

Schlussbericht

RackKI

Automatisierte Integration von Avionik-Racks mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz



FZI Forschungszentrum Informatik
Stiftung des bürgerlichen Rechts
Haid-und-Neu-Str. 10-14
76131 Karlsruhe

Ansprechpartner: M. Sc. Georg Heppner
Tel.: +49 721 9654-248
E-Mail: heppner@fzi.de



Airbus Defence and Space GmbH

Claude-Dornier-Str. 1
88090 Immenstaad

Ansprechpartner: Sascha Wanninger
Tel.: +49 7545 8 5789
E-Mail: sascha.wanninger@airbus.com

Autoren: Stefan Scherzinger (FZI), Robert Wilbrandt (FZI), Sascha Wanninger (Airbus)

Reviewer: Georg Heppner (FZI)

ANLAGEN:

- Erfolgskontrollbericht
- Berichtsblatt zum Schlussbericht



Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50RA2128 (FZI), 50RA2129 (Airbus)



Inhalt

1. KURZDARSTELLUNG	3
1.1 Aufgabenstellung.....	3
1.2 Voraussetzungen	3
1.3 Planung und Ablauf.....	4
1.4 Wissenschaftlich technischer Stand.....	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	9
2. EINGEHENDE DARSTELLUNG	11
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	11
2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	41
2.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	42
2.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	42
2.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	42
3. LITERATURVERZEICHNIS	44

1. KURZDARSTELLUNG

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des vom DLR geförderten Verbundvorhabens OBC-SA wurde ein neues, modulares Konzept für zukünftige On-Board Computer System-Architekturen entwickelt. Basierend darauf, hat die Standardisierungsgruppe PICMG den internationalen Standard CompactPCI Serial Space im Jahre 2017 herausgegeben. Im Rahmen des ESA Projektes *Advanced Data Handling Architecture* (ADHA) wurde dieser Standard in 2020 von ESA für zukünftige Erdbeobachtungsmissionen (ab 2024) ausgewählt. An dieser Entscheidung waren sowohl Airbus, TAS als auch namhafte OBC-Hersteller beteiligt. Airbus hat diesen Standard ebenfalls im Rahmen seiner *Unified Avionics Initiative* ausgewählt.

Die Karten müssen im Rahmen des AIT in das Rack integriert werden. Die mechanische Integration der Karten in das Rack ist aufgrund der hohen Anzahl Pins nicht unproblematisch. Aktuell existiert noch keine geeignete Testvorrichtung für automatisierte Tests solcher Art.

Beim Einstecken der Karten müssen Federkräfte überwunden werden, was schnell zu Verklemmungen führen kann. Klassische Automatisierungslösungen können diese Aufgabe bisher nicht lösen. Zudem sind zwar die Schnittstellen standardisiert, die individuellen Boards unterscheiden sich jedoch in der Größe, Form und Gewicht. Somit ist jeder Steckvorgang mit einer neuen Karte leicht anders, was eine intelligente, individuelle Lösung erfordert. In diesem Vorhaben wurde daher eine automatisierte Testzelle entwickelt, welche einen flexiblen Handhabungsansatz mit einem industriellen, terrestrischen Leichtbauroboter umsetzt und damit die AIT-Phase (Assembly, Integration und Verification) für neue Karten vollautomatisch durchführen kann. Der Roboter lernt dafür mittels KI die Handhabungsstrategien für die Karten. Je nach Karte passt sich das System kraft-sensitiv den komplexen Bedingungen an. Das Vorhaben adressiert die AIT-Phase auf der Erde, dient jedoch gleichzeitig als Proof-of-Concept für spätere Karten-Tests im Orbit.

1.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben RackKI besaß keine expliziten Voraussetzungen. Die genutzten Karten im OBC-Rack nutzen die CompactPCI Schnittstelle, welche die Randbedingungen für die Handhabungen der Karten diktiert. Der entwickelte Ansatz adressiert damit die Herausforderungen dieser Technologie, kann jedoch auch für andere Systeme und Technologien genutzt werden.

1.3 Planung und Ablauf

Das Vorhaben wurde in Form von Arbeitspaketen in unterschiedliche Aufgabenstellungen unterteilt. Diese lauten wie folgt:

AP0 Management

Das Arbeitspaket umfasst sowohl das administrative und organisatorische Projektmanagement als auch das technisch-wissenschaftliche Management.

AP1 Entwicklung und Konstruktion des AIT-Test-Racks

Ziel dieses APs ist die Konstruktion der Testzelle, welche sowohl den Roboter als auch das Test-Rack mit Aufnahmen für die CompactPCI Karten beinhaltet.

AP2 Automatisierte, kraftsensitive Tests der CompactPCI Karten

Ziel des APs ist die Entwicklung der automatisierten, kraftsensitiven Tests mit hoher Zuverlässigkeit, Kollisionsschutz, fließenden Umschalten zwischen den benötigten Kraftfunktionen sowie Schnittstellen für die intuitive Programmierung.

AP3 Intuitive Programmierung neuer AIT-Testvorgänge mittels KI

Ziel des APs ist die Entwicklung einer intuitiven, interaktiven Programmiermethode, die das einfache Einlernen neuer, kraftsensitiver und automatischer Test-Vorgänge (Aufnehmen, Einsetzen, Entfernen und Ablegen) ermöglicht und somit verhindert, dass der Reinraum bei der Entwicklung neuer Tests und Routinen betreten werden muss. Dazu gehört sowohl die Entwicklung der robotischen Handhabung als auch die Planung und Durchführung von automatisierten Tests.

AP4 Demonstration im AIT inklusive Integration und Evaluation

In diesem AP werden alle Komponenten zu einem Demonstrator integriert. Die Funktion wird dann mittels Labortests mit der neu konzipierten Zelle am FZI durchgeführt. Anschließend soll die Zelle samt Rack, Roboter und KI-Software zu Airbus transferiert und unter realistischen AIT-Bedingungen evaluiert werden.

AP5 Roadmap für den Transfer vom AIT zum In-Orbit-Testing

In einem gesonderten Bericht soll die 'Space-Readiness', das erreichte TRL im AIT und das Konzept für eine Entwicklung hin zur Inbetriebnahme auf der Bartolomeo Plattform untersucht werden.

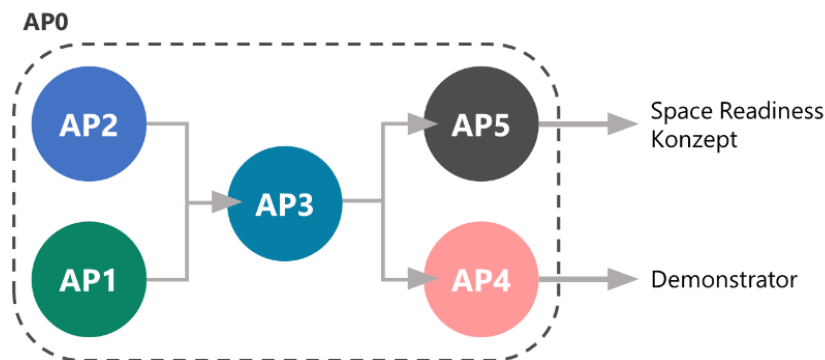


Abbildung 1: Übersicht und Zusammenwirken der APs

Die Arbeitspakete werden in Kapitel 2 genauer erläutert.

Die Arbeitspakete bauen aufeinander auf. In AP1 und AP2 werden die Grundlegenden Techniken im frühen Verlauf des Projekts entwickelt. AP3 nutzt diese Grundlagen und Anforderungen um eine neue intuitive Programmierung der Vorgänge zu entwickeln. Die abschließenden APs 4 und 5 dienen der Umsetzung eines Demonstrators und der Entwicklung eines Space-Readiness-Konzepts welche in weiteren Arbeiten verwendet werden können (siehe Abbildung 1).

1.4 Wissenschaftlich technischer Stand

Nachfolgend sind die relevanten Informationen zum Stand der Technik des Vorhabens aufgeführt.

Intelligente Automatisierung, Wandlungsfähige Systeme und KI:

Das Ziel beim Einsatz von wandlungsfähigen Systemen ist die Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Unternehmen. Dabei ist es jedoch wichtig, den für das Unternehmen und Umfeld richtigen Grad an Wandlungsfähigkeit auf der operativen, taktischen sowie strategischen Ebene zu wählen [1] [2] [3]. Hierbei spielt KI eine Schlüsselrolle [4]. So ermöglicht erst der Einsatz von KI den effizienten Betrieb eines Matrix-Produktionskonzepts [5], wo Produktionsmatrizen unterschiedliche Prozessfähigkeiten und -kapazitäten bereitstellen und die Materialien und Bauteile zwischen den Matrizen mittels AGVs [6] transportiert werden. So sollen Aufträge unterschiedlichster Prozesssequenzen und Produktionsvolumina auf dasselbe Produktionssystem abgebildet werden, um Synergie- und Skaleneffekte trotz kleinerer Losgrößen für eine gesteigerte Produktivität und Ressourceneffizienz auszunutzen. Die resultierende Planungs- und Ausführungskomplexität ist allerdings nur durch KI-Systeme beherrschbar [7]. Doch so ein Matrix-Produktionssystem benötigt intelligente flexible Automatisierungslösungen, um den notwendigen Konfigurations- und Umrüstaufwand zu minimieren und wirtschaftlich effizient zu operieren. Hierbei spielt vor allem die

Rekonfiguration stationärer Manipulatoren sowie mobiler Plattformen für neue Aufgaben eine zentrale Rolle [8] [9] [10]. Eine Möglichkeit, die Herausforderungen der Rekonfiguration zu adressieren, ist die enge Kollaboration mit dem Werker in der Roboterzelle [11] [12].

Regelungskonzepte, robotische Manipulation und Konzepte zur Programmierung

Als Vorbild vieler Regelungskonzepte dient die Industrierobotik, die getrieben von Märkten und Trends eine Fülle an Lösungen entwickelt hat. Für Manipulationsaufgaben im Weltraum gelten im Kern die Prinzipien, die auch für Montageanwendungen im industriellen Kontext maßgeblich



Abbildung 2: Kraftbasierte Roboter aus [16]

sind: Mit zunehmender Autonomie verschieben sich die Anforderungen an die Systeme von Bewegungen in strukturierten Umgebungen hin zu Systemen, bei denen Unsicherheiten neue, Kraft-adaptive Mechanismen (besonders in kontaktbasierten Applikationen) benötigen. Für solche Manipulatoren ist Impedance Control [13] vorherrschend. Der Ansatz postuliert eine paarweise Modellierung von Manipulator und Umgebung als Impedance-Admittance Paar. Eine Impedance-Regelung des End Effektor Werkzeugs ist für steife Umgebungen mit harten Oberflächen der Admittance-Regelung überlegen [14]. Konzeptionelle Weiterentwicklungen erzielen eine Vereinheitlichung für die beiden Grenzfälle weicher und harter Umgebungen [14] und finden Anwendung in Leichtbaurobotern neuerer Generationen [15], deren Vorteile Stabilität der Regelung und Sensitivität in schnellen, kontaktbasierten Bewegungen ermöglichen [16]. Nachteilig für diese Regelungskonzepte ist der erhöhte Aufwand durch Momentensensorik in allen Gelenken, deren Nutzen wirtschaftlich abgewogen werden muss. Für Montageaufgaben, die hinreichend analytisch parametrisiert werden können, erzielen diese Regelungskonzepte eine zum Menschen vergleichbare Performanz [17]. Für totzeitbehaftete Manipulation, wie bei der Teleoperation, sind die regelungstechnischen Stabilitätskriterien von besonderer Bedeutung und können durch eine Passivity-basierte Betrachtung [18] beschrieben werden. Albu-Schäffer et al. liefern hierzu eine einheitliche Analyse von Positions- und Impedance-Regelung für Manipulatoren mit nachgiebigen Gelenken [19]. Neuere Arbeiten existieren zur Lösung des Positions-Drifts [20]. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit der Kraftregelung kann über serielle, elastische

Aktuatoren erreicht werden [21]. Zur Implementierung der Regelungen werden Algorithmen zur Berechnung von Kinematik und Dynamik mit Sonderfällen wie geschlossenen kinematischen Ketten und freischwebenden Systemen benötigt [22], [23].

Für die Erzeugung von Bewegungsfolgen der Manipulatoren können Planer eingesetzt werden [24], die auf Grundlage eines Kinodynamischen Planungsprozesses auch für Systeme mit Unsicherheiten, wie nicht-deterministische Reibung, gute Ergebnisse erzielen [25]. Diese Ansätze gehen jedoch stets von einer festen Basis aus. Auszuführende Trajektorien können bezüglich verschiedener Ziele optimiert werden, beispielsweise Minimierung der motorseitigen Lasten bei gleichzeitiger Bahnkurven-Minimierung [26].

Das Greifen und Manipulieren von beliebigen Objekten mit Robotern ähnlich dem menschlichen Geschick ist eine große Herausforderung [27] [28]. Das Lernen robuster Greifstrategien auf realen Robotern dauert mehrere Tage bis Monate (z.B. 2-3 Monate, mit 14 Robotern) und muss für Änderungen im Hardwaresetup wiederholt werden [28] [29] [30]. Kein Unternehmen kann es sich leisten, Produktionsprozesse für Stunden oder Tage zu stoppen, um Roboter selbständig lernen zu lassen. Dies motiviert die Verwendung von Simulationen zum Training von DNN [31] [32] [33] [34]. Der Transfer in reale Anwendungen kann mittels Sim-to-Real-Techniken erfolgen, welche es ermöglichen, den teuren und zeitintensiven Prozess der Datengenerierung in der realen Welt stark zu reduzieren [35] (Domain Adaptation) oder zu vermeiden [36] (Domain Randomization).

Da eine konventionelle Programmierung von Robotern schwierig zu erlernen, unflexibel und zeitintensiv ist, bieten einige Roboterhersteller wie Franka Emika [37], Rethink Robotics (nun Teil der HAHN Group) [38] und Universal Robots [39] bereits intuitivere Benutzeroberflächen an. Auch von unabhängigen Firmen und Forschungseinrichtungen werden Lösungen zur intuitiven Roboterprogrammierung angeboten, beispielsweise in Form von grafischen Benutzeroberflächen (drag&bot - [40], ArtiMinds [41] und weitere [42] [43]), Programmierung durch Demonstration (Wandelbots [44]), Programmierung mit Funktionsblöcken [45] [46] oder Generierung von Programmen aus CAD-Daten [47] [48].

Satelliten Assembly, Integration and Test (AIT)

Die Integration eines Satelliten geschieht heute noch überwiegend manuell. 5 - 10 Ingenieure benötigen etwa 1 Jahr, um einen Satelliten zusammenzubauen (siehe



Abbildung 3). Hier sind

deutliche

Produktivitätsfortschritte

notwendig, damit Satelliten

aus europäischer Fertigung

wettbewerbsfähig bleiben.

Erste Ansätze in Richtung

automatisierter Fertigung gab

es schon in den späten 90er

Jahre als z.B. Konstellationen

(Gobalstar (48 Satelliten),

Abbildung 3: Manuelle Fertigung eines Kommunikationssatelliten.

Iridium (66 Satelliten), etc.) für eine erdumspannende Kommunikation in den Orbit

geschossen wurden. Auch bei Galileo, dem europäischen Navigationssystem mit 28

Satelliten, waren Teile der Fertigung automatisiert. Jüngstes Beispiel ist OneWeb, bei dem

900 Kommunikations-Satelliten in 3 Jahren in den Orbit gebracht werden sollten. Das

bedeutet, dass jeden Tag ein Satellit ausgeliefert werden musste. Das ist ohne

Automatisierung nicht möglich.

In der Vergangenheit gab es auch bei institutionellen Erdbeobachtungssatelliten schon

Versuche, Roboter für unterstützende Tätigkeiten zu verwenden. Ein Durchbruch wurde

hier aber bisher nicht erzielt, da die Aufgaben doch sehr viel komplexer sind als in der

Automobilindustrie und sich die einzelnen Satelliten - im Gegensatz zu Automobilen -

doch sehr stark unterscheiden. Mit den im Vorhaben vorgeschlagenen neuen,

kraftgesteuerten Verfahren sowie Methoden der Künstlichen Intelligenz lassen sich

Roboter sehr einfach an sich ändernde Randbedingungen anpassen. Ausserdem ist die

Positioniergenauigkeit - selbst bei hoher Last - heutiger Roboter sehr viel besser als es

noch vor wenigen Jahren der Fall war. Aus diesem Grund soll anhand eines konkreten

Anwendungsfalls (Integration von Avionik-Karten in ein Rack) gezeigt werden, dass der

Einsatz von Robotern im AIT von Satelliten deutliche Vorteile gegenüber manuellen

Verfahren hat.

On-Orbit Service, Assembly and Manufacturing (OSAM)

Nicht zuletzt durch die Diskussion bzgl. Raumfahrtschrott gab es in den letzten Jahren

immer wieder Ansätze Satelliten im Orbit zu warten und damit die Lebensdauer zu

verlängern. Meist beschränkten sich diese Ansätze auf das Auftanken der Satelliten, da in der Vergangenheit das Design von Satelliten nicht auf Wartbarkeit ausgelegt war.

Im Projekt iBOSS (Intelligent Building Blocks Concept for On-Orbit-Satellite Servicing) wurde deshalb ein Konzept für modular aufgebaute Satelliten untersucht, welche dann im

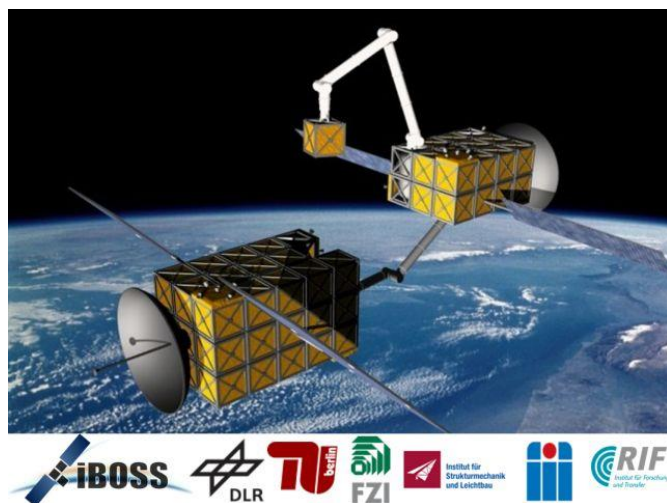


Abbildung 4: Quelle

<https://www.mmi.rwth-aachen.de/projekt/iboss/>

Orbit von Servicer-Satelliten rekonfiguriert, in andere Orbits verbracht oder kontrolliert zum Absturz gebracht werden können. In der aktuellen Projektphase iBOSS-2 rückt das On-Orbit-Servicing (OOS), also die robotische Manipulation und Wartung von Satelliten im Orbit, in den Mittelpunkt der Untersuchungen. Die folgende Abbildung zeigt die Idee der Rekonfiguration eines modularen Satelliten im Orbit.

