

## Schlussbericht

# ReCoBot2

### *Towards Space Qualification*



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

Ansprechpartner: Georg Heppner  
Tel.: +49 721 9654-248

E-Mail: heppner@fzi.de

Autoren: Nicolas Hügel

Reviewer: Johannes Mangler, Georg Heppner

#### ANLAGEN:

- *Erfolgskontrollbericht*
- *Berichtsblatt*
- *Document Control Sheet*
- *Anlage AZK*



Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50RA2112



## Inhalt

<b>KURZDARSTELLUNG</b>	<b>3</b>
Aufgabenstellung.....	3
Voraussetzungen .....	3
Planung und Ablauf.....	3
Wissenschaftlich technischer Stand.....	7
Manipulatoren für Weltraumanwendungen.....	7
Modulare Satellitenstrukturen .....	8
Schnittstellen .....	9
Regelungskonzepte für Manipulatoren und Skills.....	10
New Space Zeitalter in der Raumfahrt.....	11
Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	11
<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG</b>	<b>12</b>
Verwendung der Zuwendung und erzielt es Ergebnis im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	12
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	35
Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	36
Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	37
Erfolgte Veröffentlichungen.....	37
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>38</b>

## KURZDARSTELLUNG

### Aufgabenstellung

Das Arbeitsziel des Projektes ReCoBot 2 war die Weiterentwicklung des in ReCoBot 1 erbauten Roboterarms. Dabei lag ein Schwerpunkt des Projektes auf der Untersuchung der Komponenten des Roboters auf deren Qualifizierung für den Welteinsatz. Dazu sollen mehrere Tests der Hardware durchgeführt werden. Diese Tests mussten geplant, durchgeführt und anschließend entsprechend ausgewertet werden, um eine Aussage über die Qualifikationsfähigkeit der Komponenten treffen zu können. Der Roboterarm sollte um ein Werkzeug zur Manipulation diverser Gegenstände erweitert werden. Diese Manipulationsfähigkeit sollte jedoch nicht Gegenstand der Qualifikationsuntersuchungen sein. Die Kinematik bedarf weiterer Untersuchungen für die Erreichbarkeit aller möglichen Satellitenstrukturen basierend auf dem modularen Würfelprinzip von den iBOSS Vorhaben. Um das Docken an den Schnittstellen zu verbessern, sollten Sensorerweiterungen vorgenommen werden, um in allen Lagen im Schwerfeld der Erde erfolgreich docken zu können.

### Voraussetzungen

Das Vorhaben ReCoBot2 nahm die Entwicklungen aus dem Vorgängerprojekt ReCoBot 1 als Voraussetzung für die Weiterentwicklung. Ebenso wurden die, in ReCoBot 1 verwendeten, iSSI Schnittstellen verwendet. Die Arbeiten nahmen die Ergebnisse der in den iBOSS Vorhaben entwickelten Satellitenstrukturen als Grundlage für den Aufbau der Umgebungsstrukturen.

### Planung und Ablauf

**AP1 Anforderungsanalyse für die Weltraumqualifizierung:** Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Voraussetzungen für die Komponenten im Weltall erfasst und die kritischen Komponenten am Roboter identifiziert. Hauptsächlich sind das die Motoren, die Elektronik und der elektrische Aufbau. Auf dieser Grundlage wurde ein Testablauf nach der ECSS geplant, wobei im Voraus Tests wie Ausgastests ausgeschlossen werden konnten. Als erforderliche Tests wurden ein Vibrationstest, ein Strahlentest und ein Thermal-Vakuumtest ermittelt. Ebenso wurden die Anforderungen an ein Werkzeugkonzept aufgestellt, welche allerdings gering ausfallen und ein simpler Parallelbackengreifer als ausreichend erachtet wurde.

**AP2 Konzeption und Entwicklung der Hardwarekomponenten:** Im diesem Arbeitspaket wurde eine neue Kinematik für ReCoBot ermittelt. Grundlage der Kinematikoptimierung war die Anforderung an alle möglichen Kombinationen von

Schnittstellen in der nächsten Umgebung für einen potentiellen Dockingvorgang zu erreichen. Dabei wurde besonders auf die kinematische Erreichbarkeit, Momentenbegrenzung der Motoren und Eigenkollision geachtet. Die dabei iterativ errechneten Segmente wurden durch eine Topologie Optimierung angepasst um möglichst leicht zu sein. Die dabei resultierenden Designs wurden in Ti6Al4V gedruckt. Die Druckergebnisse waren jedoch stark verformt und nicht zum Einsatz geeignet. Ein erneuter Versuch die Segmente zu drucken blieb aufgrund von Fertigungsschwierigkeiten aus. Es wurde eine Untersuchung der bisherigen Armsegmente mittels eines 3D Scanners durchgeführt, um das virtuelle Modell des Roboters präziser anzupassen. Die Formfits der iSSI Schnittstellen wurden überarbeitet, um einen möglichen Anfahrfehler zu maximieren und beim Koppeln die Kräfte abzufangen und zu leiten. Die interne Elektronik wurde weiter überarbeitet und auf eine Platine sowie einen Raspberry Pi4 8Gb reduziert. Ebenso wurde ein Weltraum geeignetes Konzept erarbeitet, welches die benötigten Schaltkomponenten, sowie ein neues Motorkonzept enthält. Für das Werkzeugkonzept wurde ein Parallelbackengreifer integriert und eine Erreichbarkeitsanalyse durchgeführt.

**AP3 Konzeption und Entwicklung der Softwarekomponenten:** In diesem Arbeitspaket wurde die gesamte Robotersteuerung auf ROS 2 umgezogen. Es fanden Untersuchungen der Motorsteuerungen statt und neue Reglerkonzepte führten zu einer Verbesserung der Ansteuerungspräzision. Die interne Momentensensorik der Motoren wurde genutzt um einen virtuellen Kraft-Momentensensor zu berechnen damit das Docking auch in 1G Umgebungen ermöglicht wird und zusätzlich die Schnittstelle über den Formfit besser zu treffen. Eine weitere Verbesserung des Dockings wurde durch visual-servoing realisiert, indem eine in der roboterseitigen Schnittstelle angebrachte Kamera ein auf satellitenseitig angebrachten Marker detektiert. So wurde die Anfahrposition des Roboterarms deutlich verbessert und robuster. Es wurden ebenso übergeordnete Roboterskills, wie Positionsanfahren und Docken an bestimmte Schnittstellen implementiert um die Ansteuerung zu erleichtern.

**AP4 Evaluierung der Weltraumtauglichkeit einzelner Komponenten:** Nach dem Testplan aus AP1 wurden die jeweiligen Tests durchgeführt, dokumentiert und ausgewertet. Die Tests wurden nach den Parametern einer minimalen Qualifikation nach der ECSS durchgeführt. Dabei erwiesen sich die Motoren als erstaunlich resistent, jedoch ungeeignet für den Einsatz im Weltall, da diese nicht vor Strahlung geschützt sind. Ebenso kritische Komponenten sind DC/DC-Wandler. Diese sind im Thermal-Vakuum stark beschädigt worden. Der Vibrationstest ergab keine nennenswerten Schäden an den Komponenten. Es wurde jedoch aufgrund der kinematischen Redundanz durch die sieben

Achsen eine Launchposition festgelegt, die eine Halteklemme erfordert, um den Arm zu fixieren.

**AP5 Evaluation und Dokumentation des Demonstrators:** Der ReCoBot2 Demonstrator wurde in abschließenden Test ausgiebig evaluiert. Es wurden zwei Szenarien aufgestellt. Zum einen die reine Fortbewegung über eine Satellitenoberfläche und zum anderen das Greifen und Umsetzen eines generischen Objektes. Während der Entwicklung an den Einzelkomponenten wurden diese ausgiebig getestet, iterativ optimiert und angepasst.

Die **zeitliche Planung** des Vorhabens wurde, wie im nachfolgenden Gantt Chart dargestellt, für 1 Jahr und 3 Monate Laufzeit ausgelegt. Im späteren Verlauf wurde eine kostenneutrale Verlängerung, durch Mittelumwidmung um 2 Monate vorgenommen. Wodurch der Projektabschluss auf den 31.03.2024 fiel.

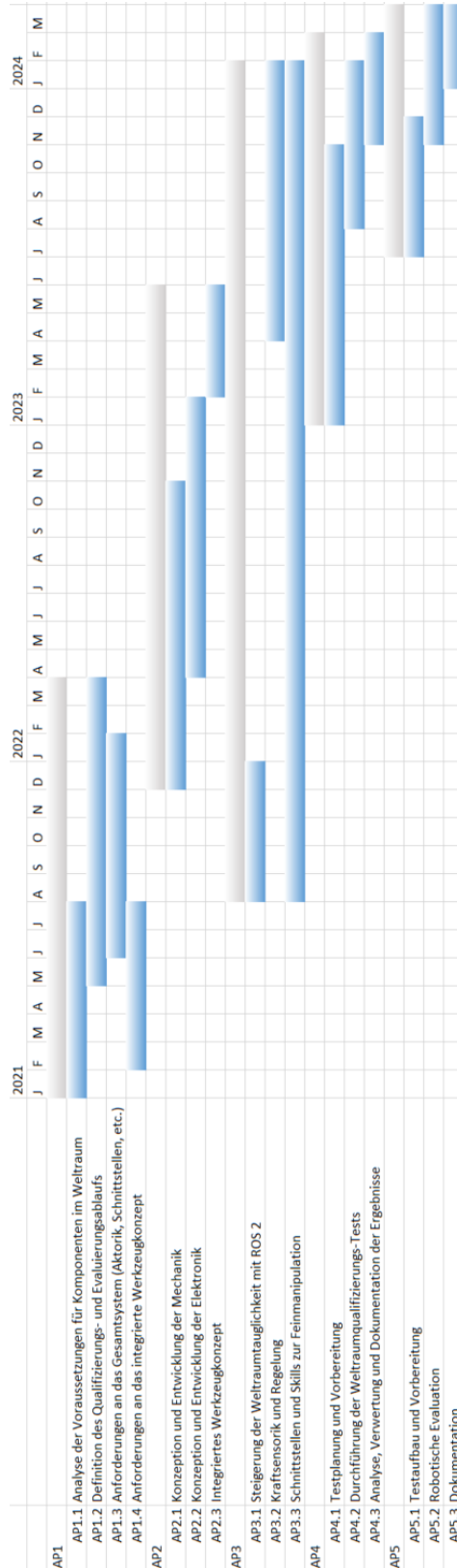


Abbildung 1: Projektverlauf als Ganttchart

## Wissenschaftlich technischer Stand

Der Stand der Technik ist nachfolgend in seine einzelnen Themenschwerpunkte unterteilt. In jedem Schwerpunkt wird eine Auswahl an Arbeiten vorgestellt, die mit der Fragestellung in ReCoBot 2 verwandt sind.

### Manipulatoren für Weltraumanwendungen

Auf der ISS spielen zwei Manipulatoren eine wichtige Rolle: Das Canadian Mobile Servicing System (MSS) und das Japanese Experiment Module Remote Manipulator System (JEMRMS). Im Dezember 2020 soll der European Robotic Arm (ERA) dazukommen. Zum MSS gehört das Space Station Remote Manipulator System (SSRMS), ein 17 Meter langer Arm mit sieben Freiheitsgraden. Ähnlich dazu ist der 11 Meter lange ERA ebenfalls mit 7 Freiheitsgraden ausgestattet. Beide haben die Stärke, an der Basis neu platziert werden zu können. Vor den Schnittstellen befindet sich jeweils ein mit drei Freiheitsgraden ausgestattetes Handgelenk, die für die Montage- und den Service-Einsatz konzipiert wurden. Das JEMRMS ist fest mit dem JEM verbunden und misst mit sechs Freiheitsgraden 10 Meter. Die Hauptaufgabe ist das Frachthandling [1]. Seit 2008 ist der Manipulator Dextre auf der ISS tätig. Er passt auf das Ende des Canadarm2 und kann somit überall auf der Station eingesetzt werden. Dextre hat zwei Arme mit jeweils sieben Freiheitsgraden, die zusammen komplexe Bewegungen ausführen können [2]. Neuere Ansätze finden sich im Robonaut R2, ein Manipulator mit menschenähnlichem Torso und Armen. Ein Einsatz außerhalb der ISS ist derzeit jedoch nicht möglich [3]. Konzeptionell wird Manipulation in Weltraumanwendungen weit gedacht. Das Advanced Telerobotic Actuation System (ATLAS) ist ein Konzept eines Satelliten mit zwei Manipulatoren für On-Orbit-Servicing Aufgaben [1]. Weitere Ansätze betrachten die Beseitigung von Space Debris [1] und stellen Docking, Anlegen, Auftanken, Transport und Rettung als mögliche Einsatzgebiete für On-Orbit-Manipulationen in Aussicht [4]. Als kleinere Leichtbaulösungen existieren der Self-Mobile Space Manipulator des Carnegie Mellon University Robotics Institute. Es handelt sich dabei um einen kleinen Leichtbauarm, der sehr ähnlich zum Canadarm und dem ERA an jeweils beiden Enden einen Greifer besitzt, mit denen sich der Arm über die Strukturen der Raumstation mit seinen sieben Freiheitsgraden hangeln kann. Um das System unter Erdanziehung zu testen, jedoch die Kräfte im Weltall genau abbilden zu können, wurde eine Gravitationskompensation entwickelt [5] [6]. Die Firma Made In Space Europe, ein Ableger von Made In Space, entwickelt derzeit zusammen mit der Luxemburg Space Agency (LSA) und der European Space Agency (ESA) einen massentauglichen Roboterarm [7] [8]. Bestehende Systeme und laufende Vorhaben zeigen die deutliche Tendenz zu mehr Manipulatoren im Weltraum,

wenngleich mehr Forschung notwendig ist, um die Potentiale der Modularen Satellitenstrukturen mit On-Orbit-Manipulation voll auszuschöpfen.

