg. *KONTEC Symposium in Dresden,* 2023
- BLANK, A., L. ZIKELI, S. REITELSHÖFER, E. KARLIDAG und J. FRANKE. Augmented Virtuality Input Demonstration Refinement Improving Hybrid Manipulation Learning for Bin Picking. In: K.-Y. KIM, L. MONPLAISIR und J. RICKLI, Hg. *Flexible Automation*

Geplant

- S. REITELSHÖFER, M. v. FABRIS, NAMBIAR, A., FRANKE. J. . Efficient Reinforcement Learning Utilizing Virtual Training Environments for Effective Grasping of Unknown Objects with a Robotic System for Nuclear Waste Handling. Tbd.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 15S9422C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der beim Autor.

Ort	Datum	Stempel/Unterschrift
Erlangen	03.04.2024	