Bei zukünftigen Langzeitmissionen auf dem Mond oder Mars wird die Wartbarkeit aber zum entscheidenden Faktor, der über Erfolg oder Misserfolg dieser Missionen entscheidet. Wartungsarbeiten im bedruckten Bereich unterscheiden sich nur wenig von Wartungsarbeiten auf der Erde. Allerdings werden Wartungsarbeiten auf der Erde meist von geschultem Wartungspersonal durchgeführt. Bei den geplanten Außenposten auf dem Mond/Mars müssen die Astronauten entweder entsprechend geschult werden oder diese Arbeiten werden mit Hilfe von Robotern durchgeführt. Im Außenbereich sind Roboter vorzuziehen, um das Personal nicht unnötig einer lebensfeindlichen Umgebung auszusetzen.

Die Komponenten in den geplanten Außenposten müssen aber auch so entworfen sein, dass Wartung überhaupt möglich ist. Mit der in OBC-SA vorgeschlagenen modularen On-Board Computer Architektur ist dies in einem Teilbereich möglich. Einzelne Karten können im Fehlerfalle ausgetauscht werden. Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten Verfahren für das AIT am Boden müssen für die Verwendbarkeit unter Weltraumbedingungen angepasst werden, um sie erfolgreich dort einsetzen zu können.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit zwischen dem **FZI Forschungszentrum Informatik** und **Airbus Defence and Space** bearbeitet. Die Arbeiten des FZI

konzentrierten sich dabei auf die robotischen Bestandteile inklusive der KI-gestützten Handhabungsstrategie, der Trajektorien- und Ablaufplanung, dem Design und der Fertigung der Roboterzelle und der Untersuchung zur Nutzbarkeit in einer IOT-Anwendung. Die von Airbus getätigten Arbeiten konzentrieren sich auf die Einbindung der Komponenten in ein Testsystem im AIT-Umfeld, ein Planungs- und Ausführungssystem für Testabläufe, Tests in realistischen Umgebungen und die Mitwirkung am Design auf Basis der Expertise im AIT- und IOT Umfeld.

Beide Partner unterstützen sich bei den jeweiligen Arbeiten mit ihrem Know-How und besprechen den Fortschritt der Arbeiten in regelmäßigen Konsortialtreffen, unregelmäßigen Workshops und Abstimmungen.

Die folgenden Darstellungen in Kapitel 2.1 beschreiben die Arbeiten beider Partner im Rahmen des Vorhabens. In den Beschreibungen der einzelnen Arbeitspakete wird explizit darauf hingewiesen, welche Arbeiten von welchem Partner leitend durchgeführt wurden.

2. EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung wurde zur Forschung an den Themen des Vorhabens und zur Beschaffung und Integration der benötigten Komponenten verwendet. Im Einzelnen wurde die Zuwendung für die Weiterentwicklung von Methoden zur Manipulationsplanung, zur Erstellung von KI-Skills und für den Aufbau einer Device-Under-Test (DUT) Umgebung eingesetzt. Dies beinhaltet sowohl die Arbeiten zu Recherche, Konzeptionierung, Implementierung, als auch Evaluation der Soft- und Hardware.

Die Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse geschehen nachfolgend auf Basis der Arbeitspaket-Unterteilung. Hierbei werden jeweils die Zielsetzung und die erzielten Ergebnisse beleuchtet.

APO Management

Zielsetzung:

Das Arbeitspaket soll das administrative und organisatorische Projektmanagement, sowohl das technisch-wissenschaftliche Management umsetzen.

APO.1 Projektmanagement

Das Projektmanagement befasst sich mit der administrativen Abwicklung des Projektes innerhalb des Konsortiums sowie der Abstimmung mit dem Projektträger.

APO.2 Technisches und wissenschaftliches Management

Das technische und wissenschaftliche Management sorgt für die fristgerechte Erstellung der technischen Zwischenberichte sowie des Abschlussberichts. Weiterhin wird die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Arbeitspaketen koordiniert und auf einheitliche, technische Definitionen und gemeinsame Softwareschnittstellen geachtet.

Ergebnisse:

Es wurde in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern gearbeitet, um die Einhaltung der Zeitpläne zu gewährleisten und Änderungen in der Projektkonstellation abzufedern. Die Zwischenberichte beinhalten hier als Projektdokumentation alle relevanten Änderungen.

Alle Arbeiten wurden innerhalb der Projektlaufzeit wie geplant abgeschlossen und alle Meilensteine wie geplant erreicht. Verzögerungen während der Projektdurchführung wurden durch gezielte Entwicklungssprints ausgeglichen.

AP1 Entwicklung und Konstruktion des AIT-Test-Racks

Zielsetzung:

Ziel dieses APs ist die Konstruktion der Testzelle, welche sowohl den Roboter als auch das Test-Rack mit Aufnahmen für die CompactPCI Karten beinhaltet.

Ergebnisse:

Für die Erreichbarkeitsanalyse wurde ein Tool geschrieben, welches die TCP-Punkte im Arbeitsraum aufspannt und diese nach Manipulierbarkeit bewertet. Dadurch kann ein allgemeiner Überblick über Singularitäten und Zonen, in denen der Roboter Schwierigkeiten hat, seine Ausrichtung zu kontrollieren, ermittelt werden.

Die Manipulationsanalyse wurde auf Basis der Yoshikawa Werte durchgeführt [49]. Durch die Analyse wird für die von der Kinematik erreichbaren Positionen ermittelt, wie frei sich der Greifer an diesen bewegen kann. Ein guter Wert indiziert entsprechend einer möglichen flexiblen Positionierung des Endeffektors und damit eine bessere „Manipulierbarkeit“. Der Wert kann auch invers genutzt werden, um bei gegebener Kinematik und optimierter Manipulierbarkeit eine Platzierung der Basis zu ermitteln. Die Punkte können in variablen Abstand zur Montageebene des Roboters erzeugt werden.

Nachfolgend zu sehen sind die grafischen Darstellungen der GUI und deren Einstellmöglichkeiten.

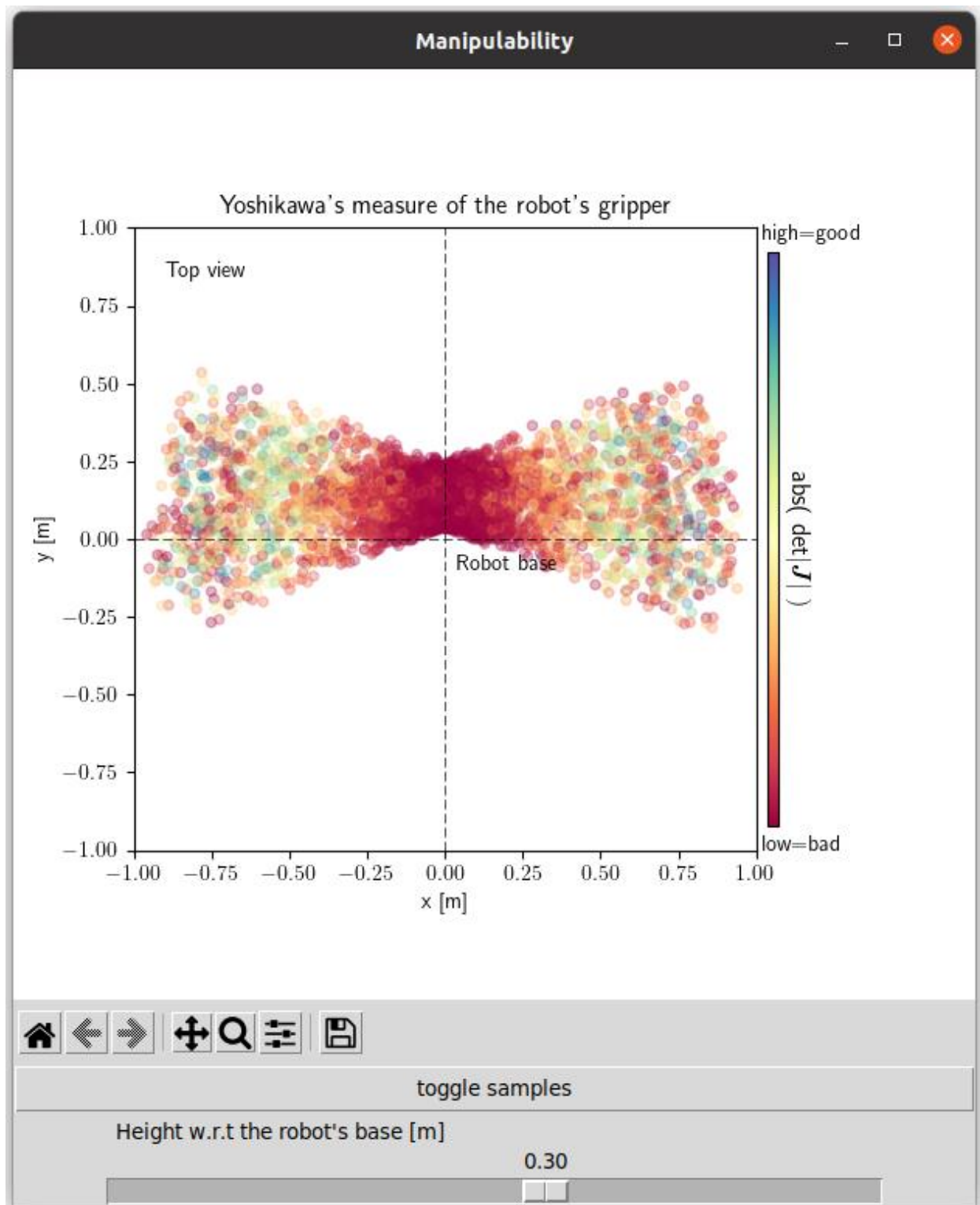


Abbildung 5: Darstellung des GUI Fensters zur Erreichbarkeitsanalyse. Mittels des Reglers lässt sich der Abstand der Roboterbasis zum aufgespannten Manipulationsfeld einstellen. Das Abschließende Bild kann dann exportiert werden.

Abbildung 6 zeigt die Manipulierbarkeit in x- und y-Koordinaten im Abstand zur Roboterbasis. Sie stellt eine Draufsicht dar mit einem horizontalen Schnitt durch den Arbeitsraum des Roboters. Wird der Greifmittelpunkt 15cm vor dem Endeffektor des Roboterarms angenommen ergibt sich eine optimale Positionierung des Racks etwa 40cm über der Roboterbasis (in der Abbildung sind es 30cm) und eine Entfernung der Racks von 80cm zur Basis (also $80-15=65\text{cm}$ auf der x-Achse). Insgesamt ergibt sich ein guter Bereich in weiten Teilen des Arbeitsraumes.

Design und Konstruktion der Testzelle

Das Integrationstreffen bei Airbus in Immenstaad am 21.06.2022 diente der sowohl der Anforderungsanalyse für die Testzelle als auch zum Datenaustausch für die entsprechenden Komponenten der CompactPCI Karten und Büchsen. In der ersten Iteration wurde auf Basis der Yoshikawa Analyse und der CAD-Daten generischer Racks ein Aufbau in Blender generiert. Der Aufbau diente zur Abstimmung mit Airbus und hat

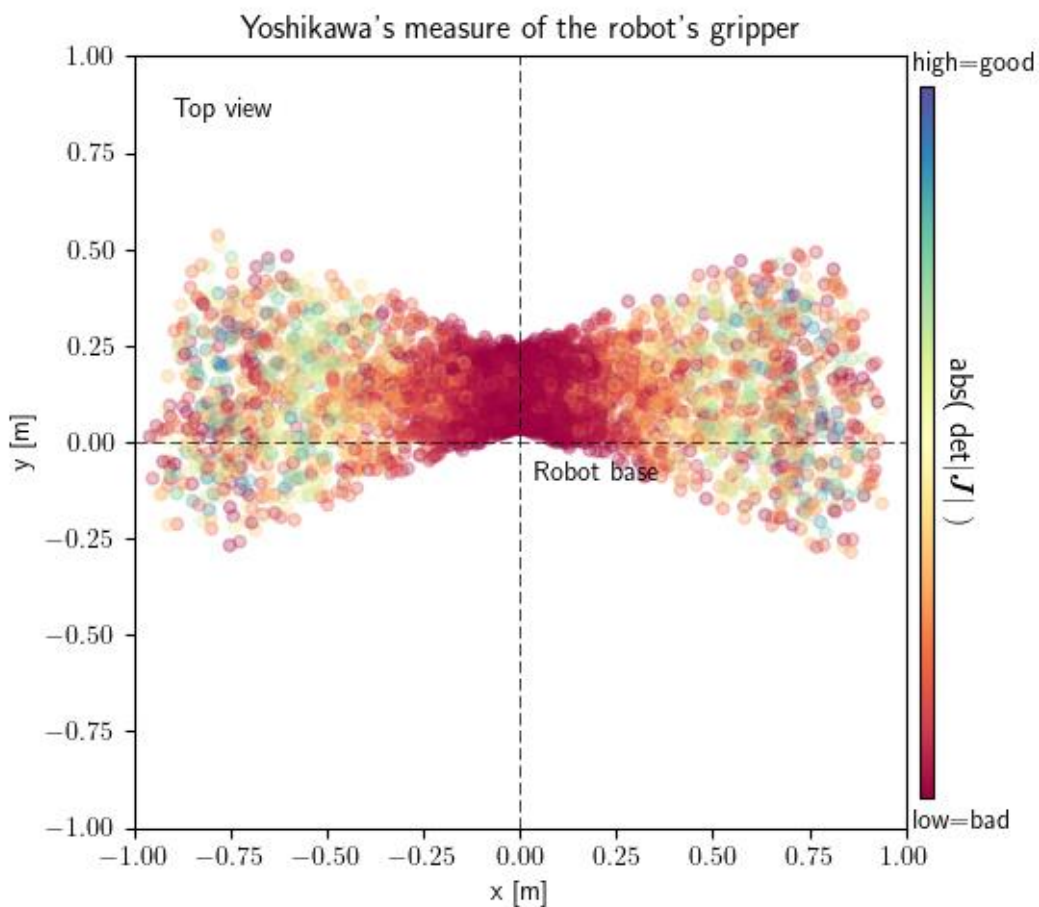


Abbildung 6: Darstellung eines Punktefelds mit individueller Yoshikawa Bewertung. Die Skalierung und Einfärbung geben intuitiv wieder, an welchen Punkten der Roboter Schwierigkeiten hat seinen TCP frei auszurichten.

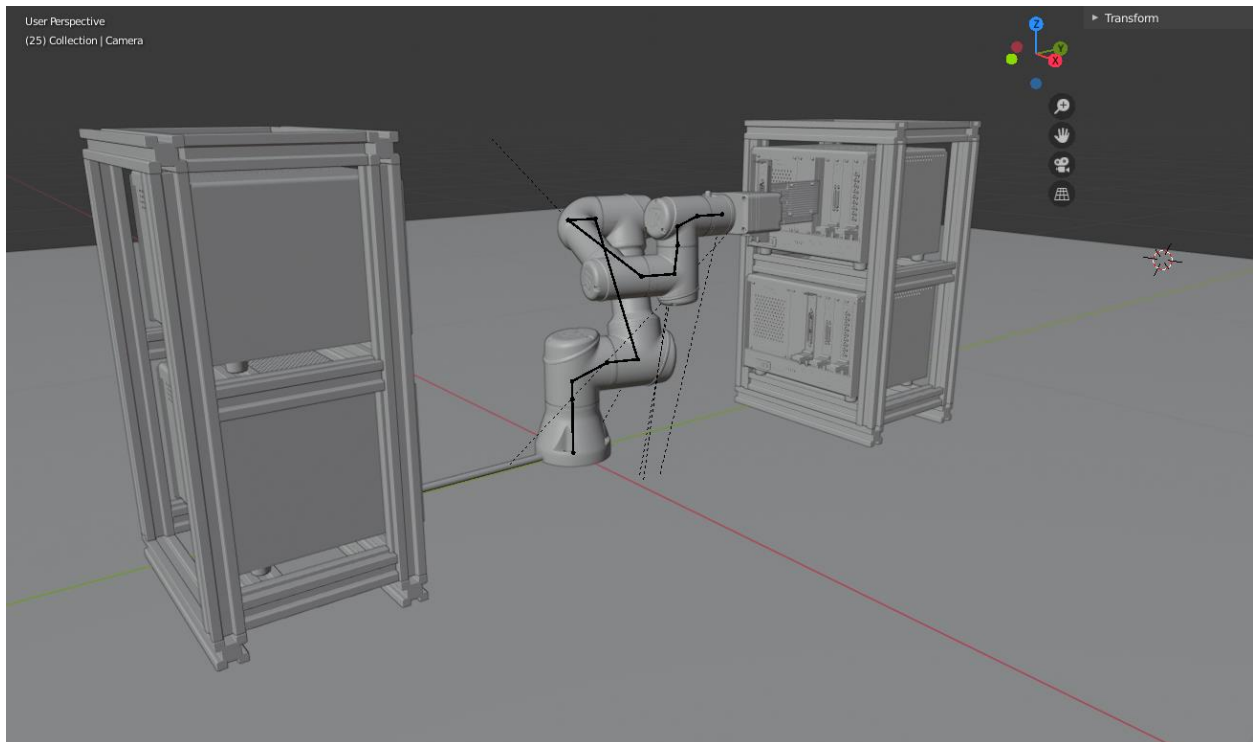


Abbildung 7: Blender Darstellung des ersten Rack Aufbaus mit Bosch Profilen. Hier lässt sich bereits erkennen, dass eine Höhe von 40cm über der Roboterbasis eine gute Manipulierbarkeit der oberen Racks ermöglicht.

die Überlegung angestoßen die Racks vertikal anzuordnen. Hierzu wurden Bilder eines vor Ort vorhandenen Racks und deren Bemaßungen aufgenommen. Diese haben später dazu gedient den ersten Entwurf der Büchse umzusetzen. Einige Beispiele sind nachfolgend zu sehen.