### Modulare Satellitenstrukturen

Beginnend an kleinen Satelliten zeigt sich in den letzten Jahren verstärkt das Bestreben eines einheitlichen Standards [9] um über eine bessere Wirtschaftlichkeit den Markt für Unternehmen zu öffnen, wie beispielsweise bei den CubeSats [10]. Im Gegensatz zur Standardisierung von Einzelkomponenten, wie bei dem Projekt PiCPoT, beschreiben modulare Satelliten einen Zusammenschluss aus austauschbaren Komponenten, die erst im Verbund die übergeordnete Funktion eines Satelliten erfüllen. Sie unterscheiden sich deutlich von den kleinen, aber monolithischen CubeSats [10]. Dabei kann ein steigender Grad an Modularität beobachtet werden, der oft unterschiedlichen Auffassungen genügt. So bietet der Modular Common Spacecraft Bus (MCSB) [11] teilweise Missionskonfiguration über austauschbare Module, ist mit der Vorgabe seiner übergeordneten Struktur allerdings weniger flexibel als vollständig modulare Satellitensysteme. Das aus PiCPoT entstandene Projekt ARaMiS [12] strebt eine solche modulare Satellitenarchitektur an, die aus einer kleinen Anzahl flexibler Komponenten besteht [13]. Das allgemeine Konzept, einen über Schnittstellen verbundenen Zusammenschluss würfelförmiger Komponenten zu gewährleisten, der modular zusammengestellt verteilten User-Payload transportieren kann, findet sich in vielen Vorhaben, wie bei iBOSS [7] [8], MOSAR [14] oder den Entwicklungen von NovaWurks [15].

MOSAR (MOdular Spacecraft Assembly and Reconfiguration) hat einen stärkeren Fokus auf die Rekonfiguration modularen Satellitenstrukturen. Charakteristisch ist die Übernahme spezifischer Aufgaben durch einzelne Module im Verbund, die durch einen Service-Roboter manipuliert werden können. Über standardisierte Schnittstellen wird mechanische Kopplung, Daten- und Wärmetransport realisiert [14].

Flugerprobung haben Systeme von NovaWurks [15], die mit der HISat Technologie (Multi Function Hyper-Integrated Satlet) das Spektrum sehr ähnlich abdecken: Das Konzept beinhaltet den On-Orbit-Aufbau eines Satelliten aus einzelnen Satlets. Ähnlich zu iBOSS und MOSAR sieht das Konzept den Zusammenbau der Satlets im All zu größeren Satellitenstrukturen vor, was im Rahmen einer Studie <sup>1</sup> untersucht wurde [16] [17]. Weitere Projekte im Zusammenhang mit NovaWurks für den Low Earth Orbit (LEO) umfassen die Satelliten eXCITe, PODSat-1 und SIMPL und das von NOAA, NASA und USAF geführte

---

<sup>1</sup> NanoRacks Kaber Mission 1-NovaWurks-Satlet Initial Mission Proofs and Lessons

Projekt Athena. Saturn Satellite Networks arbeitet an der Entwicklung kleiner NationSat GEO Satelliten [15], die auf Basis der modularen HISat Technologie entstehen sollen [18]. Die große konzeptionelle Ähnlichkeit der aufgezeigten Vorhaben unterstreicht die prognostizierte Relevanz modularer Satellitensysteme für eine wirtschaftliche Zukunft. Sie bestätigt zudem die wichtige Rolle der On-Orbit Manipulation um durch Wartung, Reparatur und Austausch einzelner Module die Schlüssigkeit des Gesamtkonzepts zu gewährleisten [19]. Für die Robotik spielen die Modul-Schnittstellen dabei eine zentrale Rolle.

### Schnittstellen

Da die Manipulation mittels Schnittstellen über Roboter geschehen wird, ist zunächst eine kurze Betrachtung robotischer Lösungen in verwandten Branchen sinnvoll. Eine einfache Unterscheidung teilt Schnittstellen in Aktive und Passive ein [20], wobei aktiven Schnittstellen gegenüber passiven einen dedizierten Aktor für das Öffnen und/oder Schließen der Verbindung aufweisen. Bei passiven Schnittstellen müssen die Elemente durch Kraftaufbringung von außen, beispielsweise durch Verdrehung zueinander geschlossen und geöffnet werden, was Komplexität und Gewicht verringern kann. Klassische Anforderungen an eine Schnittstelle sind die Übertragungen von Kräften und Momenten, Energie, Daten und Stoffen. Eine Vielzahl an unterschiedlichen Konzepten für Schnittstellen zwischen modularen Robotersystemen wird beispielsweise in [20] aufgeführt<sup>2</sup>. Reine Energieschnittstellen finden sich oft in der Servicerobotik zum Laden mobiler Plattformen [21] [22]. Anforderungen an hohe Positionierungsgenauigkeit finden sich bei Automatischen Werkzeugwechselsystemen in CNC Maschinen und Industrierobotern [23].

Im Weltraumkontext ist der International Berthing Docking Mechanism (IBDM) im Einsatz, welcher als Multikupplung zwischen den Einzelsegmenten der ISS dient und über eine Vielzahl an weiteren verbauten Schnittstellen für Energie, Daten und Fluide verfügt [24]. Eine intermodulare Multi-Schnittstelle mit deutlich kleineren Dimensionen wird auch in den zuvor aufgezeigten Vorhaben iBOSS, MOSAR und den Systemen von NovaWurks angestrebt. Eine wichtige Anforderung für die robotische Manipulation ist insbesondere die Kontrolle über nicht-kooperative oder defekte Schnittstellen, was explizit in deren Design vorgesehen sein muss.

In diesem Vorhaben soll die Robotische Manipulation auf dem intelligent Space System Interface (iSSI) [25] [26] aus dem Projekt iBOSS aufgebaut werden, welches mechanische

---

<sup>2</sup> Darunter die Systeme: M-TRAN, ATRON, Odin, ICubes, PolyBot / CONRO, Crystalline robot und SMORES

Kopplung über die Multi-Schnittstelle zusammen mit Energie- und Datenaustausch ermöglicht. Die Schnittstelle wurde bereits im iBOSS Projekt für robotische Manipulation unter Laborbedingungen validiert und kann weiterhin als Basis für eine zügige Validierung der Rekonfiguration dienen. Zudem gibt es die ersten Unternehmungen, diese Schnittstelle nach erfolgreicher Qualifizierung im Orbit zu erproben.

### Regelungskonzepte für Manipulatoren und Skills

Für Manipulationsaufgaben im Weltraum gelten im Kern die Prinzipien, die auch für Montageanwendungen im industriellen Kontext maßgeblich sind: Mit steigenden Anforderungen an die Autonomie müssen die Systeme in Umgebungen agieren, in denen Unsicherheiten neue, Kraft-adaptive Mechanismen, besonders in kontaktbasierten Applikationen, benötigen. Impedance Control [27] beschreibt eine paarweise Modellierung von Manipulator und Umgebung als Impedance-Admittance Paar. Eine Impedance-Regelung des End-Effektor Werkzeugs bietet für steife Umgebungen mit harten Oberflächen Vorteile gegenüber der Admittance-Regelung [28]. Je nach Implementierung benötigt die Impedance-Regelung jedoch Schnittstellen zur Gelenkmomenten-Ansteuerung und -Sensorik, die finanzielle Nachteile mit sich bringen können. Die Vereinheitlichung beider Varianten ist für weiche und harte Umgebungen geeignet [28] und oft Teil in Leichtbaurobotern neuerer Generationen [29]. Vorteile sind die Stabilität und Sensitivität der Regelung in schnellen, kontaktbasierten Bewegungen [30]. Nachteilig für diese Regelungskonzepte ist auch hier 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 [31]. Für totzeitbehaftete Manipulation, wie bei der Teleoperation, sind die regelungstechnischen Stabilitätskriterien von besonderer Bedeutung und können durch eine Passivity-basierte Betrachtung [32] beschrieben werden. Albu-Schäffer et al. liefern hierzu eine einheitliche Analyse von Positions- und Impedance-Regelung für Manipulatoren mit nachgiebigen Gelenken [33]. Neuere Arbeiten existieren zur Lösung des Positions-Drifts [34]. Eine weitere Steigerung der Genauigkeit der Kraftregelung kann über serielle, elastische Aktuatoren erreicht werden [35]. Zur Implementierung der Regelungen werden Algorithmen zur Berechnung von Kinematik und Dynamik benötigt [36], [37].

Für die Erzeugung von Bewegungsfolgen der Manipulatoren können Planer eingesetzt werden [38], die auf Grundlage eines Kinodynamischen Planungsprozesses auch für Systeme mit Unsicherheiten, wie nicht-deterministische Reibung, gute Ergebnisse erzielen [39]. 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 [40]. Die Programmierung von Skills und Manipulationssequenzen kann beispielsweise über die Kombination von parametrierbaren Templates über explizite Vorgaben von Kraft- und Bewegungsabläufen realisiert werden [41], [42], [43]. Die Formulierung zeitlicher Abfolgen kann mit Zustandsautomaten erfolgen [44]. Um einen Teil dieser Komplexität zu kapseln, wurde im industriellen Kontext eine UML/P-basierte Sprache für die Roboterprogrammierung eingesetzt [45]. In diesem Rahmen werden die Fähigkeiten von Domänenexperten kodiert und von Werkern in einem Zustandsdiagrammähnlichen Modell zusammengestellt [46]. Im Gegensatz zu den industriellen Ansätzen müssen die Skills für ReCoBot jedoch vollständig offline ohne Zugang zur echten Hardware vorprogrammiert werden, damit der Manipulator für neue On-Orbit Szenarien im Einsatz durch Skill-Updates umgerüstet und aktualisiert werden kann.

### New Space Zeitalter in der Raumfahrt

New Space beschreibt nicht direkt eine bestimmte Technologie, sondern einen neuen Denkansatz in der Raumfahrt. Die Grundlage hierfür sind drei Aspekte: der fortschreitende Einsatz privater Firmen in der Raumfahrt, die Miniaturisierung der Satelliten, sowie neuartige Dienste auf Basis von Weltraumdaten [47]. Private Firmen, wie SpaceX, Rocket Lab, Blue Origin oder Isar Aerospace stehen im Kontrast zu traditionellen staatlichen Einrichtungen. Dadurch, sowie durch die Miniaturisierung ist es möglich schnell und kosteneffizient Satelliten in den Weltraum zu bringen. Dies ermöglicht wiederum, dass neuartige Dienstleistungen angeboten werden können, wie z.B. das Satellite Internet of Things [48], bei dem die Daten von Sensoren direkt an Satelliten gesendet werden, statt an lokale Kommunikationsmöglichkeiten.

Gleichzeitig werden Technologien, die hauptsächlich für den terrestrischen Einsatz entwickelt wurden, allerdings auch im Weltraum eingesetzt (Spin-In). Beispiele hierfür sind Teflon oder der Klettverschluss.

### Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es fand **keine** Zusammenarbeit mit anderen Stellen statt.

## EINGEHENDE DARSTELLUNG

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

Die Verwendung der Zuwendung geschah zur Ermöglichung der Forschung an den Themen des Vorhabens aber auch der Beschaffung der benötigten Sensoren und Komponenten im Vorhaben. Genutzt wurde die Zuwendung für die Weiterentwicklung eines robotischen Systems hardware- sowie softwareseitig, sowie Methoden der Roboterfortbewegung, Ansätze der robotischen Manipulation und Qualifizierungstests von Einzelkomponenten. Dies beinhaltet sowohl die Arbeiten zur Recherche des Forschungsfeldes, Konzeptionierung der Hardware, Software und schließlich die finale Konstruktion und Evaluation des Gesamtsystems. Die Gegenüberstellung der Ziele und Ergebnisse geschieht nachfolgend auf Basis der Arbeitspaket-Unterteilung. Hierbei werden jeweils das Ziel und das erzielte Ergebnis beleuchtet:

#### **AP1 Anforderungsanalyse für die Weltraumqualifizierung**

##### **AP1.1 Analyse der Voraussetzungen für Komponenten im Weltraum**

Es wurde eine umfassende Analyse der Voraussetzungen für die Komponenten und das Gesamtsystem durchgeführt. Dabei wurde sich nicht nur rein auf die Weltraumanwendung beschränkt, sondern auch der Demonstrator im 1g Feld berücksichtigt.

Die Voraussetzungen für einen ReCoBot im Weltall sind Stichpunktartig zusammengefasst:

- Es muss eine stabile Transportposition geben in der der Roboter vom Start bis zum Einsatzort beschädigungslos verharren kann
- Beim Raketenstart ergeben sich Vibrationen und Shocks durch die Stufenabtrennung.
- Das System muss die Druckunterschiede überstehen können
- Das System muss die Temperaturunterschiede überstehen können
- Das System muss der Strahlenbelastung bei Raketenstart und im Orbit überstehen können
- Die Materialien müssen sich für den Einsatz im Orbit eignen

Alle Bauteile müssen den Start Überstehen und anschließend die Umgebungsbedingungen während der Lebensdauer. Um die Ausfallwahrscheinlichkeit während der Lebensdauer zu minimieren, gibt es verschiedene Standards. Die wichtigsten welche beachtet wurden, sind:

- ECSS, welche stark von der ESA unterstützt wird.
- ISO-Standards, z.B. ISO 19683:2017
- NASA-Standards
- IEEE Standards, z.B. IEEE Std 1156.4-1997
- Standards von privaten Firmen, wie z.B. SpaceX,

Es wurde sich im Projektverlauf darauf geeinigt, sich nahe an den ECSS-Standards zu bewegen. Allgemein gibt es aber kein einheitliches Internationales Vorgehen und es empfiehlt sich jede Qualifizierung systemspezifisch durchzuführen. Die Standards der ECSS wurden genauer untersucht und auf ihre Relevanz für das Projekt bewertet.

Die hauptsächlich relevanten Standards der ECSS für die robotische Entwicklung sind:

- Electrical and electronic (ECSS-E-ST-20C)
- Software general requirements (ECSS-EST-40C)
- Ground systems and operations (ECSS-E-ST-70C)
- On-board control procedures (ECSS-E-ST-70-01C)
- Structural general requirements (ECSS-E-ST-32C)
- Fracture control (ECSS-E-ST-32-01C)
- Structural finite element models (ECSS-E-ST-32-03C)
- Materials (ECSS-E-ST-32-08C)
- Mechanisms (ECSS-E-ST-33-01C)
- Communications (ECSS-E-ST-50C)

Daraus ergeben sich verschiedene Tests die mit dem System, oder nur Teilkomponenten, durchgeführt werden müssen. Für diese Tests ist es wichtig zu wissen, welche Voraussetzungen erfüllt werden müssen. Gerade Vibrationen, Shocks und Temperaturen sind dabei oft sehr ähnlich, wobei die Strahlenbelastung stark von der Mission abhängig ist. Daher wurde noch einmal ein spezielles Augenmerk darauf gelegt.

Um die Strahlenbelastung auf den Roboter zu ermitteln, wurden Berechnungen mit SPENVIS (Space ENVironment Information System) der ESA durchgeführt. Dabei wurden vorerst allgemeine Missionsdaten verwendet, da es sich dabei bisher nur um eine rein theoretische Mission handelt. Der Untersuchungsraum wurde bisher auf den LEO

beschränkt. Die Strahlenbelastungen sind im All allerdings hoch-nicht-linear, wodurch eine Abweichung von der Höhe schnell einen großen Faktor ausmachen kann. Es wurden bisher eine Missionsdauer von: 5 Jahren und Flughöhen zwischen 500 km (Perigee) und 2000 km (Apogee), mit einer Orbitdauer von 5 Tagen gewählt. Die Strahlenbelastungen dieser Missionsdaten sind in Abbildung 2 dargestellt.

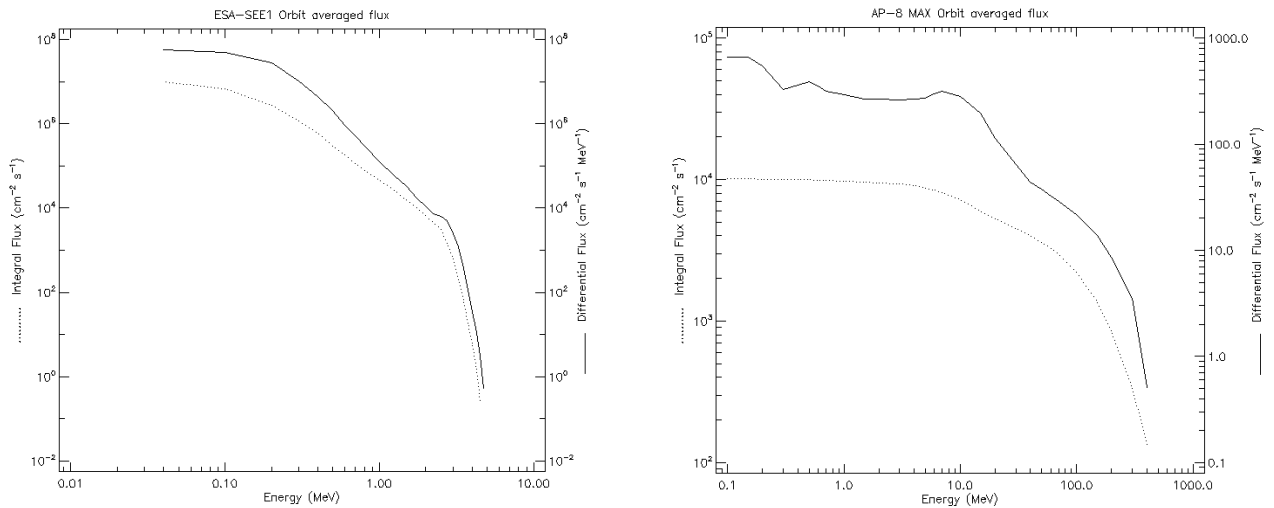


Abbildung 2: Dosebelastung durch trapped-electrons (links) und trapped-protons (rechts) Hierbei ist gut zu erkennen, ist die Belastung durch Elektronen deutlich stärker, da deren Anzahl um das ca. 1000-Fache höher ist. Allerdings sind Elektronen auch besser durch Strahlenschilder abzublocken, während Protonen nur sehr schwer abzuschirmen sind. Ein weiteres Problem ergibt sich dadurch, dass absorbierte Elektronen ihre Energie meist als Gammastrahlung wieder abgeben. Daher ist es wichtig zu wissen, was die TID (Total Ionizing Dose) auf unterschiedliche Materialien in Abhängigkeit des Strahlenschutzes ist. In Abbildung 3 sind dafür einige Beispiele aufgeführt.

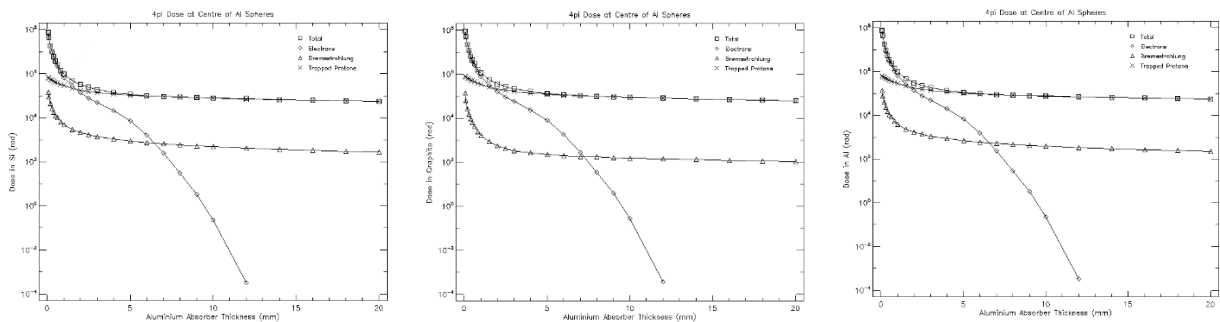


Abbildung 3: TID auf unterschiedliche Materialien wie Silizium (links), Graphit (Mitte), oder Aluminium (rechts)

Dabei lässt sich gut erkennen, dass Strahlenschilder im Bereich von 2-5 mm den besten Wirkungsgrad bezüglich Strahlenschutz und Gewicht haben. Leider werden die

Berechnungen nur für einen Strahlenschutz aus Aluminium durchgeführt. Das Zielmaterial für einen potentiell weltraumtauglichen ReCoBot könnte aber auch Ti6Al4V in Frage kommen. Das ist eine druckbare Titanlegierung, mit einer Dichte von ca.  $4,5 \text{ g/cm}^3$  und ist bereits in der ECSS-Q-ST-70-36C als bereits qualifiziertes Material gelistet. Aluminium hat eine Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  und da der Strahlenschutz mit höherer Dichte besser wird, könnten die Wände in Titan dünner werden, mit der Einschränkung einer druckbaren Mindestwandstärke.

Es existieren bereits viele Komponenten, welche für Strahlenbelastung qualifiziert worden sind. Da die Beschaffung sogenannter HI-Rel oder „space-qualified“ Komponenten sehr zeit- und kostenintensiv ist, wird versucht sich auf sogenannte COTS (Commercial Of The Shelf) zu konzentrieren. Für COTS-Komponenten gelten mindestens die gleichen Anforderungen wie für die Hi-Rel / space-qualified Komponenten. Die ECSS-Q-ST-60-13C gibt eine beschleunigte Evaluierung der COTS Komponenten vor. Es wird nicht versucht eine vollständige Class1 Qualifikation durchzuführen, jedoch soll eine Aussage über die generelle Eignung der Komponenten getroffen werden können.

### **AP1.2 Definition des Qualifizierungs- und Evaluierungsablaufs**

Es wurden die erforderlichen Qualifizierungstests für den ReCoBot ermittelt. Diese sind folgende:

- Random Vibration Test
- Thermalcycling / Thermalvakuum Test
- Strahlentest

Der Random Vibration Test ist dafür, die Bedingungen beim Transport mit der Rakete zu simulieren. Dabei sollte der Roboter in einer festgelegten Launchposition verweilen.

Der Thermalcycling oder Thermalvakuum Test wird mit einem Lebensdauermodell durchgeführt. Dabei sollen die Komponenten wechselnden Temperaturen im Vakuum ausgesetzt werden. Diese Tests werden auch mit Einzelkomponenten durchgeführt, da der ReCoBot aus wiederkehrenden Bauelementen aufgebaut ist und somit der Testaufwand geringer gehalten werden kann.

Der Strahlentest ist hauptsächlich für die EEE Komponenten interessant. Aber auch manche Materialien erfahren starke strukturelle Änderungen durch die Strahlenbelastung. Gerade die derzeit verbauten Kinova-Drives werden in einem ersten Test mit einer Strahlenquelle bestrahlt und die Funktion ermittelt. Dafür wurden die Drives genauer untersucht, um ein umfassendes Bild der Komponenten zu erlangen. Dabei fällt vor allem

der fehlende Strahlenschutz auf, da die Elektronikboards nur durch eine Kunststoffabdeckung geschützt sind (Siehe Abbildung 4).