Abbildung 8: "Büchse" von Airbus, eine aus Aluminium gefräste Aufnahme für die Karten und deren dazugehöriges Backpanel.

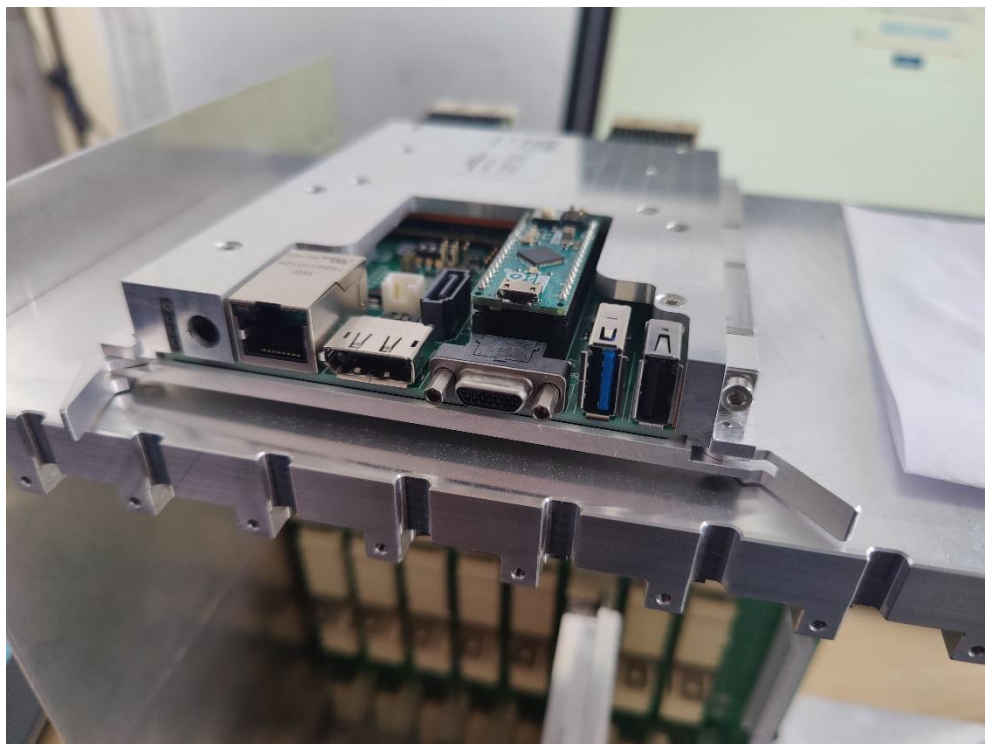


Abbildung 9: Nahaufnahme der Front einer CompactPCI Karte mit verschiedenen Steckeroptionen. Diese Seite sollte später nach vorne sichtbar sein.

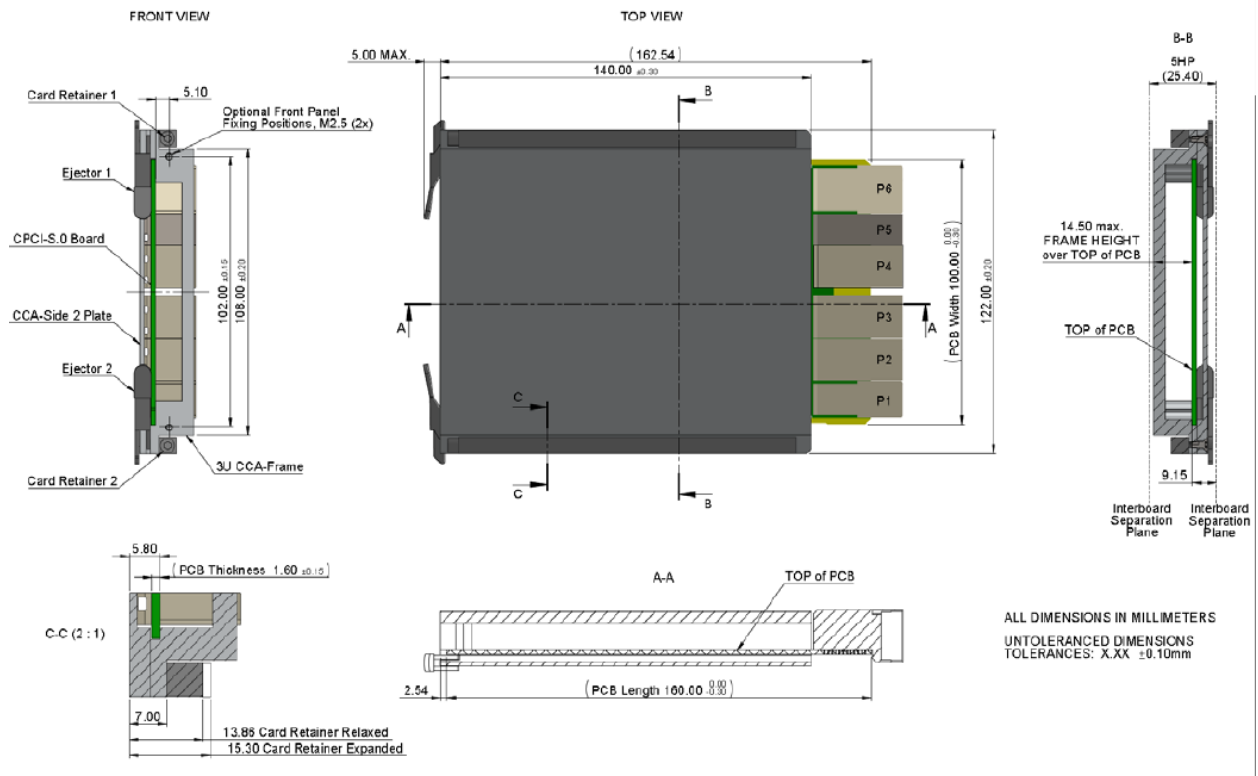


Abbildung 10: Technische Zeichnung der Gehäusekomponenten für eine 'conduction cooled' Karte (3U Maß). Mittels der Maße konnten erste Dummies für das Rack entworfen werden.

Im Integrationsworkshop wurde außerdem geklärt, wie mit dem Lieferengpass zu diesem Zeitpunkt umzugehen war (CompactPCI Komponenten hatten eine 10-monatige Lieferdauer). Es wurde kurzfristig entschieden die initiale Entwicklung des Racks mit vom FZI selber entworfenen und 3D gedruckten Dummy-Karte durchzuführen, um sowohl die reibungslose Entwicklung der Software als auch initiale Designs der Greiferkomponenten zu ermöglichen.

Der erste Entwurf des Racks wurde als möglichst kompakte Version des in Abbildung 8 gezeigten Aufbaus entwickelt. Die Aluminiumprofile wurden dabei so zusammengestellt, dass es möglich war den Abstand des Racks relativ zum Roboter frei einzustellen und

damit den Optimalen Arbeitsraum fein abzustimmen. Die nachfolgenden Abbildungen stellen das erste Konstruktionsdesign des Racks dar:

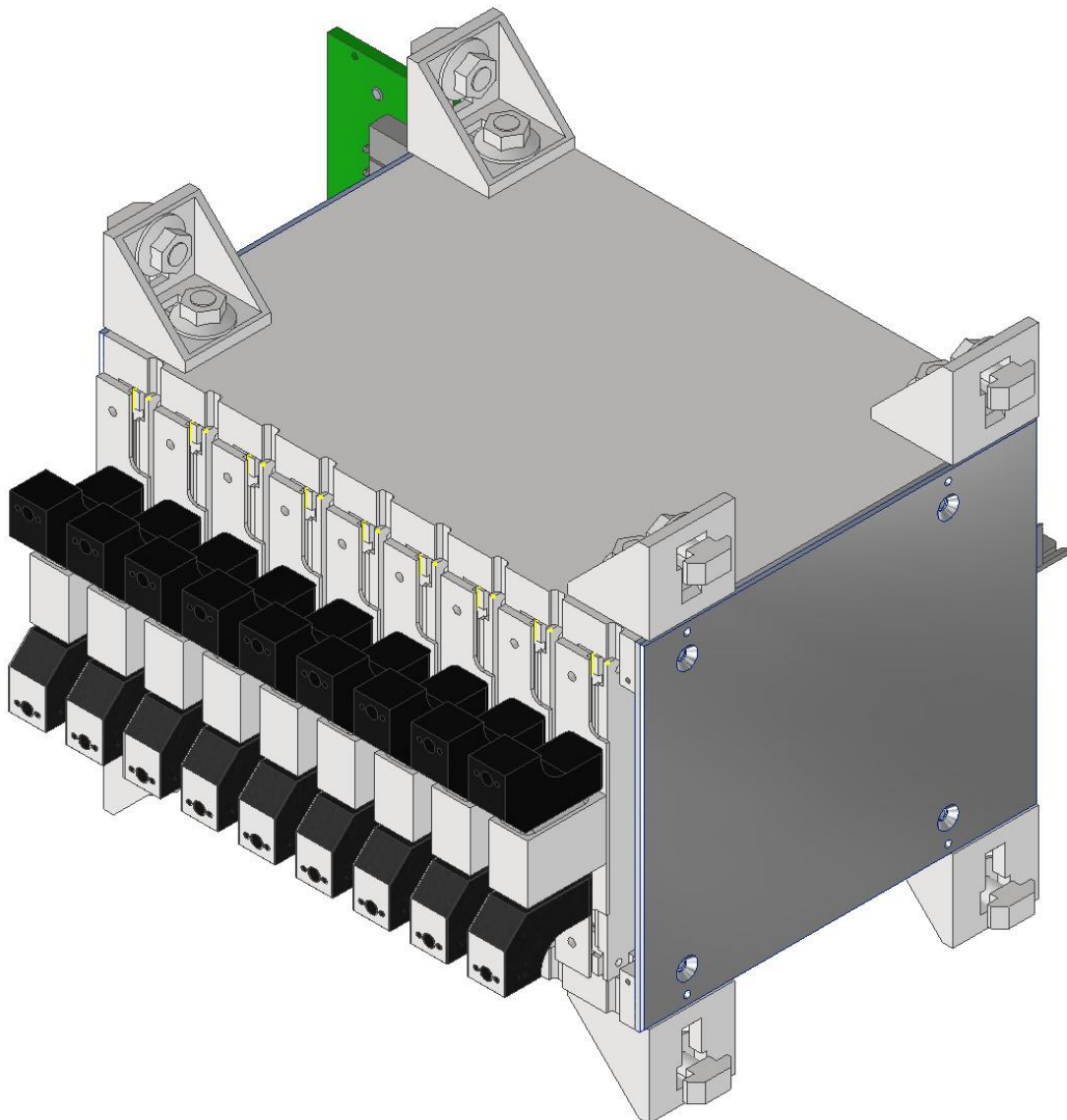


Abbildung 11: Die Aluminium „Büchse“ in isometrischer Ansicht mit eingesteckten Karten. Die einzelnen Karten weisen an der Frontplatte sowohl das finale Griffdesign auf als auch die dazugehörigen Greiferbacken (schwarz dargestellt). Die Greiferbacken sind hier in der Ansicht kopiert, um zu prüfen, dass es keine Kollisionen im Gesamtsystem gibt.

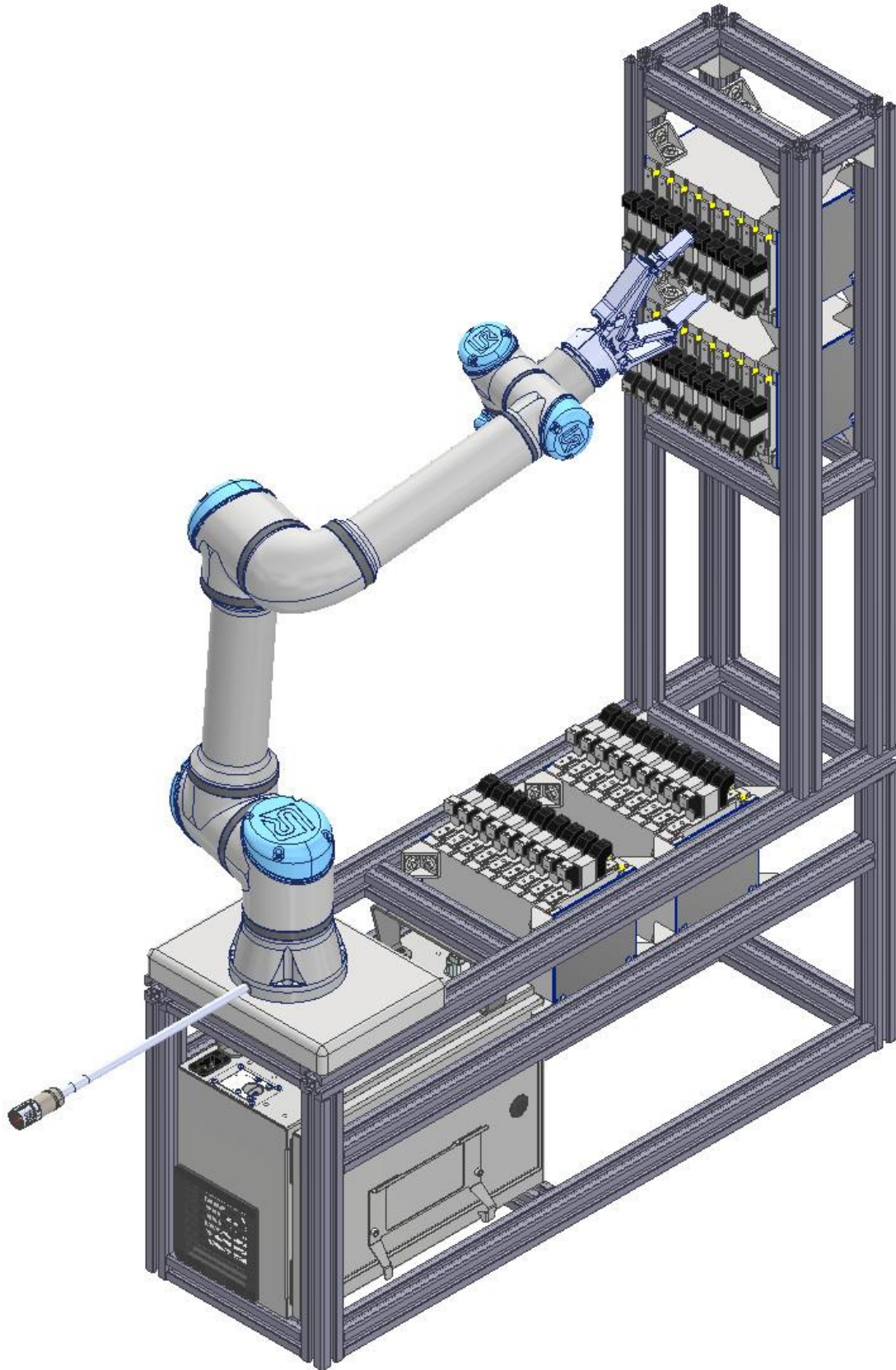


Abbildung 12: Aufbau des Gesamtracks mit Platz für insgesamt 4 Büchsen und dem UR-Steuerrechner (unter dem Roboter). Die Aluminiumprofile sind so aufgebaut, dass sich die Abstände der Büchsen zum Roboter modular einstellen lassen.

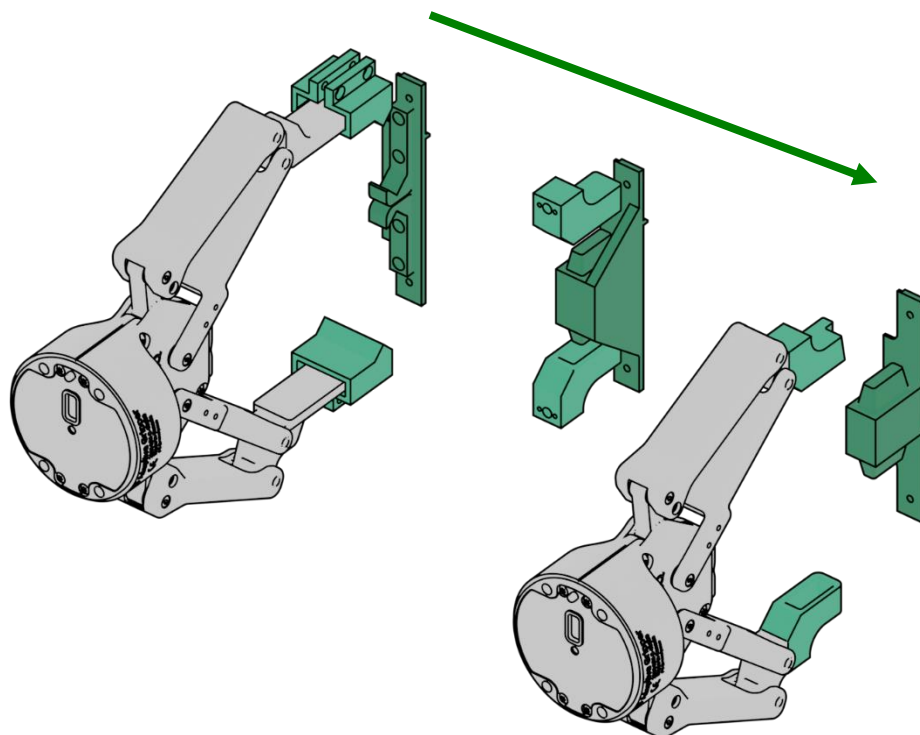


Abbildung 13: Schritte in der iterativen Entwicklung der Frontplattengeometrie und der zugehörigen Greiferbacken.