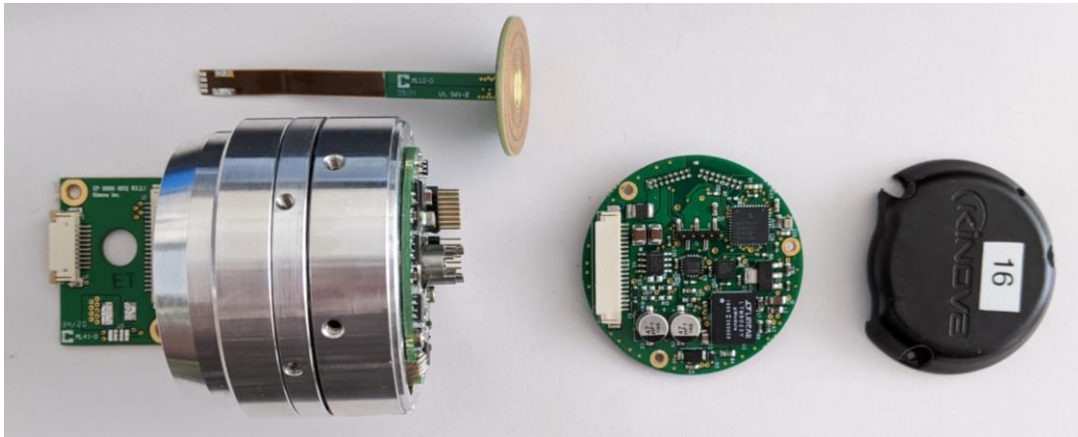


Abbildung 4: Elektronische Komponenten eines Kinova-drives

Die TID wird in SPENVIS direkt in Abhängigkeit der Dicke des Strahlenschutzes angegeben, wodurch die Komponenten theoretisch direkt ohne Schutz und der entsprechenden Dosisleistung getestet werden können. Allerdings würde nach der ECSS eine Qualifizierung das Testen von mehreren gleichen Komponenten erfordern. Da am FZI nur eine sehr begrenzte Anzahl der Boards vorhanden ist, wird der Test derart durchgeführt, dass die Dosisleistung stetig bis zu Versagen erhöht wird. Dieses Ergebnis hat keine statistische Relevanz, gibt aber Auskunft darüber welche Dicke der Strahlenschutz mindestens haben sollte.

Ein Thermalbalancing Test ist nur für das Gesamtsystem von Relevanz. Der Roboter wird auf eine Zieltemperatur gebracht und nach einem festgelegten Zeitpunkt, (ca. 30 min) wird die resultierende Temperatur der Einzelkomponenten gemessen. Damit soll ermittelt werden auf welche Endtemperatur sich das Gesamtsystem einstellt und ob der Betrieb in diesem Zustand noch möglich ist.

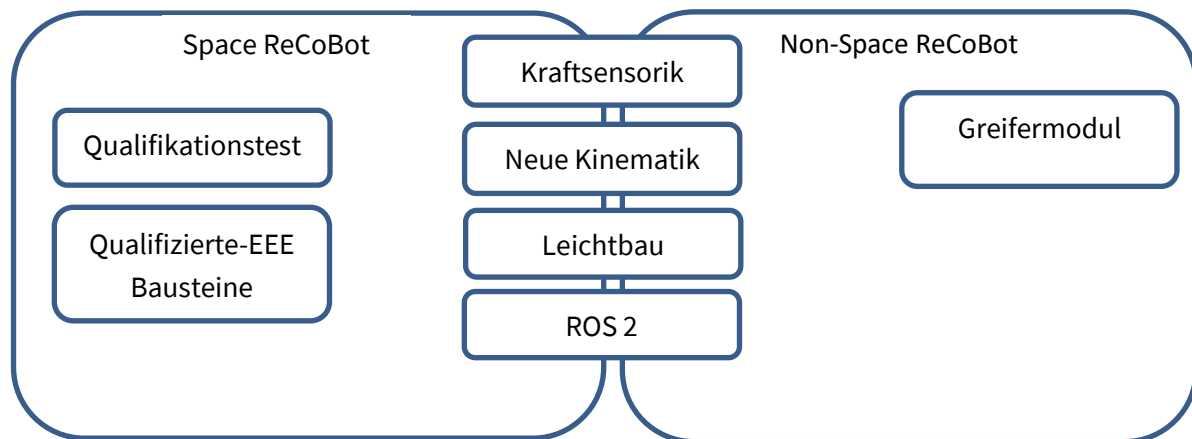
Eine ausführliche Testbeschreibung und Ergebnisse sind im Absatz zu AP4 beschrieben.

### **AP1.3 Anforderungen an das Gesamtsystem (Aktorik, Schnittstellen, etc.)**

Es wurden die Ergebnisse aus der ersten Projektphase analysiert und die Anforderungen an das Gesamtsystem neu aufgestellt. Darüber hinaus ergeben sich noch zusätzlich die speziellen Anforderungen für den Weltraum, welche in AP1.1 bereits gelistet wurden.

Die Analyse der Anforderungen hat ergeben, dass es für den weiteren Projektverlauf sinnvoll ist den Demonstrator in zwei Teile zu spalten. Einen Demonstrator mit Fokus auf die Weltraumqualifizierung und einen mit Fokus auf die Funktionalität unter 1g

Bedingungen. Das kommt daher, dass beispielsweise das angedachte Werkzeugkonzept einen erheblichen Mehraufwand ohne konkreten Nutzen für einen Weltraumqualifizierten Roboter darstellt. Da es momentan keine am Markt erhältlichen qualifizierten Greifermodule gibt, wird dieses Konzept auf dem Non-Space ReCoBot umgesetzt.



Einige Anforderungen werden von den Systemen geteilt, während andere speziell nur auf dem Jeweiligen System integriert werden sollen.

Aus dem aktuellen ReCoBot sind erforderliche Änderungen und Erweiterungen abgeleitet worden:

- Verkürzung der Endeffektoren, um damit die kinematische Erreichbarkeit zu verbessern
- Implementierung von dedizierten FT-Sensoren an den Endeffektoren um ein präziseres Docken zu ermöglichen. Die integrierte Sensorik der Kinova Aktoren unterliegt einer zu großen Hysterese, wodurch die Daten so keine verwendbaren Ergebnisse liefern. Dabei muss der Messbereich lediglich den Dockingvorgang abbilden können. Dabei treten im Idealfall nur sehr kleine Kräfte und Momente auf. Daher kann der Messbereich klein sein, die Messauflösung jedoch so klein wie möglich. Da an dem anderen Ende des Roboters der FT-Sensor jedoch die maximale Momentenbelastung erfährt, sollte die mechanische Maximallast des Sensors möglichst groß sein. Auch wenn dabei der Messbereich überschritten wird.
- Zusätzlich ist es notwendig ein Kamerasystem zu implementieren um Docking via Visual Servoing zu ermöglichen. Das erleichtert einerseits die korrekte Ausrichtung des Endeffektors über einer Schnittstelle und andererseits das Synchronisieren des Endeffektors während eines Dockingmanövers mit einem anderen Satelliten. Dabei ist die Synchronisation entscheidend, da zwei sich annähernde Satelliten

zueinander pendeln. Dabei ist eine Weitwinkelkamera in der Mitte der ISS Schnittstelle eine ideale Lösung.

- Die Drehmomente der Aktoren müssen ausreichend dimensioniert sein. Dafür wurden zwei weitere Kinova KA-75 Aktoren anstatt der KA-58 Aktoren eingebaut. Damit hat jedes Gelenk ein Drehmoment von 36Nm.

Dabei ist es für die Entwicklung des auf Weltraumqualifikation ausgerichteten Roboters wichtig zu wissen, welche Komponenten bereits in qualifiziert verfügbar sind.

Komponente:	Qualifizierte Lösung erhältlich?
Konstruktionsmaterialien	Ja, es gibt Listen von Materialien, z.B. in ECSS-Q-ST-70-36C (Tabelle 5-1)
FT-Sensors	Ja, allerdings keine direkt verfügbaren Produkte, z.B. ATI, Kistler, Strainert
Rechnerkomponenten	Ja, z.B. von Endurosat. Allerdings nur vorgefertigte Systeme, die evtl. nicht für das spezifische ReCoBot System geeignet sind
EEE- Komponenten	Ja, es gibt Listen der NASA, ESA, welche qualifizierte Komponenten aufführen. Allerdings hoher Preis und sehr lange Lieferzeiten, die teilweise über die Projektlaufzeit hinausgehen.
Antriebe	Ja, Es gibt Anbieter für Weltraumqualifizierte Elektroantriebe, z.B. Maccon, Motviss, Ducommun.
Greifer	Nein, es konnten keine Qualifizierten, kommerziellen Greifersysteme ermittelt werden. Bisherige Greifersysteme sind reine Spezialentwicklungen.

#### AP1.4 Anforderungen an das integrierte Werkzeugkonzept

Es wurden die Anforderungen an ein integriertes Greiferkonzept ermittelt. Dabei wurde beschlossen, dass ein Greifer für die Funktion eines ReCoBots in Space keine direkte Anwendung findet, wodurch dieser keine Qualifizierung benötigt. Daher wurde das Greiferkonzept für den ReCoBot auf der Erde vorgesehen, um damit Greifaufgaben zu

lösen, um einerseits die Fähigkeiten des ReCoBots zu erweitern und andererseits den ReCoBot auch für andere Projekte, wie z.B. VeriKI nutzbar zu machen.

Es konnten bei der Anforderungsanalyse keine speziellen, zu greifenden, Objekte ermittelt werden, wodurch es sich auf ein allgemeines Backengreiferkonzept geeinigt wurde.

Dieses Konzept kann auf verschiedene Arten gelöst werden.

- Backgreifer an der Seite eines Endeffektors angebracht
- Backengreifer in dem Endeffektor verbaut
- Eigenentwicklung eines Greifers nach dem Prinzip der Developable Mechanismen
- Ein Greifer auf Grundlage von Compliant Mechanismen
- Ein Greifer an einer Schnittstelle

Der Greifer soll dabei eine Positionsregelung haben. Eine Kraftregelung ist für das Greifen von unklaren Geometrien vorteilhaft. Die Ansteuerung soll dabei über CAN und/oder über RS485 erfolgen können. Eine genaue Ermittlung von Greifkräften und minimalen Öffnungsspanne wurde nicht gesondert durchgeführt. Hierfür wurden die, auf Grundlage der im Vorhaben VeriKI gegriffenen Objekte verwendet. Welche sich im Bereich von mind. 30mm Spanne und mind. 15N Greifkraft bewegten.

## **AP2 Konzeption und Entwicklung der Hardwarekomponenten**

### **AP2.1 Konzeption und Entwicklung der Mechanik**

Die Kinematik von ReCoBot 1 ist nicht in der Lage Schnittstellen  $90^\circ$  um die Ecke zu erreichen. Daher wurde eine Kinematikanalyse durchgeführt, um neue Segmentlängen zu ermitteln. Dabei wurde im ersten Schritt eine Parameteroptimierung vorgenommen in dem die Segmentlängen in der Berechnung Ziel der Optimierung waren. Die zu erreichenden Ziele waren alle möglichen Schnittstellenpositionen um den Roboter herum inklusive deren Anfahrpositionen ca. 10 cm direkt über den jeweiligen Schnittstellen. Das Ergebnis dieser Parameteroptimierung wurde weiter in eine Erreichbarkeitsanalyse überführt, um die Umsetzbarkeit zu überprüfen. Dabei wurde iterativ der Arbeitsraum der neuen Kinematik abgesucht und entsprechende Segmentgewichte angenommen. Jeder Punkt im Arbeitsraum wurde darüber hinaus auch in verschiedenen Posen geprüft. Die Erreichbarkeit der einzelnen Zielpose wurde geprüft, indem auf drei Voraussetzungen geprüft wurde:

- Die allgemeine kinematische Erreichbarkeit

- Die Momentenlimitierung der einzelnen Achsen
- Die Eigenkollision des Roboters

Dabei ist anzumerken, dass durch die sieben Achsen der Arm kinematisch überbestimmt ist und eine Pose über mehrere Gelenkkonfigurationen erreichbar ist. Diese Tatsache wurde allerdings als nicht wichtig erachtet, da die Resultate der Analyse eine ausreichende Aussage über die Machbarkeit der neuen Segmentlängen geliefert haben. Die Gelenkkonfiguration wurden durch den IK-Algorithmus iTaSC [49] berechnet.

Ebenso wurde die Breite des Mittelsegments untersucht, wobei kinematisch gilt, dass je breiter der Arm ist, desto besser ist die kinematische Erreichbarkeit von weit entfernten Punkten. Allerdings ist dann dabei die Momentenbelastung durch den größeren Hebel erhöht und die weit entfernten Punkte sind ohnehin für die Erfüllung der Aufgabe uninteressant. Ebenso führt eine schmale, symmetrische Armmittle dazu, dass aus Fertigungssicht nur zwei verschiedene Segmentstücke gefertigt werden müssen, wodurch der Fertigungs- und Konstruktionsaufwand gesenkt wird.

In Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Erreichbarkeitsanalyse vor und nach der Segmentlängenoptimierung zu sehen.

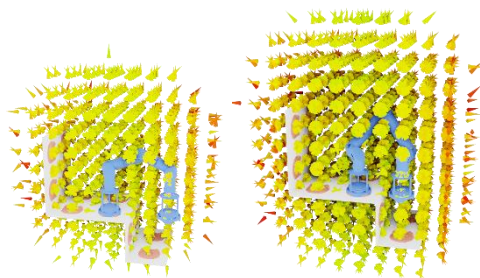


Abbildung 5: Ergebnis der Erreichbarkeitsanalysen vor (links) und nach (rechts) der Segmentlängenoptimierung

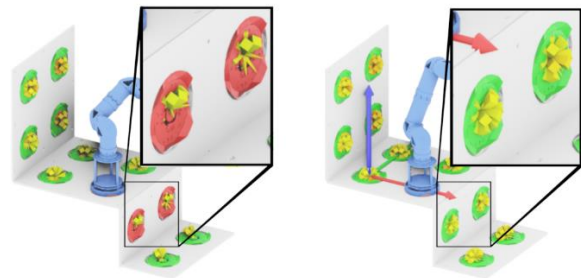


Abbildung 6: Erreichbarkeit der Schnittstellen vor (links) und nach (rechts) der Segmentlängenoptimierung

Die neuen Segmente sollen in Ti6Al4V durch additive Fertigung gedruckt werden. Dazu wurden die Teile durch eine Topologieoptimierung und mit den Konstruktionsrichtlinien des Leichtbaus modelliert. Ebenso wurden spezielle Haltemechanismen für eine CNC Maschine entworfen, um im Nachgang die Motorflansche auf die passende Toleranz zu fräsen. Die fertig gedruckten Teile hatten jedoch einen starken Verzug, wodurch die Bauteile eine zu große Toleranz hatten, um diese nutzbar zu machen (siehe Abbildung 7). Weitere Versuche die Teile zu drucken scheiterten an Fertigungsschwierigkeiten, die geforderte Toleranz mit dem Druckverfahren einzuhalten. Daher blieb ein weiterer Versuch die Teile zu fertigen aus.



Abbildung 7: Abweichungen der 3D gedruckten Segmente

Die bisherigen geklebten Karbonrohre wurden mittels eines 3D Scansystems vermessen, um das reale Modell mit dem virtuellen Modell abzugleichen. Dabei wurden minimale Abweichungen entdeckt, die in Abbildung 8 zu sehen sind.

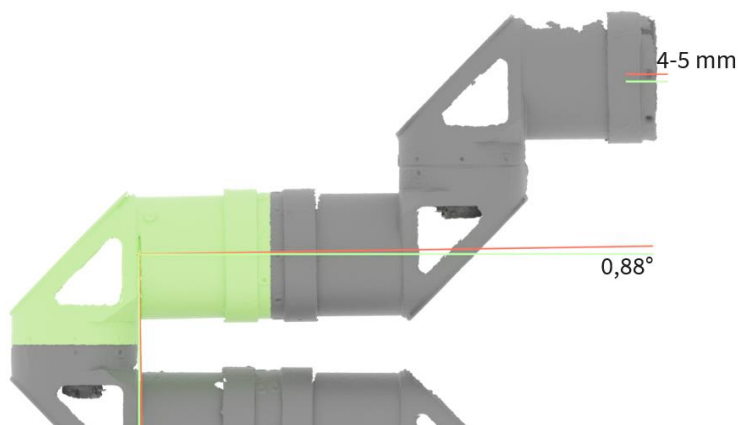


Abbildung 8: Minimale Abweichungen gemessen anhand des 3D Scans

Eine weitere mechanische Verbesserung wurde an den Schnittstellen vorgenommen, indem der Formfit um die Schnittstelle überarbeitet wurde. Dieser wurde leichter und darauf optimiert einen größtmöglichen Positionsfehler ausgleichen zu können und gleichzeitig die Lasten im gekoppelten Zustand besser aufzunehmen siehe Abbildung 9.

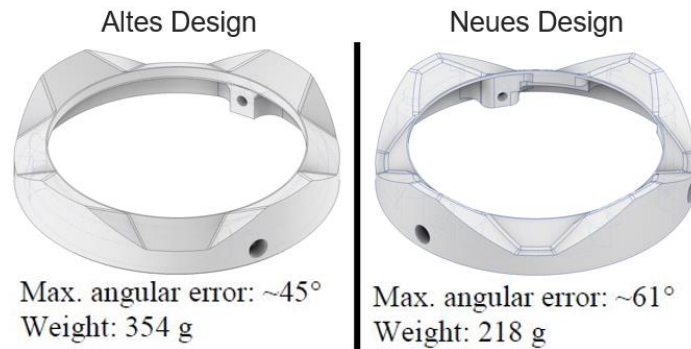


Abbildung 9: Verbesserung der Formfitgeometrie altes (links) und neues (rechts) design.

Weiter wurde die Robustheit der elektrischen Energieübertragung der iSSI-Schnittstellen erhöht, indem neuere Federringe eingesetzt wurden. Im späteren Testverlauf gab es allerdings kleinere Ausfälle, wodurch der Abschließende Test an einer festen Kabelverbindung durchgeführt wurde.

Eine weitere Hardwareanpassung ist der Einbau einer RGB-Kamera und einer RGB-LED-Beleuchtung in der Mitte der iSSI-Schnittstelle (siehe Abbildung 10).

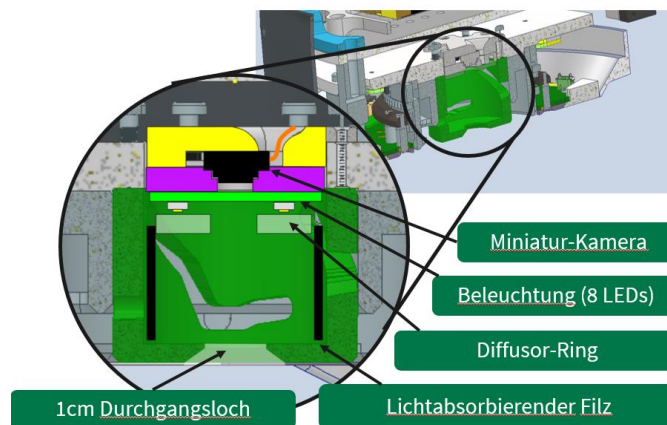


Abbildung 10: Kameraeinbauposition in der iSSI-Schnittstelle

## AP2.2 Konzeption und Entwicklung der Elektronik

Es wurde eine Signalanalyse der Kommunikation der Kinova Controllerbox vorgenommen, um die RS485 Nachrichten vollständig zu erfassen, um diese später mit einem Ersatzsystem zu replizieren (siehe Abbildung 11). Dabei fiel auf, dass das Datenblatt von Kinova nicht alle real gesendeten Nachrichten vollständig beschreibt. Die erforderlichen Komponenten für die Signalanalyse und zum Ersatz der Controllerbox wurden auf eine Custom Platine gebracht (siehe Abbildung 12). Um weitere externe Schnittstellen zu nutzen wurde custom Kernel auf dem Raspberry Pi geschrieben.

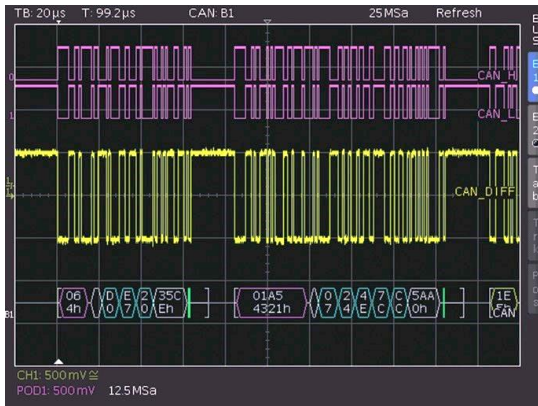


Abbildung 11: Signalanalyse des Kommunikationsprotokolls der Kinova Motoren

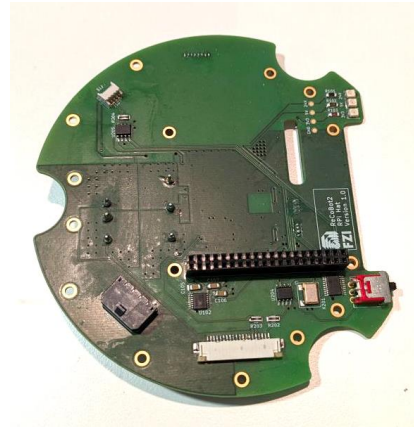


Abbildung 12: Custom Platine am FZI erstellt

Die Entwicklung einer Custom Platine hatte zum Vorteil, dass die Tip- und Basemodule deutlich kürzer als in der vorherigen Version gebaut werden konnten, was zusätzlich eine kinematische Verbesserung mit sich bringt. Ebenso konnte der Aufbau so vollkommen symmetrisch realisiert werden (siehe Abbildung 13).

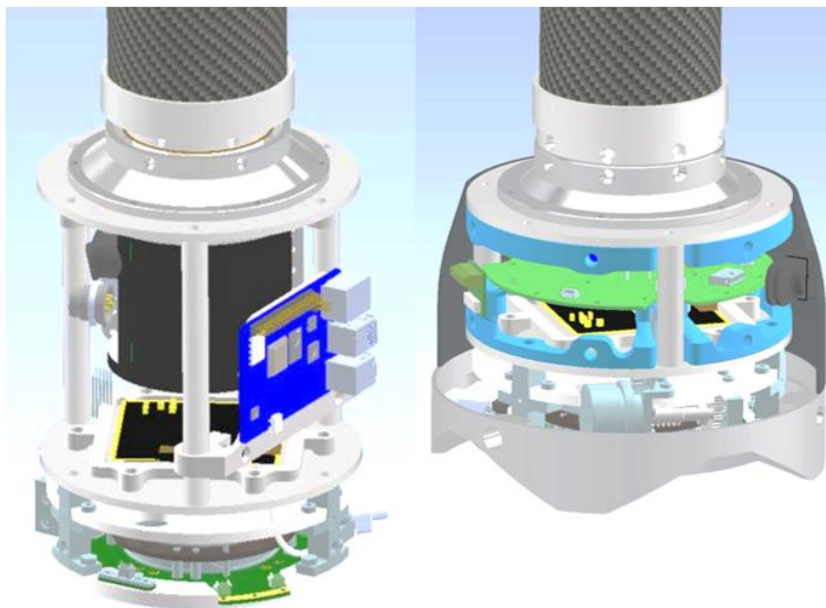


Abbildung 13: Alter Base Aufbau (links) und neuer Aufbau (rechts)

Um die Weltraumtauglichkeit weiter voran zu treiben wurde ein Konzept für einen qualifizierbare Elektronikaufbau erstellt (siehe Abbildung 14).

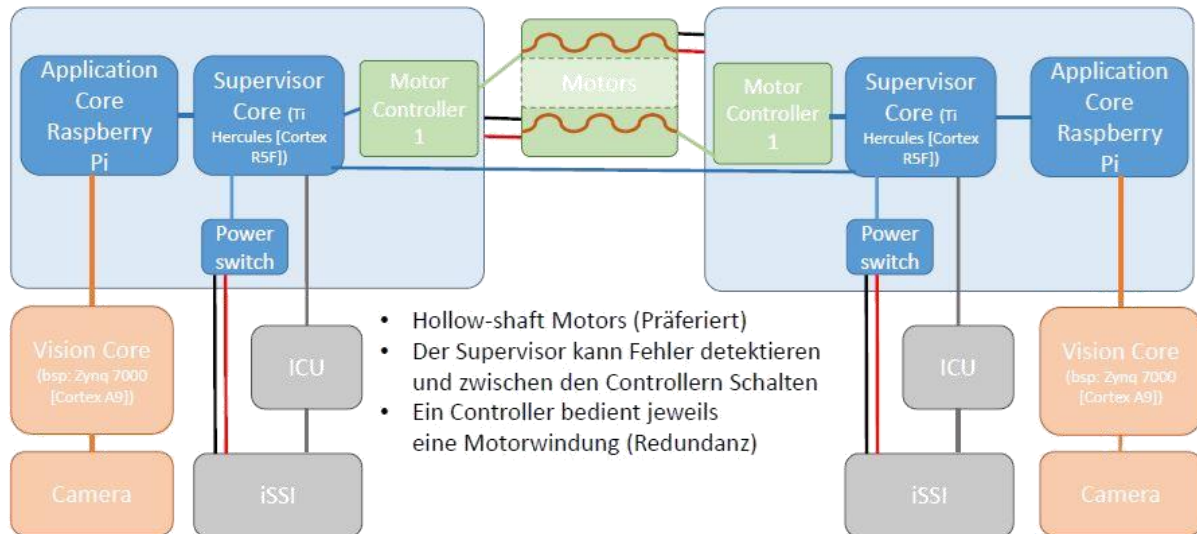


Abbildung 14: Konzept für einen Weltraumfähigen Elektronikaufbau

Dabei wurde darauf geachtet, dass der Application Core durch einen Rad-Hard Supervisor Core überwacht wird. Das auf beiden Seiten, sodass, die jeweils andere Seite bei Ausfall den Core neustarten und überwachen kann. Ein dedizierter Vision Core ist insofern hilfreich, da er die begrenzte Leistung des Application Cores nicht überbeansprucht. Die Verarbeitung der Vision erfordert die meiste Rechenleistung. Dadurch kann der Application Core allein die Regelung des Roboters übernehmen. Ein Power-Switch ist für das Docken notwendig, um abzufragen, ob eine elektrische Verbindung mit der Schnittstelle sichergestellt wurde. Nur dann kann die andere Seite des Roboters sicher abgedockt werden, ohne einen spontanen Energieausfall zu erleiden. Das hätte katastrophale Folgen, sodass der Roboter im Stromlosenzustand nie wieder alleine in Betrieb genommen werden könnte.

Das Motorkonzept wurde derart ausgelegt, dass alle Controller- und Steuerelemente in eine abgeschirmte Komponente vereint werden soll und die Motoren selbst mit einem Hollow-Shaft ausgelegt werden sollen. Die Sensorik befindet sich ebenfalls direkt am Motor, jedoch die Auswertungs-elektronik in der abgeschirmten Controllerbox. Damit wird sichergestellt, dass die Motoren weniger Failurepoints haben.

### AP2.3 Integriertes Werkzeugkonzept

Es wurden unterschiedliche Greiferkonzepte erarbeitet (siehe AP1.4) der Greifertyp auf einen Parallelgreifer festgelegt. Der Greifer ist vom Typ Schunk EGP 40-N-N-B. er besitzt explizit keine Weltraumeignung, da im Laufe des Projekts festgelegt wurde, dass es keine direkte Verwendung des Greifenszenarios im Weltall gibt. Darüber hinaus wurde eine

Erreichbarkeitsanalyse mit demselben Tool wie in AP1.4 (siehe AP2.1 durchgeführt). Der Greifer kann damit alle möglichen Oberflächen im Umfeld des Roboters erreichen (siehe Abbildung 15). Das Gewicht des Greifermoduls wurde bei den Berechnungen berücksichtigt.

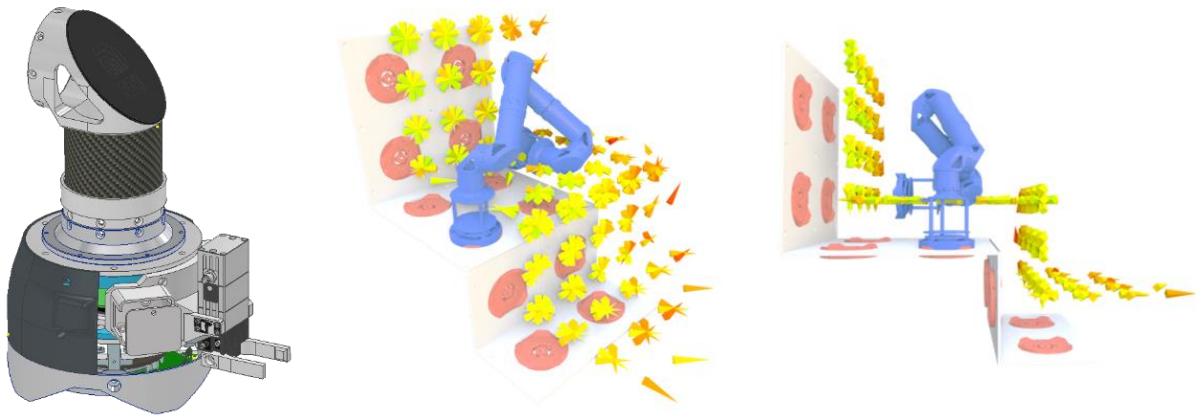


Abbildung 15: CAD Aufbau des Greifermoduls (links) und Ergebnis der Erreichbarkeitsanalyse (rechts)

## AP3 Konzeption und Entwicklung der Softwarekomponenten

### AP3.1 Steigerung der Weltraumtauglichkeit mit ROS 2

Um die gesamte Software zukunftssicher zu gestalten, wurde auf das neuere ROS 2 (humble) umgezogen. Das ermöglicht eine flexiblere Kommunikation auf Basis von DDS, was eine bessere Echtzeitfähigkeit des Systems gewährleisten kann. Durch den Einsatz von sog. Composable-Nodes wird es ermöglicht den Kommunikationsaufwand zu reduzieren, indem Prozessschritte gebündelt werden können. Der Startup wurde dadurch ebenfalls verbessert, da die begrenzten Systemressourcen des Raspberry Pi von dem deterministischen, sequentiellen Startup profitiert, indem es Ressourcenengpässe vermeidet.

Ebenso wurden für externe Hardware, wie die iSSI-Schnittstellen eigene ROS 2 Treiber geschrieben, um die Kommunikation zu vereinheitlichen.

Eine Abschätzung der Weltraumtauglichkeit gestaltet sich dabei als recht komplex. Regelmäßige Systemupdates könnten potentiell eine komplette Neubeurteilung auslösen. Daher ist eine Weltraumqualifizierung der kompletten Software nicht zielführend. Die Qualifizierung einzelner Skills ist dabei allerdings möglich und wird auch als die zielführendste Alternative eingeschätzt.

### AP3.2 Kraftsensorik und Regelung

Die Regelung der Motoren auf Herstellerebene hatte einen Steady-State Fehler von bis zu 0.025 rad (siehe Abbildung 16). Das konnte anhand einer Evaluation bei periodischer Bewegung mit verschiedenen Lasten abgeschätzt werden. Dabei wurde eine Betrachtung im Frequenzraum zur Schätzung von Deflektion und Regellatenz durchgeführt. Dabei wurde ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen Drehmoment und Deflektion festgestellt. Durch einen darüber gesetzten PID-Regler konnte eine Reduktion der Deflektion zwischen 6x und 105x im Bereich 4 bis 27 Nm erreicht werden (siehe Abbildung 17).

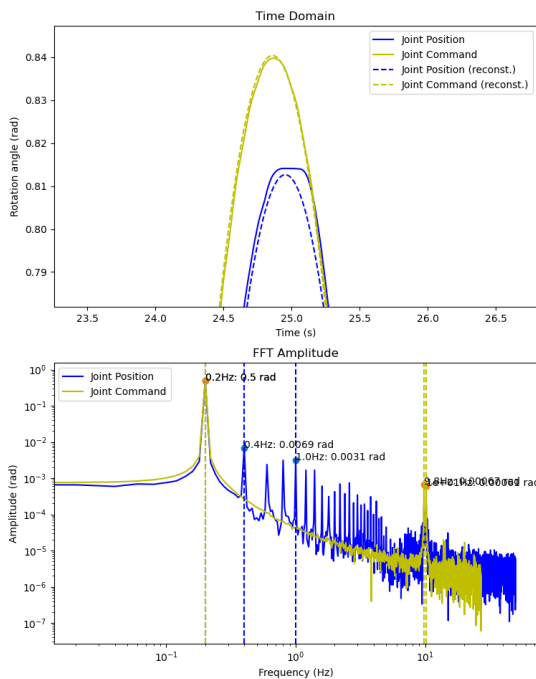


Abbildung 16: Steady State Fehler unter Belastung

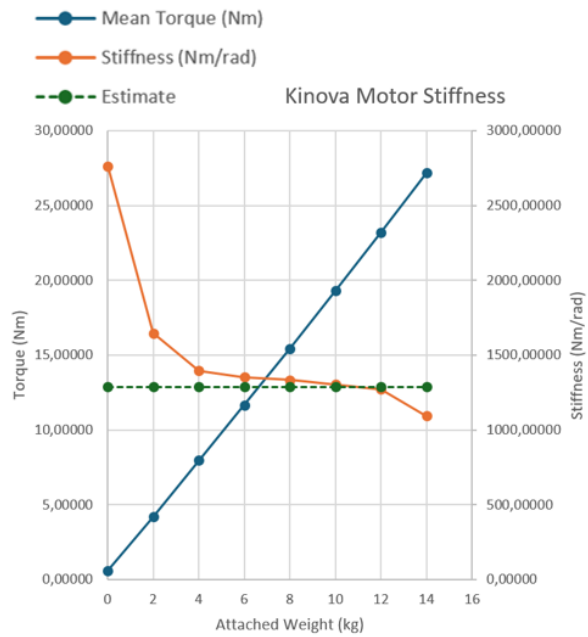


Abbildung 17: Abweichung und Korrektur der Abweichung

Um eine Kraftregelung ohne speziellen FT-Sensor am Endeffektor zu erreichen, wurde eine Schätzung der Kräfte und Drehmomente am Endeffektor durchgeführt. Dazu wurde die Motor Drehmomente unter Einbezug der Kinematik ausgewertet (siehe Abbildung 18). Dabei gilt:

$$F = (J^T)^\dagger \tau$$



Abbildung 18: Qualitative Abbildung der aufsummierten Motormomente und berechneten Kräfte am TCP

Im Nahbereich der Kopplung wurden die Achsmomente nullgestellt, um ein einfaches kommandieren in eine kartesische Richtung vorzugeben. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Kraftsteuerung bevorzugt in Bereichen mit gut konditionierte Jakobimatrix funktioniert. Das bedeutet, dass der Arm eine möglichst symmetrische Anfahrpose haben sollte.

Die im vorherigen Projekt festgestellten Hystereseeffekte bei der Momentenmessung konnte auf einen Stick-Slip-Effekt an den zwischen den Segmenten angebrachten Messingringen zurückgeführt werden. Der Ausbau der Ringe und anziehen der Flanschschrauben konnte diesen Stick-Slip-Effekt ausschließen.

Für den kraftbasierten Koppelvorgang wurde der am FZI entwickelte cartesian force controller auf Basis der geschätzten Kräfte verwendet. Dabei wurden auch die Formfits ausgenutzt um die Schnittstellen ideal zueinander zu positionieren.

Im Test hat sich herausgestellt, dass eine reine Positions- und Kraftsteuerung nicht ausreichend für zuverlässige Dockmanöver ist. Das lässt sich durch ungenaue Segmentverbindungen und ein starker Drift in der Kraftschätzung durch Nichtbeachten der Segmentgewichte erklären. Die Ungenauigkeiten in den Segmentverbindungen konnten durch die 3D Vermessung in (AP 2.1, Kapitel 0) reduziert werden.

Um einen robusten Dockvorgang zu gewährleisten, wurde ein Visual-Servoing eingebunden um eine exakte Anfahrt an die Schnittstellen zu erreichen. Dabei wurden an den Schnittstellen zentriert angebrachte ArUco-Marker erkannt. Es wurden mehrere kleinere distinkt voneinander unterscheidbare Marker in 7x7 mm Größe verwendet (siehe Abbildung 19).

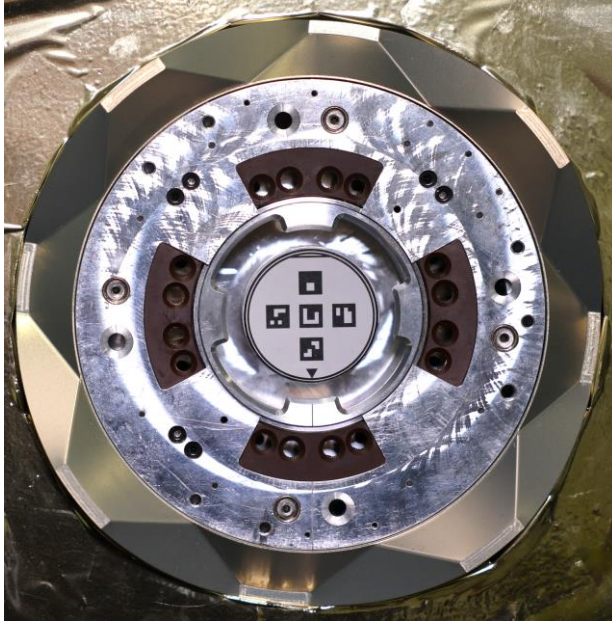


Abbildung 19: angebrachte ArUco Marker in der Mitte der iSSI-Schnittstelle

Die Mittelung aus mehreren Markern sorgt für eine höhere Robustheit gegenüber der ungenauen Startposition. Für das Visual-Servoing wurde eine 5MP fixed-Fokus Farbkamera bis 30 fps verwendet, welche über ein MIPI CSI Interface an den Raspberry Pi angebunden wurde. Die Intrinsische Kalibrierung wurde durch eine Rasterplatte vorgenommen. Die extrinsische Kalibrierung durch eine fix aufgebrachte spezielle Kalibrier-Vorrichtung (siehe Abbildung 20).