Zusätzlich zum Entwurf des Racks musste für das Greifen der Steckkarten ein geeigneter Greifer ausgewählt werden. Um die zuverlässige kraftbasierte Manipulation zu ermöglichen ist das Design der Greiferbacken und der Griffgeometrie an der Karte von besonderer Relevanz.

Aufgrund der einfachen Implementierung unter Reinraumbedingungen im AIT-Kontext und der simplen Integration in die restliche Roboterzelle wurde sich früh für die Nutzung eines elektromechanischen Greifers entschieden. Unter den Randbedingungen durch den Rackaufbau wurden diverse gängige Greifer evaluiert. Schlussendlich wurde der Robotiq 2F-140 ausgewählt, der neben einer sehr guten Softwareanbindung durch integrierte Sensorik vorgegebene Haltekräfte erzeugen und fehlgeschlagene Griffversuche erkennen kann.

Im Rahmen des Integrationsworkshop wurden auch die Anforderungen an die Handhabung und Manipulation der cPCI-Karten besprochen. Basierend auf diesen initialen Anforderungen wurden eine Reihe an Designs für Greiferbacken und Steckkarten-Frontplatten prototypisch iterativ entwickelt. Um dies zu ermöglichen wurden erste Designs kostengünstig und zeiteffektiv mit einem Prusa Mk3 FDM 3D-Druckern gefertigt, bevor spätere Versionen nach ersten Tests aus Aluminium gefertigt wurden.

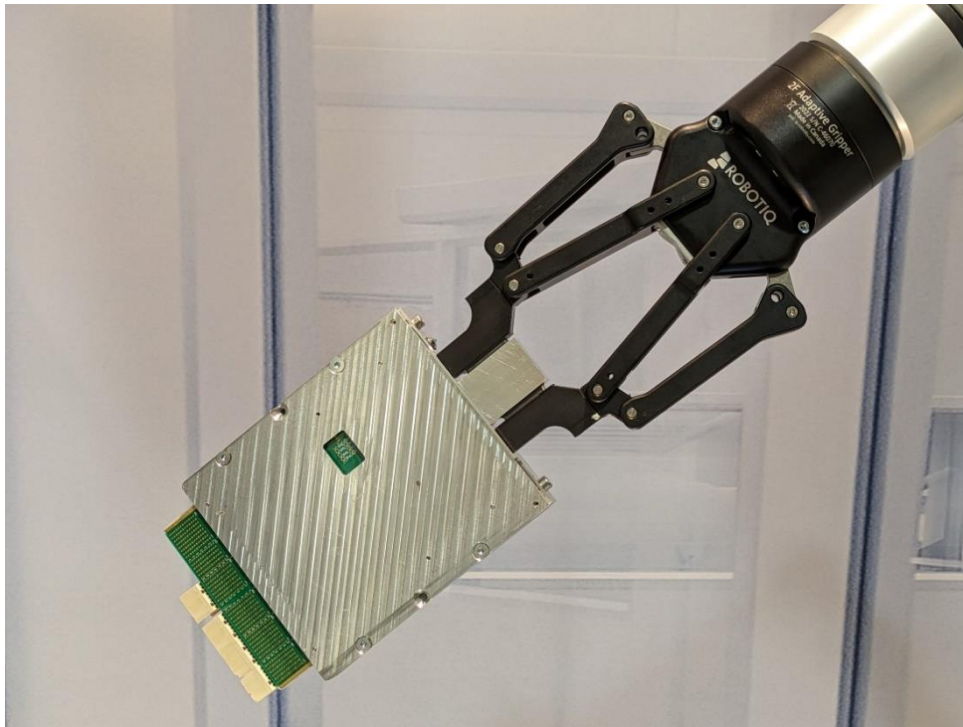


Abbildung 14: Nahaufnahme der Karte mit Gehäuse und Greiferkombination.

In Abbildung 13 sind Schnappschüsse aus der iterativen Entwicklung zu sehen: Nach einem initialen Design mit einem relativ keinen Angriffspunkt in der Mitte der Karte wurde eine Lösung für eine bessere Kraftübertragung mittels Formschluss erarbeitet. Die Greifer-



Abbildung 15: Finales Design des Demonstrators mit CompactPCI BÜchse und relativ dazu um 90° rotiertem Rack.

Halter Kombination wurde initial in einer FDM-optimierten Variante mit zusätzlichen Verstrebungen 3D gedruckt. Aufgrund der Parallelkinematik des gewählten Greifers musste die Greiferlänge in einer weiteren Iteration geändert werden, da sich die Backen sonst bei einem leeren Griff nach innen kippen konnten. Außerdem musste die Passgeometrie für die Form der Frontplatte angepasst werden, da die Backen sich nicht geradlinig bewegen und dies ohne Berücksichtigung zu Verklemmungen führen konnte. Schlussendlich mussten noch Aussparungen in die Backen aufgenommen werden, um nicht mit der in AP4 hinzugefügten LED in der Frontplatte zu kollidieren. Für die finale Fassung in Abbildung 14 wurde nun noch die zusätzliche Verstrebung für die bessere Druckbarkeit entfernt und die Frontplatte aus zwei Stücken aus Aluminium gefertigt.

Die abschließende Abbildung 15 zeigt nochmal den Aufbau, wie er im finalen Demonstrator mit fix definierten Positionen konstruiert wurde.

AP2 Automatisierte, kraftsensitive Tests der CompactPCI Karten

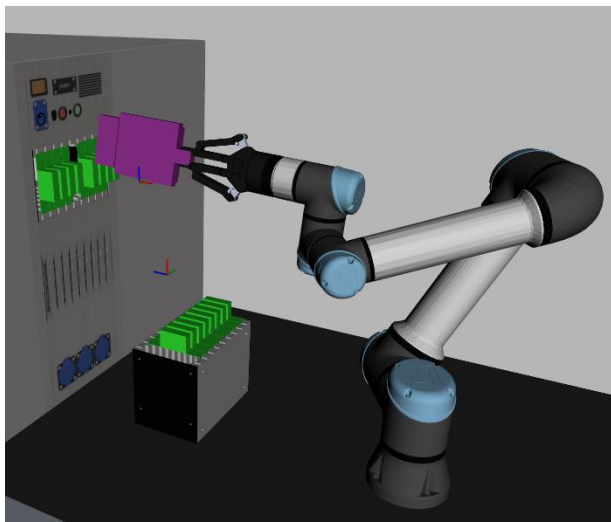
Zielsetzung:

Ziel des APs ist die Entwicklung der automatisierten, kraftsensitiven Tests mit hoher Zuverlässigkeit, Kollisionsschutz, fließenden Umschalten zwischen den benötigten Kraftfunktionen sowie Schnittstellen für die intuitive Programmierung.

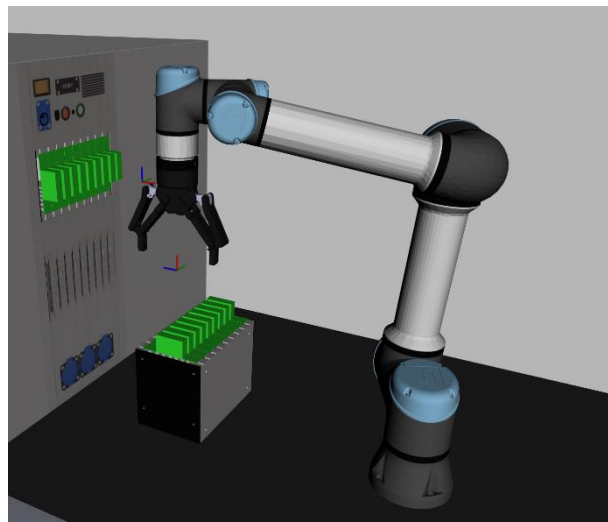
Ergebnisse:

Um komplette Testabläufe vollautomatisch ausführen zu können benötigt es zwei Hauptkomponenten für die Robotersteuerung: Eine kraftsensitive Manipulationsstrategie, die vor einem Steckplatz startend Karten einstecken bzw. herausziehen kann, und eine Trajektorienplanung, die kollisionsfreie Bewegungen zwischen Steckplätzen und Racks ermöglicht. In diesen AP fällt diese Trajektorienplanung sowie deren Einbindung in eine darüberliegende Prozessplanung und Ablaufsteuerung.

Die Basis der Trajektorienplanung ist der sampling-basierte *RRTConnect* Planer, der durch das *Movel* Framework genutzt wird. Zur Festlegung der Start- und Endpunkte der Trajektorien wird eine manuelle Kalibrierung genutzt. Um eine zuverlässige Planung zu gewährleisten, wird jede Trajektorie aus mehreren Teilen zusammengesetzt. Um das wiederholte Planen der gleichen Trajektorie und somit längere Verzögerungen während der Ausführung zu verhindern wird ein Datenbank-basierter Trajektorienpeicher genutzt.



Eine geplante Bewegung vom Slot 0 des unteren Racks zu Slot 4 des oberen. Die aktuell gegriffene Karte muss in der Planung berücksichtigt werden.



Die darauffolgende Bewegung zu Slot 1 des unteren Racks. Ohne gegriffene Karte muss keine zusätzliche Geometrie berücksichtigt werden.

Abbildung 16: Das für die Trajektorienplanung genutzte Umgebungsmodell. Neben der Roboter- und Teststandgeometrie werden die Griffe potentiell gesteckter Karten (grün) und bei Bedarf die aktuell gegriffene Karte (lila) berücksichtigt. Die kalibrierten Start- und Zielpunkte sind als Koordinatensysteme eingezeichnet.

Für die manuelle Kalibrierung muss die Testzelle einmalig von Hand mit einer 6D-Maus referenziert werden und der Greifer manuell je Steckplatz in zwei Posen gebracht werden: Eine direkt davor, in der der Greifer eine vollständig eingesteckte Karte greift, und eine weiter entfernte, in der eine gegriffene Karte knapp vor dem Eingang des Steckplatzes schwebt. Basierend auf der Ablaufsteuerung kann die jeweils relevante Pose als Start- und Zielpunkt gewählt werden, um sowohl Steck- als auch Entnahmeprozesse planen zu können. Die kalibrierten Posen werden auf dem Steuerrechner automatisch in einer Datei abgelegt und zur Planungszeit abgefragt.

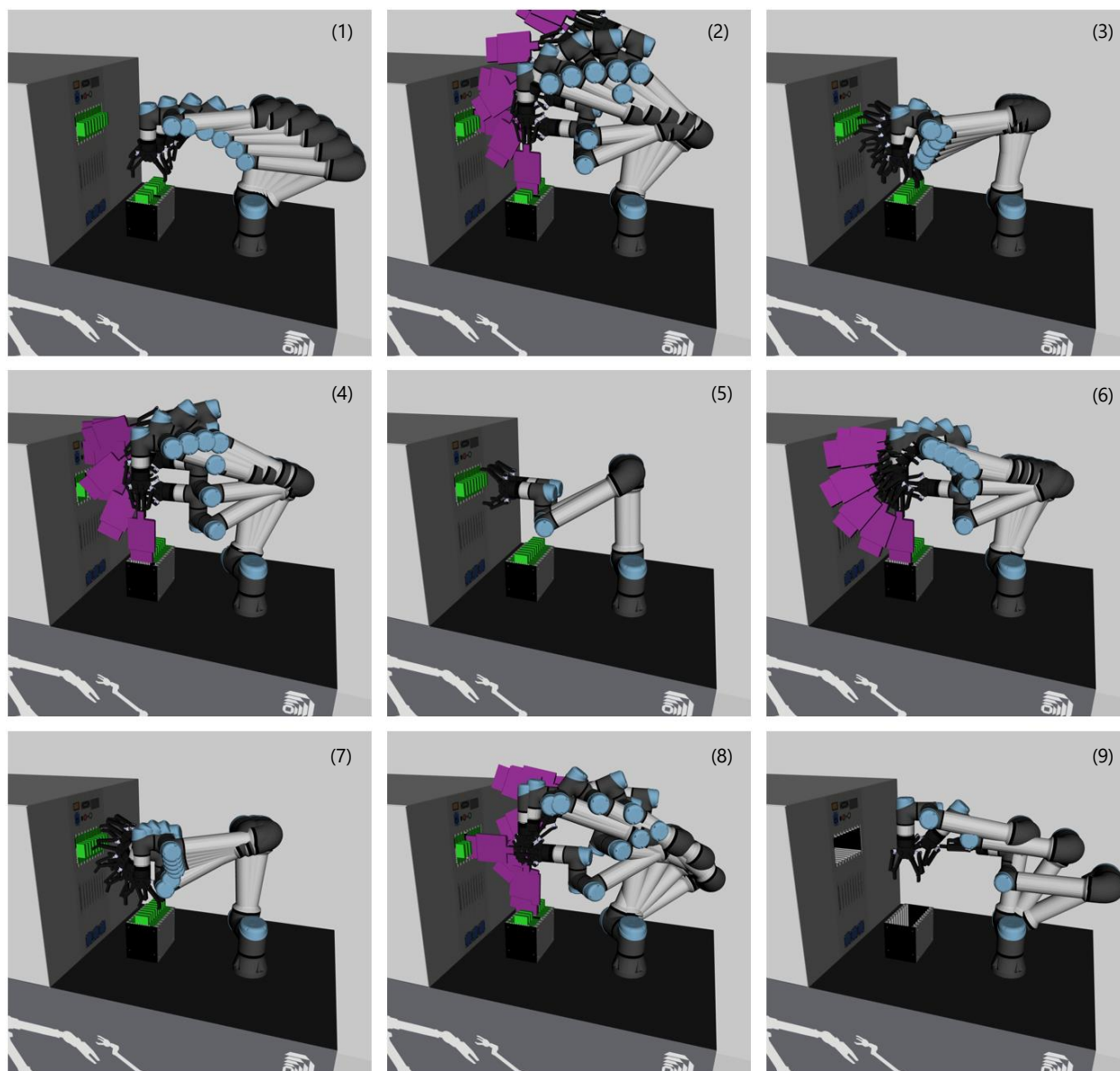


Abbildung 17: Geplante Trajektorien für einen Testablauf: (1) Bewegung von Ausgangsposition zu Slot 3 des Lagerracks, (2) Transport der Karte zu Slot 6 des Testracks, (3) Bewegung zu Slot 0 des Lagerracks, (4) Transport der Karte zu Slot 3 des Testracks, (5) Bewegung zu Slot 6, (6) Rücktransport der Karte zu Slot 0 des Lagerracks, (7) Bewegung zu Slot 3 des Testracks, (8) Rücktransport der Karte zu Slot 3 des Lagerracks, (9) Rückbewegung des Arms in Ausgangsposition.

Wird ein Planungsvorgang angestoßen, müssen die relevanten Start- und Endpunkte abgefragt und in Roboter Gelenkwinkelkonfigurationen überführt werden, auf deren Basis Trajektorien geplant werden können. Dies geschieht mithilfe der inversen Kinematik (IK) des Roboterarms. Da diese aber nicht eindeutig definiert ist und viele Roboterkonfigurationen einer Greifer Pose im Raum entsprechen, wurde eine Komponente zur Begrenzung der Gelenkwinkelgrenzen und Normierung der IK-Ergebnisse unter Berücksichtigung von Eigenkollisionen entwickelt.

Der sampling-basierte *RRTConnect* Planer ist prinzipiell in der Lage, zwischen den so generierten Konfigurationen effiziente kollisionsfreie Trajektorien zu planen. Da die Posen aber sehr nahe vor den Steckplätzen liegen und Teile der Karte sogar schon in den Steckplatz hineinragen kann dies aber sehr rechenaufwändig sein („Narrow Passage Problem“ [49]). Um dies zu vermeiden werden die Trajektorien aus drei Komponenten zusammengesetzt: Zuerst einem kartesischen Zurückfahren um 5cm, um auf ausreichend Abstand zu dem Test-Rack zu kommen, dann eine frei geplante Trajektorie bis 5cm vor der Ziel Pose, und schlussendlich eine kartesische Anfahrbewegung um die Karte nahe an das Rack zu bringen.

Die Trajektorienplanung muss neben Eigenkollisionen und Kollisionen mit der Umgebung auch andere Karten berücksichtigen, die potentiell gleichzeitig in danebenliegenden Steckplätzen eingesteckt sind. Da zur Planungszeit zwar der aktuelle Rack Zustand bekannt ist, aber die Trajektorie auch für spätere Abfragen weiter genutzt werden soll, wird in jeder Planungsphase davon ausgegangen, dass in allen nicht an der Trajektorie beteiligten Steckplätzen andere Karten gesteckt sind. Für beispielhafte Planungsanfragen ist die sich daraus ergebende Planungsszene in Abbildung 16 zu sehen.

Da sich das Layout und die Umgebung der Testzelle zur Ausführungszeit nicht ändern und die Testausführung nicht durch Planungspausen verlängert werden soll, wird jede Trajektorie nur maximal einmal geplant und danach in einer Datenbank abgelegt. Zum Start einer Testausführung wird somit zuerst geprüft, ob alle benötigten Trajektorien bereits in der Datenbank vorhanden sind, eventuell noch fehlende neu geplant und direkt dort abgelegt, und danach erst die Ausführung gestartet. Für die persistente Speicherung wird eine *SQLite* Datenbank auf dem Steuerrechner des Roboters genutzt.

In enger Absprache zwischen den Projektpartner FZI und Airbus wurde eine gemeinsame Kommunikationsarchitektur zur Definition und Ausführung von Testabläufen definiert

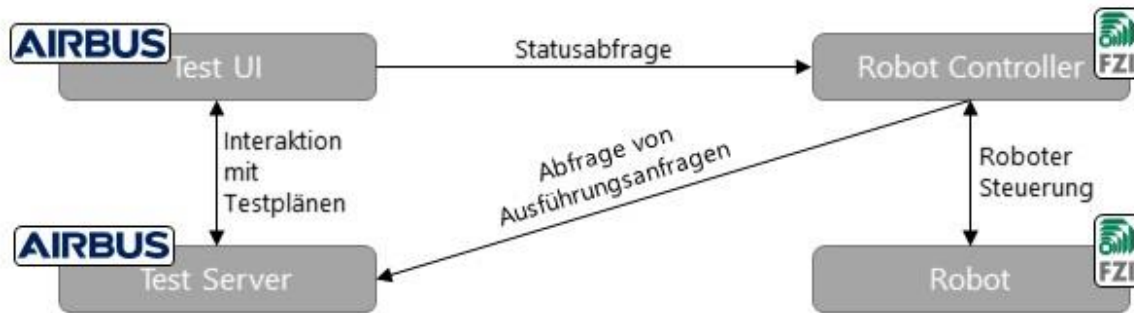


Abbildung 18: Schematische Darstellung der implementierten Kommunikationsarchitektur. Der zentrale *Test Server* verwaltet definierte Testabläufe und interagiert auf der einen Seite über die *Test UI* mit dem Anwender, und signalisiert auf der anderen Seite dem *Robot Controller* den Start eines Testlaufs.

und implementiert. Hierfür wurden vier relevante Bestandteile identifiziert, die in Abbildung 18 zu sehen sind.