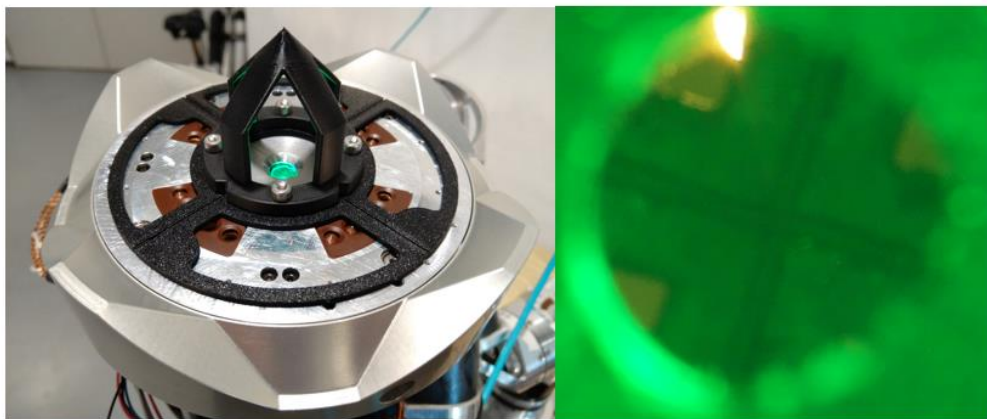


Abbildung 20: Extrinsische Kalibrier-Vorrichtung (links) und Kamerabild (rechts)

Das Bild der Kamera wurde vorverarbeitet, durch eine HSV-Konvertierung in einem kreisförmigen Bildausschnitt um Systemressourcen zu sparen und die Erkennung auf den interessanten Bildbereich zu begrenzen. Eine Kontrast-Normalisierung durch Histogrammspreizung und zusätzlich angepasstes adaptives Thresholding der Helligkeit des Bildes, verbessert den Kontrast der Marker im Bild (siehe Abbildung 21). Dadurch

wurde eine robuste Erkennung der Marker mit 3 Hz erreicht. Dabei wurde auf eine Zero-Copy Kommunikation durch ROS 2 Composable Nodes gesetzt (Siehe AP 3.1 Kapitel 0).

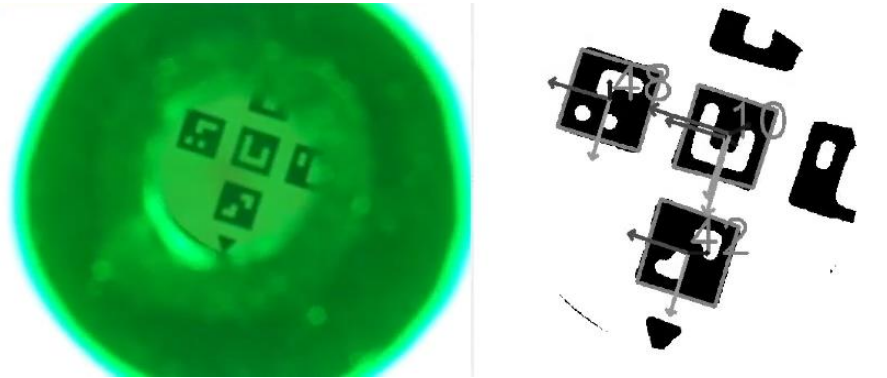


Abbildung 21: Bearbeitung des rohen Kamerabildes (links) und resultierendes Bild auf dem die Markererkennung gemacht wird (rechts)

Die Dockingsequenz sieht danach folgendermaßen aus:

1. Positionsgesteuerte Grobanfahrt (durch Ablaufsteuerung)
2. Positionsgesteuertes Visual-Servoing
3. Kraftgesteuerte Fein-Regelung
4. Erkennung von Kontakt durch Kraftschätzung
5. Feinanpassung mit niedriger Sollkraft

### **AP3.3 Schnittstellen und Skills zur Feinmanipulation**

Es wurde eine High-Level Steuerung der Bewegungsreihenfolge erstellt. Dabei erfolgt zuerst eine manuelle Vorgabe der Schnittstellenreihenfolge. Die Übergangstrajektorien sind manuell vorgegeben und werden intern von der FZI Motion-Pipeline (MoPi) automatisch ausgeführt. Das Docking selbst erfolgt nach der Dockingsequenz aus AP 3.2 Kapitel 0 automatisch. Dabei übernimmt ein Zustandsautomat die Überwachung des Koppelzustandes. Damit wird ein unabsichtliches Fallen des Roboters verhindert. Gleichzeitig wird eine automatische Fehlerbehebung und Neustarten des Koppelvorgangs durchgeführt, falls ein Fehler auftreten sollte. Der manuelle Aufwand zur Steuerung von ReCoBot ist daher sehr gering.

## AP4 Evaluierung der Weltraumtauglichkeit einzelner Komponenten (AP4)

### AP4.1 Testplanung und Vorbereitung

Die Testplanung der Komponenten wurde anhand von Vorgaben aus der iEEE Norm und der ECSS Norm entnommen und an die entsprechenden Test angepasst. Nachfolgend die einzelnen Prüfparameter der Qualifikationstests.

#### Thermal-Vakuum-Test

##### Thermal:

Temperature: -34°C to +71°C

Cycles: 1

Dwell Duration 144h hot / 24h cold

Transition rate: <30°C/h no more than 10°C any 1 min

##### Vacuum:

Pressure:  $\leq 1,33 \text{ E-3 Pa}$  ( $< 1\text{E-5 Torr (mmHg)}$ )

Rate of change of pressure:  $7.3 \text{ E } 3 \text{ Pa/s}$  (55 Torr/s)

Relative Humidity: 0 to 95% non condensing

Die Testkomponenten sind dabei ein Tip/Base Modul inclusive eines Kinova Motormoduls auf eine Platte. Die Komponenten sind jeweils von der Umgebung thermisch entkoppelt (siehe Abbildung 22).



Figure 1 - Sensor positions (TS-AC-ring, TS-CB-top, TS-CB-btm)



Figure 2 - Sample (before test)

Abbildung 22: Testaufbau des Thermal-Vakuumtests

Der Thermal-Vakuum Test wurde bei KRP-Mechatec durchgeführt, die Testergebnisse sind im Anhang.

## Random Vibration Test

### Random Vibration:

0,032  $G^2/Hz$  at 20Hz  
0,2  $G^2/Hz$  from 50-800Hz;  
0.032  $G^2/Hz$  at 2kHz,  
22.3  $G_{rms}$  overall;  
3 min in each of 3 orthogonal axes

Beschreibung des Vibrationsprofils in Abbildung 23:

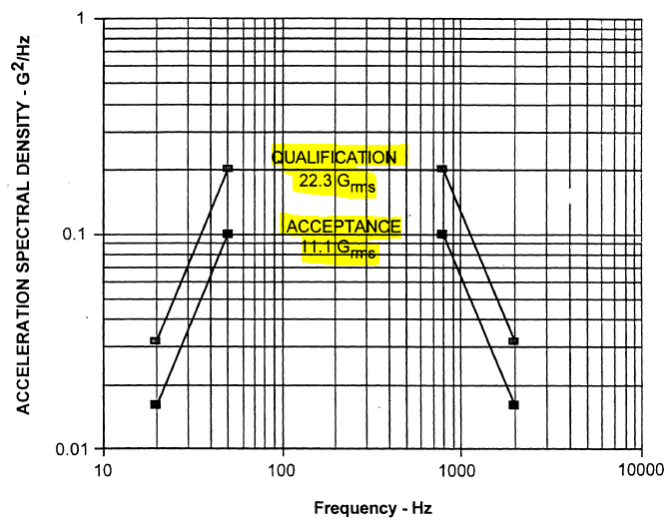


Abbildung 23: Vibrationsprofil

Zusätzlich erfordert die Launchposition eines ReCoBot Arms eine zusätzliche Halteklemme, da durch die sieben Freiheitsgrade der Arm nur über die Tip- und Base Module nicht vollständig fixiert ist. Diese Halteklemme könnte einen federgelagerten Verschlussmechanismus haben, welcher über einen Fangi-Bolt zusammengehalten wird. Dieser würde im Orbit ausgelöst werden, wodurch die Klemme aufspringt und den Arm freigibt (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: Launchposition und zusätzliche Klemme mit Frangi-Bolt

Die Testkomponenten sind einmal ein Tip/Base-Modul, ein Titangedrucktes Segment und ein gedrucktes Segment auf PA12-CF Filament (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Testaufbau für den Random Vibration Test

Der Random Vibration Test wurde im Kriwan Testzentrum durchgeführt, die Testergebnisse sind im Anhang.

### **Radiation Test**

#### Radiation:

1 Gy(Si) per Year

SEE:  $\leq 1E-2$  events/day (non destructive)

SEE:  $\leq 1E-5$  events/day (destructive)

Spennis  $10^2$  Si (rad) bei 2,54 mm Alu

Die Auslegung wurde nach AP 1.1 siehe Kapitel 0 mittels SPENVIS mit einer Missionsdauer von einem Jahr durchgeführt.

Der Radiationstest wurde im Helmholtz Zentrum Berlin durchgeführt. Ein ausführlicher Testbericht liegt nicht vor, aber die erwünschte Strahlendosis wurde durch ein Dosimeter erfasst und stimmt mit den Vorgaben überein.

#### **AP4.2 Durchführung der Weltraumqualifizierungs-Tests**

Die Tests wurden jeweils an den Testzentren nach Vorgaben der Testplanung in AP4.1 Kapitel 0 durchgeführt. Dabei kam die Testvorrichtung jeweils von FZI. Die jeweiligen Prüfberichte sind angehängt.

#### **AP4.3 Analyse, Verwertung und Dokumentation der Ergebnisse**

Ergebnisse der Tests wurden teilweise direkt von den Testzentren dokumentiert. Dabei wurde lediglich eine Sichtprüfung der Komponenten durchgeführt. Die Funktionsprüfung erfolgte durch das FZI.

#### **Ergebnis Thermal-Vakuum-Test**

Der Kinovadrive war nach dem Test vollständig funktionsfähig, obwohl dieser laut Datenblatt außerhalb seiner Spezifikation gehalten wurde. Das ist vermutlich darauf zurück zu führen, dass der Test im passiven Zustand durchgeführt und nur zur Funktionsprüfung bestromt wurde. Die Platine ist nach dem Test nicht mehr funktionsfähig. Der Fehler konnte auf einen Spannungswandler Traco TH 15-2411 zurückgeführt werden. Dieser liefert nach dem Test eine Spannung von 22,3 V am Ausgang, anstatt 5 V. Durch diese Spannungsüberhöhung wurden Nachgeschaltete Komponenten ohne Überspannschutz ebenfalls beschädigt.

#### **Ergebnis Random Vibration Test**

Nach dem Random-Vibration-Test sind alle Komponenten optisch unverändert. Die 3D Druck Segmente sind weiter funktionsfähig, allerdings zeigt sich bei dem FDM Carbon Druck eine leichte Abnutzungserscheinung an den Schraublöchern. Dies ist durch die maximale Zugspannung und den heterogenen Aufbau durch das Druckverfahren zu erklären. Das Material hat sich dadurch an den Schraublöchern leicht plastisch verformt. Das Titan gedruckte Bauteil hatte keinerlei mechanische Veränderung. Das Tip-/Basemodul ist ebenfalls unverändert und voll funktionsfähig. Alle Kabelverbindungen haben gehalten.

## Ergebnis Radiationstest

Die Komponente mit der Quelle abgewandten Seite ist weiter voll funktionsfähig, was durch die Abschirmung der Strahlung durch die Motorwindungen und generelles Material zwischen der Platine und der Strahlenquelle zu erklären ist.