Der zentrale Bestandteil der Architektur ist der *Test Server*, der gespeicherte Testabläufe vorhält und den Start eines Testablaufs signalisieren kann. Ein Endanwender kann über eine Webschnittstelle der *Test UI* mit ihm interagieren, um neue Testabläufe anzulegen oder bereits definierte Testabläufe zu starten. Der *Robot Controller* fragt den *Test Server* währenddessen periodisch an, bis ihm eine Ausführungsanfrage vorliegt. Diese verarbeitet er zuerst in eine interne ROS 2 basierte Darstellung, bevor er die zur Ausführung benötigten Trajektorien bei dem Trajektorien Speicher abfragt, bei Bedarf neu plant und dann die Ausführung mithilfe des Roboters startet. Während der Ausführung signalisiert der *Robot Controller* zum einen dem *Test Server* gegenüber den Fortschritt der Ausführung, und stellt der *Test UI* eine Schnittstelle zur Verfügung um aktuelle Zustandsinformationen dem Anwender darstellen zu können.

Durch die Wahl dieser Kommunikationsarchitektur entstehen weder große Kommunikationsbandbreiten noch Echtzeitanforderungen zwischen den Teilnehmern, weshalb eine Vielzahl an Kommunikationsschnittstellen eingesetzt werden könnten. Aufgrund der extrem guten Unterstützung durch Entwicklerwerkzeuge, einer Vielzahl an Implementierungen für verschiedene Umgebungen und der einfachen Einbindung in die Webtechnologien der *Test Server* und *Test UI* Komponenten wurde nach Sichtung gängiger Alternativen das http-basierte REST als Kommunikationsbasis gewählt.

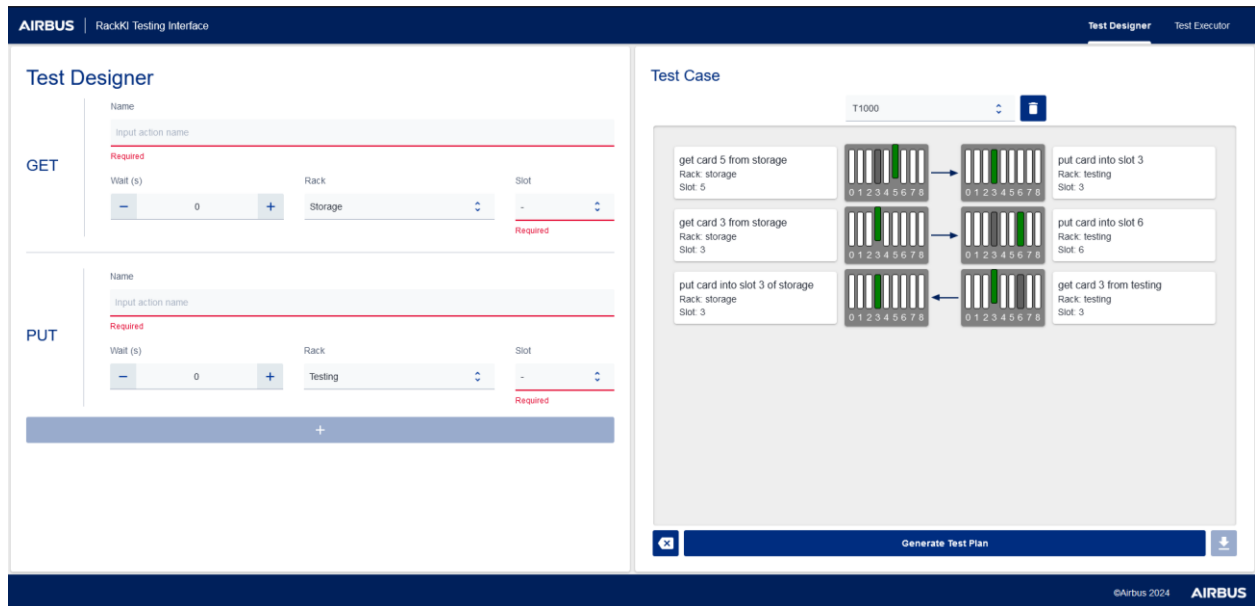


Abbildung 19: Planungskomponente für die Erstellung von Testplänen in der *Test UI*. Auf der linken Seite werden die Aktionen erstellt und dann in den Testablauf eingefügt. Dieser stellt grafisch dar, wie die Karten im Testaufbau gesteckt werden.

Die Testpläne und dazugehörigen Schritte werden im JSON-Format gespeichert und übertragen. Die gewählten Technologien erlauben damit eine einfache Integration der *Test UI* in bestehende, webbasierte Softwareentwicklungsumgebungen, wie sie bei Airbus im Einsatz sind. So erlaubt das Datenformat die Nutzung der Testpläne aus einem modellgetriebenen Entwicklungsansatz heraus, wie er in IDEA (Fördervorhaben im Luftfahrtforschungsprogramm) implementiert ist. Um Testpläne in diesem Format zu erstellen wurde eine web-basierte Planungskomponente entwickelt. Diese ist ein Teil der *Test UI* und in Abbildung 19 dargestellt.

Als Vorbereitung der kraftbasierten Regelung in AP3 implementierte und parametrisierte das FZI einen Kraftbasierten Regler auf Basis des FDCC [50] Konzepts und der vom FZI open-source veröffentlichten *cartesian_controllers*. Obwohl die Steuerung des UR-Roboters nur Kommandos in Form von Gelenkwinkelpositionen entgegennimmt, erlauben es diese Regler unter Nutzung einer Vorwärtsdynamiksimulation und Echtzeit-Optimierung von möglichen Bewegungsschritten die Messwerte des integrierten Kraft-Momenten-Sensors zu nutzen, um vorgegebene Kräfte und Drehmomente mit dem End-Effektor aufzubringen.

AP3 Intuitive Programmierung neuer AIT-Testvorgänge mittels KI Zielsetzung:

Ziel des APs ist die Entwicklung einer intuitiven, interaktiven Programmiermethode, die das einfache Einlernen neuer, kraftsensitiver und automatischer Test-Vorgänge (Aufnehmen, Einsetzen, Entfernen und Ablegen) ermöglicht und somit verhindert, dass der Reinraum bei der Entwicklung neuer Tests und Routinen betreten werden muss.

Ergebnisse:

Um das interaktive Einlernen kraftsensitiver Vorgänge im AIT-Kontext außerhalb des Reinraums zu ermöglichen wird ein Simulator benötigt, der Interaktionskräfte zwischen allen relevanten Komponenten mit einem hohen Grad an Genauigkeit vorhersagen kann. Nach Sichtung verbreiteter Roboter-Simulationssysteme wie Gazebo (vormals Ignition) und Gazebo Classic (vormals Gazebo) wurde die MuJoCo Physiksimulation als Grundlage ausgewählt, die insbesondere im Reinforcement-Learning Bereich aufgrund ihrer sehr guten Simulation von Reibung in Kontaktsituationen weit verbreitet ist. Auf dieser Basis wurde ein Simulationswerkzeug mit eigener Visualisierung und ROS-Anbindung entwickelt.

Nach mehreren Iterationsschritten stellt der Simulator nur ein vereinfachtes Handhabungsszenario dar, das sich auf den kompletten Testfall übertragen lässt. In diesem wird nur eine einzige Karte in einen einzigen Steckplatz eingeführt bzw. entnommen. Dabei können von außen durch einen Nutzer mit einer 6D SpaceMouse Kräfte und Drehmomente am Griff der Karte aufgebracht werden. Im Simulator führt dies zu Bewegungen der Karte und im Kontaktfall zu Interaktionskräften, die relativ zum

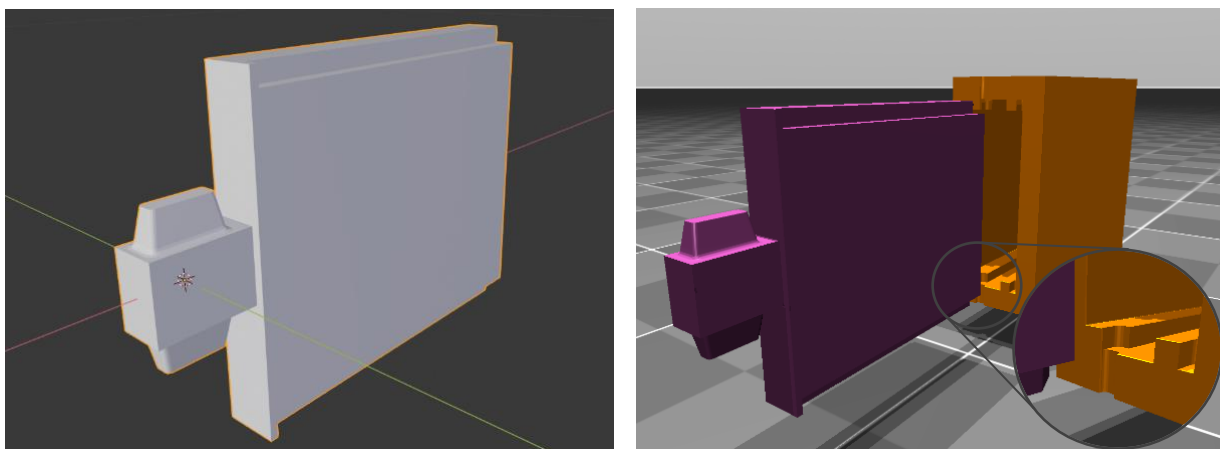


Abbildung 20 : Links: Das Kartenmodell wird in Blender für die Simulation in ein vereinfachtes Dreiecksnetz überführt. Rechts: Die Karte mit zugehörigen Rack-Slot in der MuJoCo-basierten Simulation. Der Eingang des Slots wird für die Einführbewegungen detailgetreuer modelliert als der Rest der Karte.

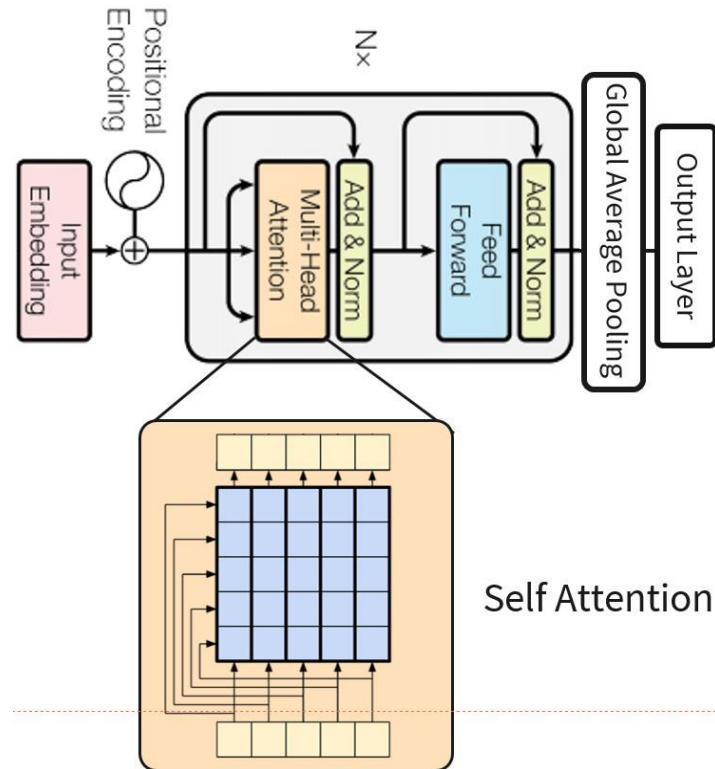


Abbildung 21: Die verwendete Netzarchitektur.

Kartengriff ausgegeben werden können. Der genutzte Roboterarm und seine Gelenkdynamik ist nicht Teil der Simulation.

Für die Simulation wurde auf Basis der CAD-Daten ein vereinfachtes Mesh-Modell der Karte und des Steckplatzes mit der *Blender* Software erstellt. Auch wenn der Detailgrad aus Gründen der Simulationsperformanz deutlich reduziert wurde, sind alle Komponenten im Kontakt (insbesondere die Führungsschienen, der Endanschlag und die Einschubgeometrie im Slot) exakt nachgestellt.

Die Regelstrategie arbeitet blind und erhält neben der aktuellen Zielposition aus der manuellen Kalibrierung nur die am Endeffektor durch den integrierten Kraft-Momenten-Sensor wahrgenommenen Kräfte und Drehmomente. Das interne Neuronale Netzwerk wertet diese mit 50Hz aus und erzeugt Kommandierte Kräfte und Drehmomente, die mit dem in AP2 erläuterten Kraftreglern mit 500Hz Regelfrequenz den Roboter ansteuern. Es wurden zwei verschiedene Netze trainiert, einer für den Einschub der Karte und einer für das Herausziehen.

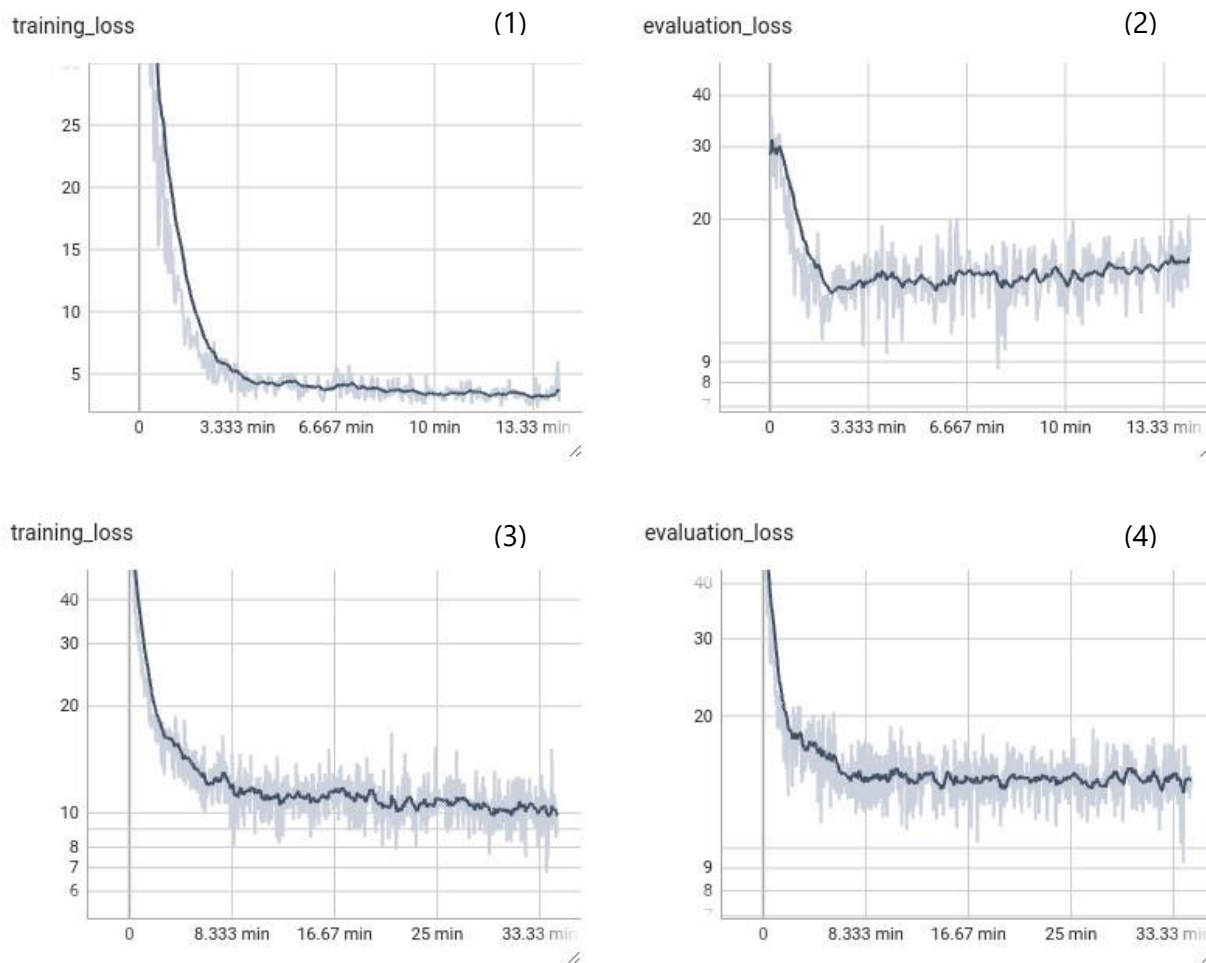


Abbildung 22: Loss-Verlauf des Reglers für das Herausziehen (1)(2) und das Einstecken (3)(4) auf den Trainings- und Evaluationsdatensätzen.

Die Architektur des verwendeten Reglernetzwerks ist in Abbildung 21 zu sehen und baut auf der Vorarbeiten zu LSTM-basierten Imitationslernen aus [51] auf. Als Eingang erhält das Netz eine Sequenz der letzten 30 Eingaben, die über ein Positional Encoding dargestellt werden. Statt eines LSTMs wird eine Transformerarchitektur mit Multi-Head Attention genutzt, die nach Normalisierung und Max-Pooling über ein fully-connected Layer auf das Ausgabeformat abgebildet wird. Das Netzwerk wird mit dem Adams-optimizer trainiert und nutzt den MSE-Loss. Das Netzwerk ist mit dem TensorFlow Framework für das Training in python implementiert. Für eine bessere Echtzeit-Performanz werden die gelernten Gewichte nach dem Training serialisiert und von der in C++ geschriebenen Regler Komponente auf Basis des *ros_control* Frameworks zum Start eingelesen. Die trainierten Netze sind klein genug um Inferenz und Training ohne GPU oder anderer Beschleuniger auf der CPU zu ermöglichen. Dies ermöglicht die Integration des Netzwerks im Echtzeitkontext.

Die Trainingsdaten wurden für beide Netze manuell erstellt, indem von Hand in Simulation die Karte mithilfe einer 6D-Mause wiederholt eingesteckt bzw. herausgezogen wurde. Dabei wurden die vorgegebenen Kräfte und Drehmomente, die Relativposition zum Ziel und die simulierten Kraft-Momenten-Sensor Werte als Datensatz aufgezeichnet. Der Skill zum Einstecken der Karte wurde mit ca. 1500 Aufzeichnungen trainiert, während der Skill zum Herausziehen bereits nach 850 Aufzeichnungen gute Ergebnisse zeigte. Die benötigten Daten konnten in zwischen drei und vier Stunden manuell erzeugt werden, das Training dauerte für die beiden Skills zwischen 15 und 35 Minuten. Da der Gesamtaufwand zum Trainieren eines Skills somit nicht sehr groß war wurde auf komplexe Datenaugmentierungsstrategien verzichtet. Die in Simulation trainierten Skills zeigten außerdem direkt sehr gute Performanz, weshalb auf ein Nachtrainieren durch Vormachen am Roboter verzichtet werden konnte. Da dies im AIT-Kontext im Reinraum sehr aufwändig wäre erhöht dies die Nutzbarkeit der Regler enorm.

Der KI-basierte Regler ist im Gesamt-Testablauf vollständig eingebunden. Als Teil einer Testausführung wird der Roboter zuerst vor der wie in AP2 beschriebenen kalibrierten Ausgangspose positioniert. Um die richtige Bewegungsrichtung vorzugeben wird nun die relevante kalibrierte Zielpose an den Regler übermittelt und der Greifer in die richtige Position gebracht. Da der integrierte Kraft-Momenten-Sensor nicht explizit für Gravitation korrigiert und mit der Zeit merklich driftet wird er außerdem vor dem Ausführen der Strategie genullt. Nach dem Start des Reglers wartet die Ablaufsteuerung darauf, dass der Regler zurückmeldet dass er ausreichend nahe an der Zielpose ist, bevor sie die Ausführung fortsetzen kann.

Abgesehen von der kraftbasierten Manipulation müssen zur Laufzeit auch Gelenkwinkeltrajektorien ausgeführt werden. Um die Geschwindigkeiten dafür zur Ausführungszeit vom Anwender festlegen und anpassen zu können, werden die in AP2 geplanten Trajektorien ausschließlich in ihrer geometrischen Form ohne Zeit- und Geschwindigkeitsvermerke abgelegt. Zur Bestimmung dieser Werte wird zur Laufzeit eine Zeitparametrisierung basierend auf dem *Time-Optimal Trajectory Generation* (TOTG) Ansatz durchgeführt, der unter Einhaltung von vorgegebenen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrenzen optimale Geschwindigkeitsprofile generieren kann. Um Pausen in der Ausführung des Testplans zu vermeiden, findet die Zeitparametrisierung parallel zur Testplanausführung statt.

AP4 Demonstration im AIT inklusive Integration und Evaluation

Zielsetzung:

In diesem AP werden Labortests mit der neu konzipierten Zelle am FZI durchgeführt. Anschließend wird die Zelle samt Rack, Roboter und KI-Software zu Airbus transferiert und unter realistischen AIT-Bedingungen evaluiert.

Ergebnisse:

Für die Durchführung von ersten Labortests wurde vom FZI das in AP1 entwickelte Rack zusammen mit einem Universal Robots UR5e Roboterarm und einem Robotiq 2F-140 2-Finger-Greifer in einer Roboterzelle integriert. Nach ausgiebigen Tests wurde entschieden, dass der in den Roboterarm integrierte Kraft-Momenten-Sensor ausreichend präzise ist und von der Integration des externen Sensors abgesehen werden kann. Im Aufbau ist ein zentraler Steuerrechner mit Echtzeit-Linuxkernel verbaut, der sowohl den Arm als auch den Greifer über open-source ROS 2 Treiber ansteuert. Zusätzlich zum Testrack ist ein weiteres Lagerrack montiert, um vollständige Testabläufe testen und evaluieren zu können.

Airbus implementierte eine Planungskomponente für Testabläufe. Die webbasierte *Test UI* ermöglicht einem Integrator (im Falle der Integration von On-Board Computer im Reinraum) oder einem Operator (im Falle von Wartungsaufgaben) die Ausführung der Steckvorgänge und deren Überwachung. Dazu bietet die Oberfläche drei verschiedene Teile: die Expertenansicht, den Robot Status und den eigentlichen Testablauf (siehe



Abbildung 23: Der verwendete Aufbau für erste Labortests und realitätsnahe AIT-ähnliche Remote-Testungen.

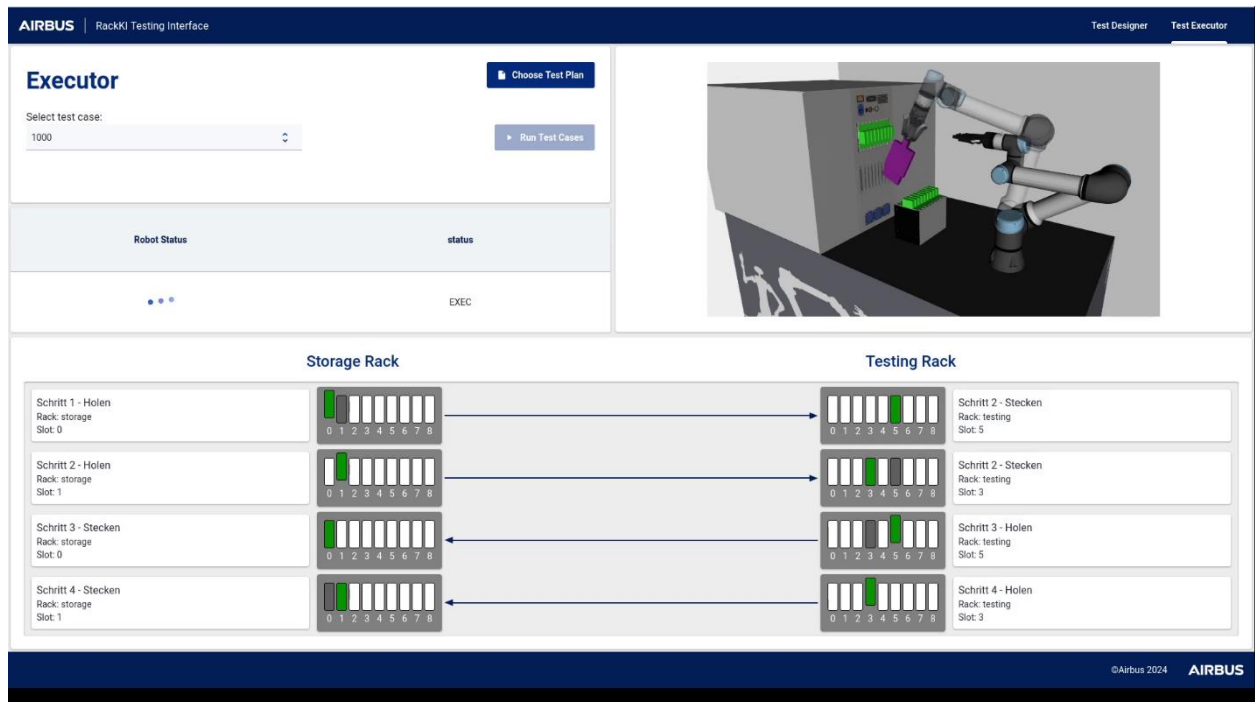


Abbildung 24: Die Web-basierte Testoberfläche inklusive der Expertenansicht in der oberen rechten Ecke. Zu sehen ist sowohl der aktuelle Roboterzustand (Roboter in Ausgangsposition) als auch ein Zwischenergebnis der aktuell laufenden Planung. Zur Laufzeit wird jede Trajektorie vor der Ausführung visualisiert und der aktuelle Fortschritt in der unteren Ablaufanzeige aktualisiert.

Abbildung 24). Der Robot Status kann vom *Test Server* mit beliebigen Statusinformationen geschrieben werden, der Austausch funktioniert auch hier per JSON. Die Expertenansicht zeigt den Roboterzustand. Im unteren Abschnitt werden alle Schritte für den aktuellen Testfall angezeigt. Auch zeigt die Darstellung wieder beide Racks und visualisiert den entsprechenden Vorgang durch die farbliche Markierung der genutzten Slots.

Die Expertenansicht ist über einen Video-Stream aus der ROS 2 Visualisierungssoftware *rviz2* implementiert. Dies ermöglicht die einfache Wiederverwendung bestehender Visualisierungskomponenten sowie eine einfache Nutzung im AIT-Kontext, da für die vollständige Nutzung der Plattform bereits ein Netzwerkzugang zu der *Test UI*, dem Robot Status und dem Videostream ausreicht. Eine mögliche Nutzung über einen VPN-Zugang in das Produktionssystem wurde bei der Endpräsentation demonstriert. Die Ansicht visualisiert während der gesamten Nutzung eine Ansicht der Testzelle sowie die aktuelle Konfiguration des Roboterarms und Greifers. Zusätzlich werden während der Planungsphasen die vollständige in AP 3 beschriebene Planungsumgebung inklusive zusätzlich zu berücksichtigender Hindernisse (Eventuell gegriffene Karte, Griffe anderer potentiell eingesteckter Karten) sowie die geplanten Trajektorien nach erfolgter Planung visualisiert. Wenn später eine Trajektorie ausgeführt wird, wird außerdem noch einmal die Trajektorie sowie die dazugehörige Planungsszene visualisiert, um Anwender bei Problemen in der Ausführung zu unterstützen. Die Visualisierung wurde primär durch das

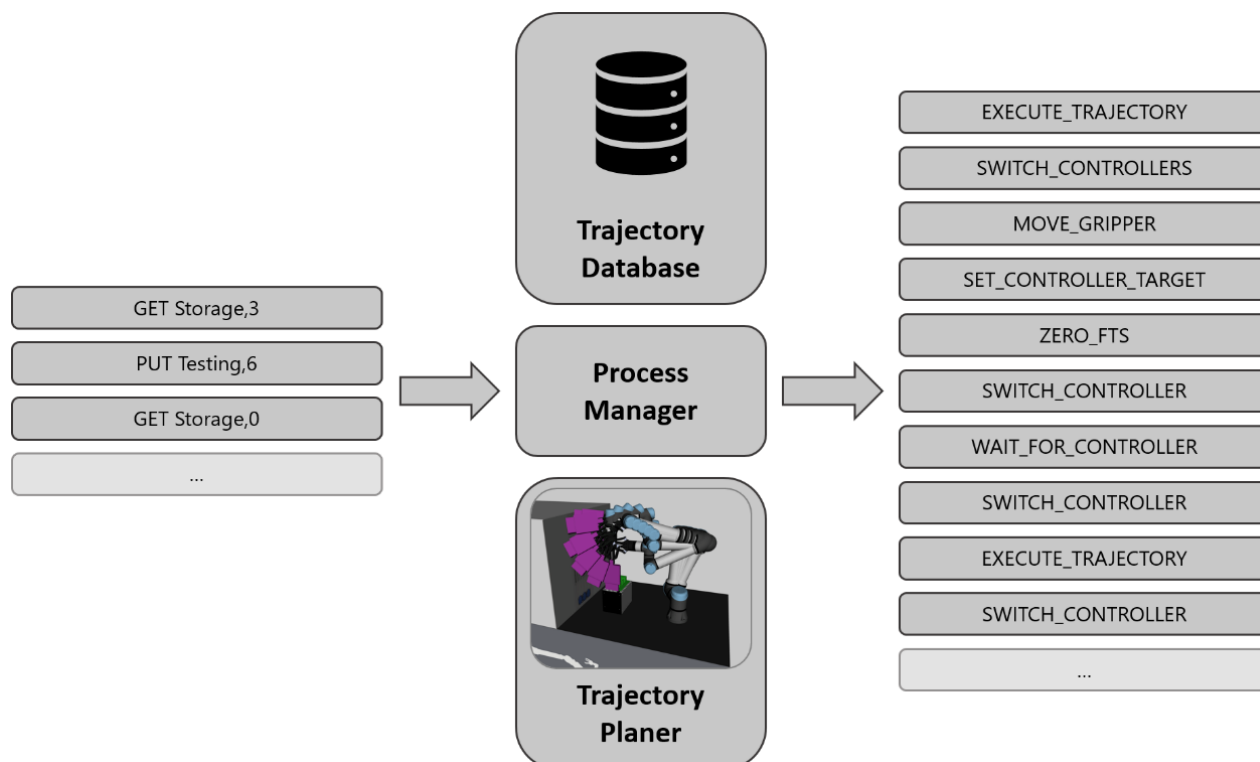


Abbildung 25: Zerlegung der Testspezifikation in atomare Ausführungsbefehle. Der *Process Manager* erhält die abstrakten Testabläufe über die REST-Schnittstelle, prüft noch benötigte Trajektorien im Trajektorienspeicher, plant noch benötigte Trajektorien und erzeugt einen feingranularen Ausführungsplan.

FZI entwickelt, während die Anbindung und Integration in die *Test UI* durch Airbus erfolgte.

Durch das FZI wurde für die Ausführung der erstellten Tests eine Verarbeitungspipeline entwickelt, die periodisch den *Test Server* kontaktiert und Verarbeitungsanfragen abfragt. Sobald ein Testablauf gestartet ist, zerlegt ein *Process Manager* den Testablauf in dafür benötigte atomare Schritte, die jeweils direkt auf dem Roboter ausgeführt werden können (siehe Abbildung 25). In diesem Schritt werden benötigte Trajektorien identifiziert, ihre Existenz im Trajektorienspeicher geprüft und nicht bereits geplante Trajektorien mithilfe des in AP2 entwickelten Trajektorienplaners neu geplant. Sobald die Prozessabfolge auf diese Weise vollständig aufgelöst wird, wird sie an eine Ausführungskomponente geschickt. Diese führt sie Schritt für Schritt aus, wobei sie den Fortschritt an den *Process Manager* zurückmeldet, der darauf basierend den Ausführungsfortschritt des Testplans bestimmt und dies über die REST-API an den *Test Server* zurückmeldet.

Für die finale Integration und Evaluation wurde in Abstimmung zwischen Airbus und FZI eine alternative Laborumgebung am FZI gewählt. Dadurch konnte Engpässen und einer schwierigen Planbarkeit der Reindräume bei Airbus bestmöglich begegnet werden. Die geplante autonome Gesamtausführung konnte trotzdem beibehalten werden. Um eine

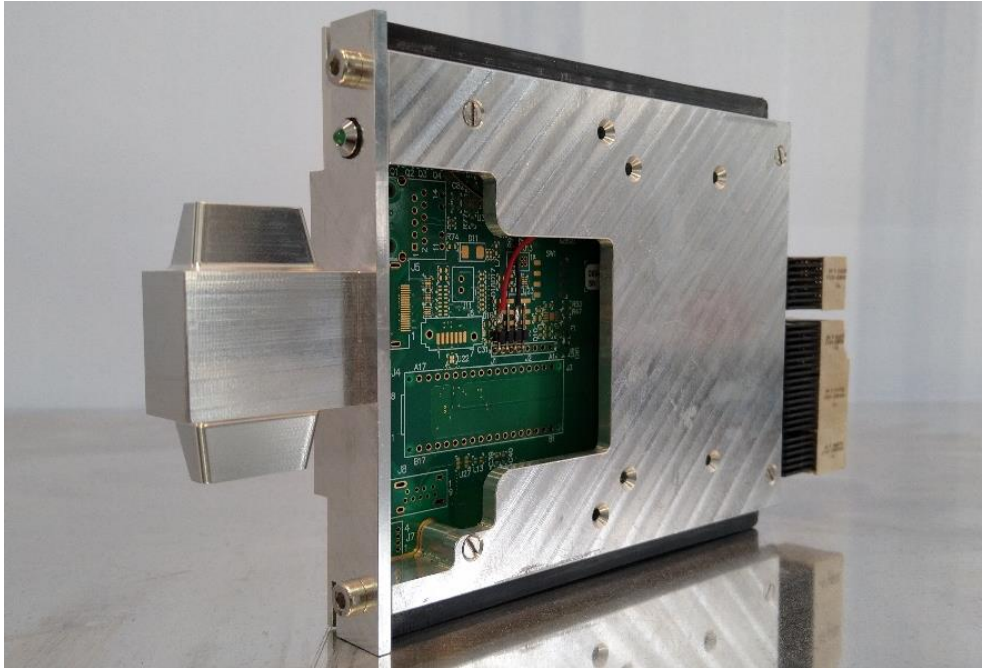


Abbildung 26: Eine der verwendeten Steckkarten mit modifizierter Frontplatte und eingebetteter LED zur Kontaktdetektion.

realitätsnahe Testung zu ermöglichen, wurde ein Konzept zur remote Testausführung ohne vor-Ort Eingriffe implementiert und im Rahmen der Abschlusspräsentation demonstriert. Dies ermöglicht eine Prüfung der Nutzbarkeit im AIT-ähnlichen Kontext, da genau wie unter Reinraumbedingungen die Testung ohne manuelle Intervention nach dem initialen Setup demonstriert werden konnte. Die dafür in AP2 entworfene Netzwerkarchitektur ermöglichte die Durchführung von Tests mit minimalen Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle, weshalb auch die Steuerung aus einem Kontrollraum oder einer anderen Fertigungsstätte möglich ist.

Für die Evaluation der Steckvorgänge wurden zunächst diverse Testabläufe manuell in der *Test UI* definiert und dann wiederholt in der Testzelle ausgeführt. Zusätzlich zur Funktion der Verarbeitungspipeline, der KI-basierten Regler und der Planungswerkzeuge für Testabläufe wurden die Steckkarten angepasst um ein vollständiges Einstecken ohne Schäden an den Kontakten zu prüfen. Dafür wurde eine LED in der Frontplatte angebracht, die direkt über die Steckkontakte aus der Backplane des Racks mit Strom versorgt wird. In wiederholten Testabläufen wurde die Karte zuverlässig vollständig eingesteckt, ohne dass Schäden an den Kontakten oder der restlichen Karte festgestellt werden konnte. Die Steckkarte mit allen Anpassungen ist in Abbildung 26 zu sehen.

Die demonstrierte remote Testausführung ermöglicht es Integratoren in einer integrierten Entwicklungsumgebung das Data Handling System bestehend aus Hardwarekomponenten und Softwarekomponenten zu beschreiben, direkt aus der

Umgebung per Fernsteuerung zu integrieren und zu testen. Das vereinfacht die Abläufe erheblich und ermöglicht den Ingenieuren automatisiert verschiedene Konfigurationen zu überprüfen, ohne manuell das System ändern zu müssen. Besonders für zukünftige Entwicklung von verteilten Onboard Software Systemen, die unterschiedliche Systemkonfigurationen unterstützen müssen, steigert das die Effizienz der Testaktivitäten erheblich. Die Möglichkeit einer integrierten Entwicklungs- und Testumgebung für Rack-basierte Data Handling Systeme ermöglicht außerdem Softwareentwicklern implementierte Software auf den spezifizierten Konfigurationen remote zu testen, ohne Artefakte an AIT-Ingenieure zu liefern und auf eine manuelle Integration und Tests zu warten. Das ergänzt den Workflow für Integration von Softwaresystemen, wie er von der SAVOIR-FAIRE Working Group der ESA spezifiziert ist [52].

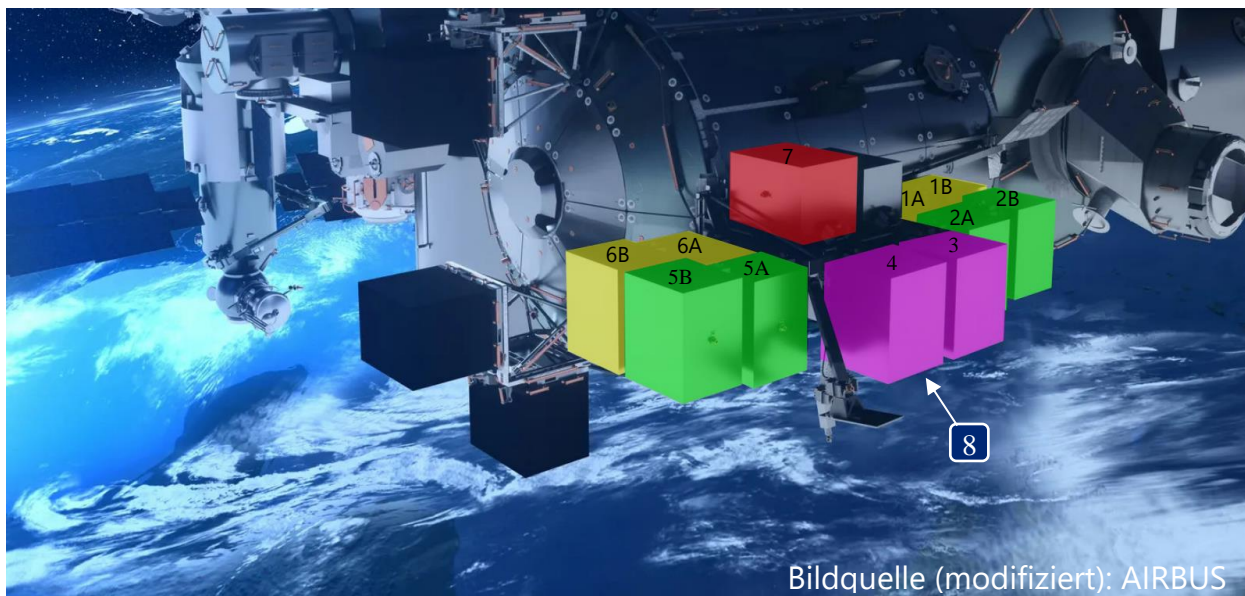
AP5 Roadmap für den Transfer vom AIT zum In-Orbit-Testing

Zielsetzung:

In einem gesonderten Bericht soll die 'Space-Readiness', das erreichte TRL im AIT und das Konzept für eine Entwicklung hin zur Inbetriebnahme auf der Bartolomeo Plattform untersucht werden.

Ergebnisse:

Die dargestellte Testzelle kann angepasst werden, um eine In-Orbit Demonstration (IOD) auf der Bartolomeo Plattform zu ermöglichen. Die Bartolomeo Plattform ist eine Außenplattform, welche am Columbus Modul der Internationalen Raumstation ISS montiert ist. Sie erlaubt einen kommerziellen Zugang zu Experimenten auf der Raumstation. Die oben beschriebene Testzelle ist allerdings bisher nur bedingt für eine In-Orbit Demonstration geeignet und es bedarf weiterer Maßnahmen.



Bildquelle (modifiziert): AIRBUS

Abbildung 27: Visualisierung der Bartolomeo-Plattform und nutzbarer Slots. Die roten Einzel-Slots 7 und 8 (auf der Unterseite) haben weder das Volumen noch die notwendige Stromversorgung für die Zelle. Die lila eingezeichneten Slots 3 und 4 können zwar jeweils ausreichend Leistung liefern, sind aber nicht als Double-Slot für die Zelle kombinierbar. Die gelben Double-Slots 1A/B und 6A/B sind zwar ausreichend groß, haben aber nicht die notwendige Stromversorgung. Die grünen Double-Slots 2A/B und 5A/B bieten sowohl genug Strom, haben ein ausreichendes Bauvolumen und sind für die Zelle prinzipiell nutzbar.

Die Testzelle findet aufgrund ihrer Abmessung und ihres Energiebedarfs in einem DOUBLE payload slot Platz [53] (siehe Abbildung 27). Dieser Slot ist $800 \times 1500 \times 1000 \text{ mm}^3$ groß und bietet 800W Leistung, was ausreichend ist für die Integration der Testzelle. Die genaue Position des Modules bezüglich des Sichtfeldes hingegen ist nicht relevant. Die Masse der Testzelle wie beschrieben beläuft sich auf unter 100 kg und ist damit kompatibel zur Anforderung der Bartolomeo Plattform mit bis zu 450kg Nutzlastgewicht.

Die entwickelte Kommunikationsarchitektur der Testzelle über TCP/IP kann auch auf der Bartolomeo Plattform verwendet werden. Anpassungen sind nur wenige notwendig, um die Anforderungen der Plattform an die Schnittstellen der Payload zu erfüllen. Da die Kommunikationsarchitektur keine Echtzeitverbindung oder hohe Bandbreiten benötigt, kann der demonstrierte Aufbau auf eine IOD übertragen werden.

Die allgemeinen Anforderungen an die Hardware können wie folgt aufgeteilt werden:

1. Strahlenbeständigkeit

Kosmische Strahlung und Sonnenstrahlung: Elektronische Komponenten (vor allem die Backplane) müssen gegen hochenergetische Partikel geschützt sein. Sowohl Redundanz als auch nachweisliche Fehlertoleranz sind erforderlich.

Strahlungshärtung: Im konventionellen Weltraumkontext mussten Komponenten „**rad-hard**“ ausgelegt sein, d.h., sie müssen spezielle Design- und Materialmaßnahmen umfassen, um den Auswirkungen der Strahlung zu widerstehen. Diese Maßnahmen gehen bis auf das Level der IC Schaltkreise und deren Speicherallokation mit der Reparatur beschädigter Speicherblöcke. Im „New Space“ Kontext ändert sich dieses Paradigma, indem stattdessen der Einfluss von Strahlung auf konventionelle Elektronik untersucht wird.

2. Temperaturbeständigkeit

Extreme Temperaturschwankungen: Hardware im Weltraum muss extremen Temperaturunterschieden standhalten, die von sehr kalt im Schatten bis sehr heiß in direktem Sonnenlicht reichen können. Um das Rack auf der Bartolomeo Plattform oder allgemein unter schwankenden Temperaturbedingungen zu betreiben, muss entweder die Bühse mit einer isolierenden und reflektierenden Schicht umgeben sein oder ein permanenter Schattenplatz gewährleistet werden.

Wenn extreme Temperaturschwankungen nicht eingeschränkt werden können, müssen eng tolerierte Komponenten mittels geeigneter Materialauswahl neu ausgelegt werden. Kritisch sind hierbei die Passungen der CompactPCI Karten in die jeweiligen Slots, die Passung der Greifer zu den Karten und die Maße des Roboters im Allgemeinen. Um kritische Schwankungen abzufedern kann dabei mit Invar und anderen Legierungen gearbeitet werden. Außerdem können die Kontakte zwischen Bühse und Karte gefedert sein und nicht wie in diesem Vorhaben rein formschlüssig im Flächenkontakt.

Thermische Kontrolle: Nicht nur durch die schwankenden Temperaturen aber auch vor allem durch die Abwärme und fehlende Konvektion benötigt der Aufbau ein System zur Wärmeableitung und -isolierung. Eine gängige Praxis ist die Fertigung von sogenannten ‚**conduction cooled**‘ Bauteilen bei denen alle Wärme-erzeugenden Komponenten über einen Wärmeleiter verbunden sind. Beispielsweise können CompactPCI Karten ihre Wärme über das Kartengehäuse an die Bühse und schlussendlich an das Gesamttrack abgeben. Anschließend muss im Rack selbst eine thermische Kontrolle die Abwärme an einen **Radiator** weiterleiten.

3. Vakuumbeständigkeit

Betrieb im Vakuum: Elektronische Komponenten und mechanische Systeme müssen im Vakuum funktionieren können, was bedeutet, dass Materialien keine Gase freisetzen dürfen (Outgassing), die zu Kontaminationen führen könnten. Dies ist vor allem in der Kommerziellen Robotik ein Problem, da viele Kunststoffe, Dichtungen und Gehäuse über die Zeit degradieren.

Schmierstoffe: Normale Schmierstoffe verdampfen im Vakuum. Daher werden spezielle Vakuum-kompatible Schmierstoffe oder Trockenbeschichtungen verwendet die es ermöglichen den Roboter im Vakuum zu betreiben. Im Gegensatz zum kommerziell genutzten UR10 in diesem Vorhaben muss der Roboter für eine In-Orbit Mission speziell entworfen werden. Ein einfacher Austausch von Komponenten und Schmierstoffen ist leider nicht möglich.

4. Mechanische Robustheit

Vibrationen und Schocks: Start- und Landemanöver erzeugen hohe Vibrationen und Schockbelastungen. Hardware muss so konstruiert sein, dass sie diese Belastungen ohne Schäden übersteht. Neben den elektronischen Komponenten, welche unter den Vibrationen beschädigt werden können, muss vor allem der Roboter ausgiebig getestet werden.

Strukturfestigkeit: Komponenten müssen aus leichten, aber sehr robusten Materialien bestehen, um die strukturellen Belastungen während der Mission zu bewältigen. Hier sollte bedacht werden, dass der Roboter im Orbit nicht mehr sein Eigengewicht tragen muss.

5. Stromversorgung

Energieeffizienz: Energie ist im Weltraum begrenzt, daher müssen Systeme äußerst energieeffizient arbeiten. Dieser Punkt bestimmt auch im Konkreten Beispiel weiter oben welche Slots auf der Bartolomeo Plattform überhaupt genutzt werden können. Ziel einer Neuentwicklung der Roboter-Rack Kombination sollte auch eine verbesserte Effizienz sein.

6. Fehlertoleranz und Redundanz

Automatische Fehlertoleranz: Systeme müssen in der Lage sein, Fehler zu erkennen und sich selbstständig zu korrigieren. Nicht nur die Vermeidung von Fehlern, sondern auch die Fehlerkorrektur sollte dabei im Vordergrund stehen. Ein Beispiel könnte das Verkeilen einer Karte im Rack sein. Es müssen sowohl Fehler auf Ebene der Elektronik erkannt werden (Wackelkontakte und Lötstellen) als auch auf mechanischer Ebene (Verkeilung, Kollision mit Karten).

Redundanz: Kritische Systeme und Komponenten sind oft mehrfach vorhanden, um im Falle eines Ausfalls eine Alternative zu haben. Eine wichtige Vorgabe ist die doppelte Belegung des Racks, da ein Ausfall eines Backpanels die gesamte Testroutine stoppt. Ein zweites Rack ermöglicht es weiter zu testen oder zumindest bestehende Tests abzuschließen bis eine Reparatur durchgeführt werden kann.

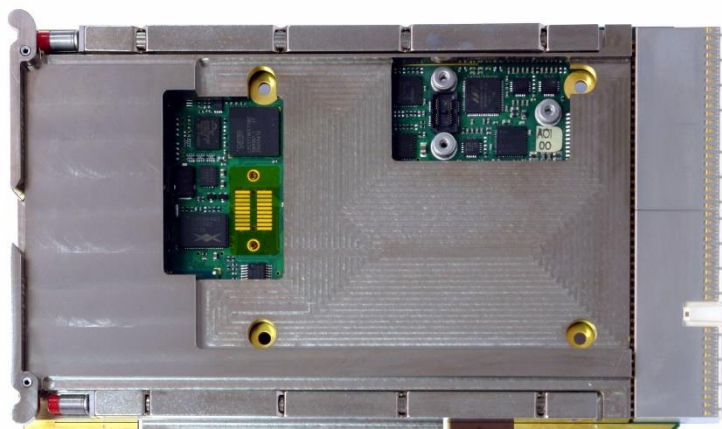


Abbildung 28 CompactPCI Karte (3U) mit einem conduction-cooled Gehäuse, bei dem kritische Komponenten im direkten Kontakt sind. Über die geteilten Flächen am oberen und unteren Ende der Karte wird die Wärme an das Rack weitergeleitet. (Quelle: Concurrent Technologies)

7. Langzeitzuverlässigkeit

Langlebigkeit und Wartungsfreiheit: Da Wartung im Weltraum schwierig und teuer ist, müssen die Systeme so konstruiert sein, dass sie möglichst wartungsfrei arbeiten. Für elektronische Komponenten die rad-hard entwickelt wurden ist dies weniger ein Problem als für bewegliche Roboter, deren Gelenke konstant beansprucht werden und Schmiermittel nicht einfach ausgetauscht werden kann.

Aus den oben genannten Anforderungen an die Hardware wurden Maßnahmen abgeleitet, die als Empfehlungen für die Fortführung des Vorhabens im Orbit zu verstehen sind. Entsprechend sind die einzelnen Komponenten des Racks mit nötigen Designänderungen aufgelistet:

- **CompactPCI Karten, Backpanel und Elektronik im Allgemeinen:** Für die flight-readiness müssen alle elektronischen Komponenten in exponierter Lage eine ausreichende Strahlungshärte aufweisen. Das Erreichen der Strahlungshärte ist für die Karten und Backpanels kein Problem, da diese bereits in der kommerziellen Raumfahrt genutzt werden. Alle robotischen Komponenten jedoch (Controllerboards, PCUs) müssen entweder im Nachhinein zertifiziert werden oder direkt mit erhältlicher Space-Hardware entwickelt werden. Hier ist das Problem, dass die Performance der Elektronik deutlich unter der Aktuellen im Vorhaben liegt.

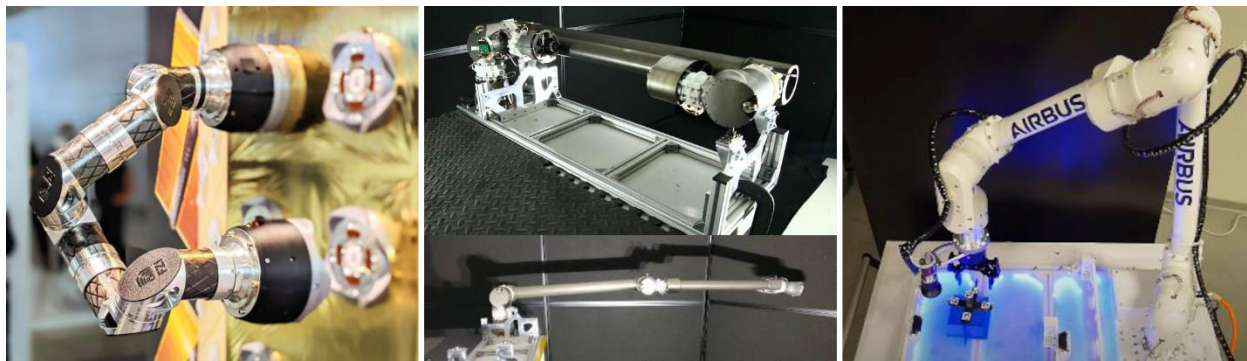


Abbildung 29: Von den Projektpartnern bereits in anderen Projekten entwickelte Roboterarme für IOD Anwendungen: (1) Der vom FZI in den Projekten ReCoBot und ReCoBot2 entwickelte Roboterarm, (2) Der von Airbus entwickelte LARAD [112] Roboterarm und sein Nachfolger (3) VISPA [113].

- **Gehäuse und Büchse:** Die thermische Regelung der Hardware muss vor allem durch ein Neudesign der Karten und Büchsen umgesetzt werden. Die aktuelle Konstruktion bietet keine Kontaktpunkte zu wärmeerzeugenden Teilen oder Adapter für Heatpipes. Eine thermische Analyse aller Komponenten ist für eine Weiterentwicklung zwingend notwendig. Dabei muss auch bedacht werden, dass ein neu entwickelter Roboter auch thermisch untersucht werden muss.
- **Passungen und Toleranzen:** Obwohl die in RackKI gezeigten Methoden leichte Änderungen in den Passungen abfedern kann, so muss trotzdem gewährleistet sein, dass die Karten beispielsweise bei einer deutlichen kälteren Büchse immer noch hineinpassen.
- **Robotersystem:** Der aktuell genutzte UR Roboter ist nicht für den Betrieb unter Weltraumbedingungen ausgelegt. Ein geeignetes System muss erst noch entwickelt werden. Wichtig ist hier, dass der neue Roboter nicht zwingend dieselbe Größe und Traglast wie der UR aufweisen muss. Ein neues Robotersystem kann an den Bauraum der Bartolomeo Plattform und des Racks angepasst werden. Beide Projektpartner haben bereits im Rahmen anderer Forschungsprojekte an Robotersystemen für IOD-Anwendungen gearbeitet, die hierfür eine Grundlage liefern können. Diese sind in Abbildung 29 zu sehen.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Förderung des Vorhabens ermöglichte die Entwicklung KI-basierter Ansätze für die Integration von Avionik-Racks, was aufgrund der hohen technischen und wissenschaftlichen Risiken sonst nicht oder nur in einem deutlich längeren Zeitrahmen möglich gewesen wären. Die entwickelten Technologien können Integrationszeiten für Satelliten deutlich verkürzen und sind notwendige Vorarbeiten für die automatische Wartung im Orbit bei Langzeitmissionen. Darüber hinaus sind einige der erarbeiteten

Verfahren und Softwarekomponenten auch über den spezifischen Anwendungsfall hinaus hochrelevant, insbesondere in Produktions- und Montageprozessen in denen bestehende robotische Automatisierungslösungen nicht die benötigte Präzision und Feinfühligkeit haben.

2.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Entwicklungen im Vorhaben RackKI haben eine Grundlage für Weiterentwicklungen in verschiedenen Domänen gelegt. Die entwickelten KI-Basierten Handhabungsstrategien und die Erkenntnisse aus AP5 zur Nutzung im nicht-terrestrischen Umfeld sollen im Rahmen des beantragten Folgeprojekts OBC-SA 4 weiterentwickelt werden und die Nutzung mobiler Plattformen für das Servicing unter großen Unsicherheiten erlauben. Der KI-basierte Handhabungsansatz ist weit über den Avionik Anwendungsfall hinaus nutzbar und hat unter anderem in der generellen Montage und Produktion viele potentielle Anwendungsgebiete. Das FZI untersucht diese bereits im Rahmen weiterer Projekte, insbesondere wird angestrebt die Regelstrategie im derzeit laufenden Projekt GANResilRob für die Montage und Demontage weiterentwickelt und in einem breiteren Kontext zu nutzen.

Die implementierte und demonstrierte Testausführung für Rack-basierte Systeme birgt in der Integration modularer Data Handling Systeme für Satelliten einen großen Vorteil für Airbus. Im Rahmen des beantragten Folgeprojektes soll die entwickelte Testumgebung nicht nur für die ferngesteuerte Ausführung der Steckvorgänge genutzt werden, sondern um Elemente für die Validierung der Softwarekomponenten erweitert werden. Damit kann nach einem Steckvorgang die Ausführung der installierten Software und die Kommunikation zwischen den Komponenten automatisch und/oder per remote Ausführung geprüft werden, um einen einheitlichen Ansatz für die Integration zu bieten.

2.4 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurde im Laufe des Vorhabens kein Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt.

2.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts wurde das folgende Paper veröffentlicht:

- Scherzinger et al. „*Learning Human-Inspired Force Strategies for Robotic Assembly*“ CASE 2023

Nach dem Projektende wird eine aktuell eine Veröffentlichung der Ergebnisse auf der DASIA 2025 Konferenz geplant. Darüber hinaus strebt das FZI die Einreichung einer Veröffentlichung der erarbeiteten Kraftregelstrategie auf einer führenden internationalen Robotik-Fachtagung an.

3. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] N. Möller, Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme, Bd. 212, Herbert Utz Verlag, 2008.
- [2] H.-P. Wiendahl, J. Reichardt und P. Nyhuis, Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.
- [3] H.-P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H.-H. Wiendahl, N. Duffie und M. Brieke, „Changeable manufacturing-classification, design and operation,“ in *al. "Changeable manufacturing-classification, design and operation."*, 2007.
- [4] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. t. Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1: Produktion, Springer-Verlag, 2016.
- [5] P. Greschke, M. Schönemann, S. Thiede und C. Herrmann, „Matrix structures for high volumes and flexibility in production systems,“ in *Procedia CIRP*, 2014.
- [6] M. Krä, S. Hörbrand und J. Schilp, „Dynamic production control for flexibility in Cyber-Physical Production Systems using an autonomous transport system,“ in *Procedia CIRP*, 2019.
- [7] M. Schönemann, C. Herrmann, P. Greschke und S. Thiede, „Simulation of matrix-structured manufacturing systems,“ in *Journal of Manufacturing Systems*, 2015.
- [8] T. Gaspar, B. Ridge, R. Bevec, M. Bem, I. Kovač, A. Ude und Ž. Gosar, „Rapid hardware and software reconfiguration in a robotic workcell,“ in *18th International conference on advanced robotics (ICAR)*, 2017.
- [9] S. Angerer, R. Pooley und R. Aylett, „Self-reconfiguration of industrial mobile robots,“ in *Fourth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, 2010.
- [10] M. Fujita, H. Kitano und K. Kageyama, „A reconfigurable robot platform,“ in *Robotics and autonomous Systems*, 1999.
- [11] P. Tsarouchi, A.-S. Matthaïakis, S. Makris und G. Chryssolouris, „On a human-robot collaboration in an assembly cell,“ in *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017.
- [12] M. Merdan, M. Vallee, W. Lepuschitz und A. Zoitl, „Monitoring and diagnostics of industrial systems using automation agents,“ in *International journal of production research*, 2011.
- [13] N. Hogan, „Impedance control - An approach to manipulation. I - Theory. II - Implementation. III - Applications,“ *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control B*, Bd. 107, pp. 1-24, #mar# 1985.
- [14] C. Ott, R. Mukherjee und Y. Nakamura, „Unified impedance and admittance control,“ in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, 2010.
- [15] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppel, A. Albu-Schäffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald und others, „The KUKA-DLR Lightweight Robot arm-a new reference platform for robotics research and manufacturing,“ in *Robotics (ISR), 2010 41st international symposium on and 2010 6th German conference on robotics (ROBOTIK)*, 2010.

- [16] S. Haddadin, A. De Luca und A. Albu-Schäffer, „Robot Collisions: A Survey on Detection, Isolation, and Identification,” *IEEE Transactions on Robotics*, Bd. 33, Nr. 6, pp. 1292-1312, 2017.
- [17] A. Stemmer, A. Albu-Schäffer und G. Hirzinger, „An Analytical Method for the Planning of Robust Assembly Tasks of Complex Shaped Planar Parts,” in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, 2007.
- [18] B. Hannaford und J.-H. Ryu, „Time-domain passivity control of haptic interfaces,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Bd. 18, Nr. 1, pp. 1-10, 2002.
- [19] A. Albu-Schäffer, C. Ott und G. Hirzinger, „A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots,” *The international journal of robotics research*, Bd. 26, Nr. 1, pp. 23-39, 2007.
- [20] A. Coelho, C. Ott, H. Singh, F. Lizarralde und K. Kondak, „Multi-DoF Time Domain Passivity Approach Based Drift Compensation for Telemanipulation,” in *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2019.
- [21] K. K. S. Oh, „High-Precision Robust Force Control of a Series Elastic Actuator,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Bd. 22, pp. 71-80, 2017.
- [22] R. Featherstone, *Rigid body dynamics algorithms*, Springer, 2008.
- [23] A. Ellery, „Tutorial review on space manipulators for space debris mitigation,” *Robotics*, Bd. 8, Nr. 2, p. 34, 2019.
- [24] I. A. Sucas, M. Moll und L. E. Kavraki, „The Open Motion Planning Library,” *{IEEE} Robotics & Automation Magazine*, Bd. 19, Nr. 4, pp. 72-82, December 2012.
- [25] F. Wirnshofer, P. S. Schmitt, W. Feiten, G. v. Wichert und W. Burgard, „Robust, compliant assembly via optimal belief space planning,” *arXiv preprint arXiv:1811.03904*, 2018.
- [26] M. Kalakrishnan, S. Chitta, E. Theodorou, P. Pastor und S. Schaal, „STOMP: Stochastic trajectory optimization for motion planning,” in *2011 IEEE international conference on robotics and automation*, 2011.
- [27] R. Hodson, „A gripping problem: Designing machines that can grasp and manipulate objects with anything approaching human levels of dexterity is first on the todo list for robotics,” in *Nature*, 2018.
- [28] D. Kalashnikov, A. Irpan, P. Pastor, J. Ibarz, A. Herzog, E. Jang, D. Quillen, E. Holly, M. Kalakrishnan, V. Vanhoucke und weitere, „QT-Opt: Scalable Deep Reinforcement Learning for Vision-Based Robotic Manipulation,” in *Conference on Robot Learning (CoRL)*, 2018.
- [29] S. Levine, P. Pastor, A. Krizhevsky und D. Quillen, „Learning Hand-Eye Coordination for Robotic Grasping with Deep Learning and Large-Scale Data Collection,” in *International Symposium on Experimental Robotics (ISER)*, 2016.
- [30] L. Berscheid, T. Rühr und T. Kröger, „Improving Data Efficiency of Self-supervised Learning for Robot Grasping,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019.
- [31] K. Kleeberger und M. F. Huber, „Single Shot 6D Object Pose Estimation,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020.

- [32] K. Kleeberger, C. Landgraf und M. F. Huber, „Large-Scale 6D Object Pose Estimation Dataset for Industrial Bin-Picking,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019.
- [33] K. Kleeberger, M. Völk, M. Moosmann, E. Thiessenhusen, F. Roth, R. Bormann und M. F. Huber, „Transferring Experience from Simulation to the Real World for Precise Pick-And-Place Tasks in Highly Cluttered Scenes,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020.
- [34] M. Moosmann, F. Spennath, K. Kleeberger, M. U. Khalid, M. Mönning, J. Rosport und R. Bormann, „Increasing the Robustness of Random Bin Picking by Avoiding Grasps of Entangled Workpieces,“ in *CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP CMS)*, 2020.
- [35] K. Bousmalis, A. Irpan, P. Wohlhart, Y. Bai, M. Kelcey, M. Kalakrishnan, L. Downs, J. Ibarz, P. Pastor, K. Konolige und weitere, „Using Simulation and Domain Adaptation to Improve Efficiency of Deep Robotic Grasping,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018.
- [36] J. Tobin, R. Fong, A. Ray, J. Schneider, W. Zaremba und P. Abbeel, „Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017.
- [37] „FRANKA EMIKA Firmenwebseite,“ [Online]. Available: <https://www.franka.de/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [38] „Rethink Robotics Firmenwebseite,“ [Online]. Available: <https://www.rethinkrobotics.com/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [39] „universal robots Firmenwebseite,“ [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [40] „drag&bot Firmenwebseite,“ [Online]. Available: <https://dragandbot.com/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [41] „ArtiMinds Firmenwebseite,“ [Online]. Available: <https://www.artiminds.com/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [42] „Danish Technological Institute: Robot Co-Worker for Assembly,“ [Online]. Available: <https://www.dti.dk/specialists/robot-co-worker-for-assembly/32733>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [43] „xamla robotic solutions: ROSVITA - fast and intuitive robot programming based on ROS,“ [Online]. Available: <http://xamla.com/en/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [44] „wandelbots Firmenwebseite,“ [Online]. Available: <https://www.wandelbots.com/>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [45] „fordiac: Open Source PLC Framework for Industrial Automation & Control,“ [Online]. Available: <http://www.fordiac.org>. [Zugriff am 15 September 2020].
- [46] L. Wang, G. Adamson, M. Holm und P. Moore, „A review of function blocks for process planning and control of manufacturing equipment,“ in *Journal of manufacturing systems*, 2012.
- [47] J. Michniewicz, G. Reinhart und S. Boschert, „CAD-Based Automated Assembly Planning for Variable Products in Modular Production Systems,“ in *Procedia CIRP*, 2016.

- [48] L. D. Xu, C. Wang, Z. Bi und J. Yu, „AutoAssem: An Automated Assembly Planning System for Complex Products,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012.
- [49] T. Yoshikawa, „Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms,” *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1004-1009, 1985.
- [50] S. Scherzinger, A. Roennau und R. Dillmann, „Forward Dynamics Compliance Control (FDCC): A new approach to cartesian compliance for robotic manipulators,” in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017.
- [51] S. Scherzinger, A. Roennau und R. Dillmann, „Contact Skill Imitation Learning for Robot-Independent Assembly Programming,” in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019.
- [52] S.-F. W. Group, „[SAVOIR-TN-002] SAVOIR Onboard Software Reference Architecture,” 15 11 2021. [Online]. Available: <https://essr.esa.int/project/savoir/link/12>. [Zugriff am 20 06 2024].
- [53] „Bartolomeo,” Airbus Defence and Space, 2024. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/products-services/space/in-space-infrastructure/bartolomeo>. [Zugriff am 12 06 2024].
- [54] E. Allouis, R. Marc, M. Ruciński, M. Garland, D. Lachat, M. Shilton, G. Gajoch, A. Kisdi, W. Tubby, J. Hampton, M. Woods, M. Malinowski, S. Flitcroft, R. Durman und L. Tyler, „LARAD – ARCHITECTURE AND IMPLEMENTATION OF A LIGHTWEIGHT ADVANCED ROBOTIC ARM DEMONSTRATOR FOR FUTURE SPACE AND PLANETARY APPLICATIONS,” in *ASTRA*, 2017.
- [55] E. Allouis, M. Shilton, M. Garlan, D. Paganini, C. Meringolo und C. Hackett, „THE VISPA ROBOTIC MANIPULATOR-A VERSATILE IN-SPACE AND PLANETARY ARM TO SUPPORT A NEW SPACE ECOSYSTEM,” in *ASTRA*, 2023.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN ---	2. Berichtsart Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Schlussbericht des Vorhabens RackKI des FZI Mit Anlagen: Erfolgskontrollbericht, Berichtblatt zum Schlussbericht	
3b. Titel der Publikation ---	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Wilbrandt, Robert; Scherzinger, Stefan; Wanninger, Sascha; Heppner, Georg	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.11.2023
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) ---	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2024
	7. Form der Publikation ---
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Str. 10-14, 76131 Karlsruhe	9. Ber.Nr. Durchführende Institution ---
	10. Förderkennzeichen 50RA2128
	11a. Seitenzahl Bericht 47
	11b. Seitenzahl Publikation ---
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	12. Literaturangaben 55
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 29
16. Zusätzliche Angaben ---	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) ---	
18. Kurzfassung Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines KI-gestützten Systems zur automatischen Integration und Testung von modularen OBC-Modulen mit CompactPCI (cPCI) Schnittstelle in Avionik-Racks. Hierfür wurde eine Roboterzelle entworfen und optimiert, ein kraftbasierter Regler auf Basis menschlicher Demonstrationen in Simulation entwickelt, eine offline-Trajektorienplanung für die effiziente Testausführung implementiert und das Gesamtsystem in einem neuen Planungssystem für Testabläufe integriert. Neben der Evaluation im AIT-Kontext wurde eine perspektivische Nutzung für die In-Orbit Testung auf der Bartolomeo-Plattform untersucht. Im Rahmen des Vorhabens fanden Arbeiten in verschiedenen Bereichen statt. Für den Entwurf der Roboterzelle wurde eine Optimierung auf Basis der kinematischen Manipulierbarkeit durchgeführt, Die kraftbasierte Manipulation erforderte eine iterative Entwicklung eines formschlüssigen Griffkonzepts für cPCI-Steckkarten. Für das Einstecken und die Entnahme der Karten wurde eine zweistufiger Regler implementiert, der kraftbasierte Strategien aus menschlicher Demonstration lernt und mithilfe der Kraft-Momenten-Sensorik des Arms ausführen kann. Für das Erzeugen von Trainingsdaten musste eine Simulationsumgebung implementiert werden. Abschließend wurde ein sampling-basierter Planer mit einer Trajektorien-datenbank kombiniert, um die notwendigen Bewegungen zwischen Steckplätzen effizient planen und abfahren zu können. Das gesamte System wurde in ein neu entwickeltes Planungssystem integriert, das Nutzern die intuitive Definition neuer Testabläufe erlaubt und die Kontrolle der Zelle ohne Zugang zum Reinraum ermöglicht.	
19. Schlagwörter Robotik, Künstliche Intelligenz, In-Orbit Servicing, Assembly Integration and Test (AIT), Kraftbasierte Fügestrategien	
20. Verlag ---	21. Preis ---

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN ---	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title Final Report of the project RackKI from the FZI With annexes: Success control report, Document Control Sheet	
3b. Title of Publication ---	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Wilbrandt, Robert; Scherzinger, Stefan; Wanninger, Sascha; Heppner, Georg	5. End of Project 30.11.2023
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) ---	6. Publication Date 30.06.2024
	7. Form of Publication ---
8. Performing Organization(s) (Name, Address) FZI Forschungszentrum Informatik, Haid-und-Neu-Str. 10-14, 76131 Karlsruhe	9. Originator's Report No. ---
	10. Reference No. 50RA2128
	11a. No. of Pages Report 47
	11b. No. of Pages Publication ---
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	12. No. of References 55
	14. No. of Tables 0
	15. No. of Figures 29
16. Supplementary Notes ---	
17. Presented at (Title, Place, Date) ---	
18. Abstract The aim of the project was the development of an AI-based system for automatic integration and testing of modular OBC-modules with CompactPCI (cPCI) interfaces in avionic-racks. To this end, a robot cell was designed and optimized, a force-based controller based on human demonstrations in simulation was developed, an offline trajectory planning for efficient test plan execution was implemented and integration of the complete system into a novel system for test plans was performed. In addition to an evaluation in the context of current AIT, future use for in-orbit testing on the Bartolomeo platform was investigated. Within the project, work was carried out in various areas. For the design of the robot cell, an optimization based on kinematic manipulability was performed. Force-based manipulation required the iterative development of a tight-fit grasping concept for cPCI cards. Plugging and pulling of the cards was implemented using a two-stage controller, which learned force-based strategies from human demonstration and executes them blindly based on an integrated force-torque-sensor. The creation of a suitable training dataset required the implementation of a simulation environment. Finally, a sampling-based trajectory planner was combined with a trajectory database to efficiently plan and execute any required motions between different slots. The complete system was integrated in a novel planning system, which allowed the intuitive definition of new test plans and remote control of the process without access to the clean room.	
19. Keywords Robotics, Artificial Intelligence, In-Orbit Servicing. Assembly Integration and Test (AIT), force-based manipulation strategies	
Publisher ---	21. Price ---