Die Komponente mit der Quelle zugewandten Seite zeigt zwar ein Power-up Verhalten, gibt jedoch keine sinnvollen Sensordaten mehr zurück wodurch der Motor nicht mehr nutzbar ist. Ein erneuter Funktionstest nach 144 Tagen Lagerung bei Normalbedingungen, zeigt allerdings, dass die Funktion wiederhergestellt ist. Das lässt sich dadurch erklären, dass durch den Test eingebrachte Gitterfehler über die Zeit wieder repariert wurden. Diese Bedingungen sind im Weltall nicht herstellbar und eine derart lange Funktionsauszeit ist nicht hinnehmbar. Generell sind die Motoren in diesem Zustand zum Testzeitpunkt nicht für den Einsatz im Weltall geeignet. Bei einer ausreichenden Abschirmung könnte jedoch eine Eignung in Betracht gezogen werden.

Allgemein sind die COTS Komponenten durchaus im Systemverbund geeignet und lediglich Einzelne kritische Komponenten müssten gegen Rad-Hard Versionen ausgetauscht werden. Beispielsweise der DC-DC-Konverter der VPT VSC5-2800D Serie könnte ein guter Ersatz für den Traco TH 15-2411 sein.

## AP5 Evaluation des Systems mit Demonstrator und Dokumentation

### AP5.1 Testaufbau und Vorbereitung

Als Testaufbau für die Evaluation des Demonstrators wurde ein Senkrechter Aufbau von einem 2x4 Array aus iSSI Schnittstellen aufgebaut. Dabei wurden zwei Evaluationsszenarien erstellt:

- Die (Teil-) autonome Fortbewegung über die Testoberfläche
- Das Erreichen und Greifen eines generischen Objektes mit anschließendem Umsetzen desselben

Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 26 zu sehen.



Abbildung 26: Gesamtaufbau für die Evaluation

### **AP5.2 Robotische Evaluation**

Für die Evaluation wurde zu jedem in AP5.1 festgelegten Szenario ein eigener Ablauf vorgegeben und anschließend vollautonom abgespielt. Der Roboter war in beiden Szenarien in der Lage die geforderte Aufgabe robust zu erfüllen. Eine Überwachung während der Evaluation geschah über ein Ausgabeprotokoll. Darin war zu sehen welche Fehlerstates aufgetreten sind, die aufgrund des in Ap3.3 Kap 4.3 beschriebenen Zustandsautomaten vollautomatisch behoben werden konnten. Damit ist ReCoBot fähig die geforderte Mission robust im 1G Feld durch zu führen und auch auf kleinere Abweichungen durch den stabilen Dockvorgang flexibel zu reagieren.

### **AP5.3 Dokumentation**

Die Dokumentation kann dieses Dokument darstellen und sonstige Dokumentation beschränkt sich auf Angehängt Prüfprotokolle der Testzentren.

### **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Förderung ermöglichte die Entwicklung neuer Methoden und Ansätze zur Robotik im Weltraum. Neben neuen Ansätzen zur kinematischen Optimierung von symmetrischen Roboterarmen wurde die Möglichkeit gezeigt, derartige Systeme für den Einsatz im Weltall zu Qualifizieren. Weiter ermöglicht die Förderung die Untersuchung von

neuartigen und robusteren Dockingansätzen mittels der eingesetzten Schnittstellen. Somit wird ein zukünftiger Einsatz von modularer Satellitentechnik, die durch einzelne Roboter gewartet werden, realistischer. Die Vorstellung der Ergebnisse fand mit Hilfe von Fachtagungen und Konferenzen der internationalen Raumfahrt statt.

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

Die Ergebnisse aus dem Vorhaben ReCoBot haben einen wichtigen Grundstein für wissenschaftliche Weiterentwicklungen im Bereich on-orbit Servicing gesetzt. Die im Verlauf des Projektes gesammelten Erfahrungen und Entwicklungen ermöglichen eine bessere Entwicklung im Bereich von modularen Satelliten und deren Wartung, Aufbau und Inspektion.

Die Modularität des Systems ermöglicht ebenso einen vielfältigen Einsatz eines solchen Robotersystems auch bei terrestrischen Aufgaben, wie die Inspektion von Strommasten und ähnlichen Aufgaben in denen ein Fortbewegen an strukturierten Oberflächen gefordert ist.

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

Während der Durchführung des Vorhabens wurde bei Recherchearbeiten das H2020 MOSAR Projekt bekannt. Relevante wissenschaftliche Veröffentlichung, die im Zusammenhang mit dem Projektvorhaben steht:

- *MOSAR-WM: A relocatable robotic arm demonstrator for future on-orbit applications.*; Author(s): Mathieu Deremetz, Pierre Letier, et al. (06-2022)

Gegen Projektende wurden weitere Arbeiten der ESA mit dem Projekt MIRROR bekannt, welches ähnliche Ansätze zu ReCoBot hat:

- *MIRROR –A Modular and Relocatable Multi-arm Robot Demonstrator for On-orbit Large telescope Assembly.* : Author(s): Matheiu Deremetz, Maxence Debroise, et al (10-2023)

## Erfolgte Veröffentlichungen

*Hügel, N. ; Barten, M. ; Mangler, J. ; Rönnau, A. & Dillmann, R. (2022). Reconfigurable Robot for On-Orbit-Servicing modular satellites. IAC 22 International Aerospace Conference.*

*Scherzinger, S., Weinland, J., Wilbrandt, R., Becker, P., Roennau, A., & Dillmann, R. (2022) A Walking Space Robot for On-Orbit Satellite Servicing: The ReCoBot. 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. Ellery, *Tutorial Review on Space Manipulators for Space Debris Mitigation*, doi = 10.3390/robotics8020034: Robotics, 2019.
- [2] CSA, „About Dextre,” 02 04 2020. [Online]. Available: <https://asc-csa.gc.ca/eng/iss/dextre/about.asp>.
- [3] J. Badger, „Robonaut 2 Technology Suite Offers Opportunities in Vast Range of Industries,” 02 04 2020. [Online]. Available: <https://robonaut.jsc.nasa.gov/R2/>.
- [4] A. Flores Abad, O. Ma, K. Pham und S. Ulrich, *A review of space robotics technologies for on-orbit servicing*, Bd. 68, Progress in Aerospace Sciences, 2014.
- [5] Y. Xu und B. Brown, „Self-Mobile Space Manipulators,” 02 04 2020. [Online]. Available: <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/xu/www/sm2.html>.
- [6] X. Yangsheng, B. f. M. Brown und T. Kanade, *Control system of the self-mobile space manipulator*, IEEE Trans. Contr. Sys. Techn, 1994.
- [7] M. Wall, „Mass-Market Robotic Arms for Spacecraft May Be Just Around the Corner,” 09 12 2019. [Online]. Available: <https://www.space.com/made-in-space-europe-robotic-arms-spacecraft.html>.
- [8] Europe, Made in Space, „Made In Space Europe to Develop Robotic Arms for Space Applications in Luxembourg,” 12 2019. [Online]. Available: <https://www.madeinspaceeurope.com/newsroom/press-releases/2019/12/5/made-in-space-europe-to-develop-robotic-arms-for-space-applications-in-luxembourg>.
- [9] H. Ali, A. Ali, M. Mughal, L. Reyneri, C. Sansoe und J. Praks, *Modular Design of RF Front End for a Nanosatellite Communication Subsystem Tile Using Low-Cost Commercial Components*, doi = 10.1155/2019/8174158: International Journal of Aerospace Engineering, 2019.
- [10] S. Lee, A. Hauptananin, A. L. W. Toorian, R. Manuakata, J. Carnahan, D. Pignatelli und A. Mehrparvar, „CubeSat,” 03 04 2020. [Online]. Available: [https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds\\_rev13\\_final2.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf).
- [11] B. Hine und C. Frost, „Ames Modular Common Spacecraft Bus,” 02 04 2020. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/centers/ames/engineering/projects/commonbus>.
- [12] C. Passerone, L. Reynery, S. Iannone und M. Bonjean, *The ADCS system in the AraMiS satellite*, 2012.
- [13] L. Reyneri, C. Sansoe, C. Passerone, S. Speretta, M. Tranchero, M. Borri und D. Del Corso, *Design Solutions for Modular Satellite Architectures*, isbn = 978-953-7619-96-1, doi = 10.5772/6933, 2010.
- [14] M. Deremetz, A. Bianco, G. Grunwald, M. Roa, R. Krenn und M. Arancón, *MOSAR: Modular Spacecraft Assembly and Reconfiguration Demonstrator*, 2019.
- [15] NovaWurks, „In the Wurks,” 02 04 2020. [Online]. Available: <https://www.novawurks.com/new-projects/>.

- [16 T. Jaeger und W. Mirczak, „NanoRacks Kaber Mission 1-NovaWurks-Satlet Initial Mission Proofs and Lessons,” 02 04 2020. [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?#id=1721](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?#id=1721).
- [17 „Nanoracks Products,” Nanoracks LLC, 02 04 2020. [Online]. Available: <https://nanoracks.com/products/>.
- [18 H. Brown, M. Friedman, X. Yangsheng und K. Takeo, „Self mobile space manipulator project,” 02 04 2020. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19930002733.pdf>.
- [19 A. Ellery, J. Kreisel und B. Sommer, „The case for robotic on-orbit servicing of spacecraft: Spacecraft reliability is a myth,” *Acta Astronautica*, Bd. 63, Nr. 5, pp. 632-648, 2008.
- [20 T. Zhang, W. Zhang und M. M. Gupta, *A Novel Docking System for Modular Self-Reconfigurable Robots*, MDPI, 2017.
- [21 G. Song, H. Wang, J. Zhang und T. Meng, *Automatic Docking System for Recharging Home Surveillance Robots*, doi = 10.1109/TCE.2011.5955176: IEEE Transactions on Consumer Electronics - IEEE TRANS CONSUM ELECTRON, 2011.
- [22 „Mir Betriebsanleitung,” MiR Mobile Industrial Robots, 03 04 2020. [Online]. Available: [https://www.mobile-industrial-robots.com/media/4219/mir200-user-guide\\_robot-interface-20-de-v11.pdf](https://www.mobile-industrial-robots.com/media/4219/mir200-user-guide_robot-interface-20-de-v11.pdf).
- [23 Automation, ATI Industrial, „Strongest, most reliable, with unmatched repeatability,” 02 04 2020. [Online]. Available: [https://www.atia.com/products/toolchanger/robot\\_tool\\_changer.aspx](https://www.atia.com/products/toolchanger/robot_tool_changer.aspx).
- [24 eesa Spaceflight inc, eesa, „International Berthing Docking MechanISM (IBDM),” 03 04 2020. [Online]. Available: <http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/Factsheets/27%20IBDM.pdf>.
- [25 D. Nölke, *iSSI – intelligent Space System Interface*, German Aerospace Center (DLR), Space Administration, 2017.
- [26 M. Kortman, S. Ruhl, J. Weise, J. Kreisel, T. Schervan, H. Schmidt und A. Dafnis, „Building block based iBoss approach: fully modular systems with standard interface to enhance future satellites,” in *66th International Astronautical Congress (Jerusalem)*, 2015.
- [27 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.
- [28 C. Ott, R. Mukherjee und Y. Nakamura, „Unified impedance and admittance control,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, 2010.
- [29 R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppe, 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.
- [30 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.

- [31] A. Stemmer, A. Albu-Schaffer 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] R. Featherstone, *Rigid body dynamics algorithms*, Springer, 2008.
- [37] A. Ellery, „Tutorial review on space manipulators for space debris mitigation,” *Robotics*, Bd. 8, Nr. 2, p. 34, 2019.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] H. Mosemann und F. M. Wahl, „Automatic decomposition of planned assembly sequences into skill primitives,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Bd. 17, Nr. 5, pp. 709-718, 2001.
- [42] U. Thomas, B. Finkemeyer, T. Kroger und F. Wahl, „Error-tolerant execution of complex robot tasks based on skill primitives,” in *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, 2003.
- [43] K. Nottensteiner, T. Bodenmueller, M. Kassecker, M. A. Roa, A. Stemmer, T. Stouraitis, D. Seidel und U. Thomas, „A Complete Automated Chain for Flexible Assembly using Recognition, Planning and Sensor-Based Execution,” in *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*, 2016.
- [44] A. Wahrburg, S. Zeiss, B. Matthias, J. Peters und H. Ding, „Combined pose-wrench and state machine representation for modeling Robotic Assembly Skills,” in *#iros#*, 2015.
- [45] U. Thomas, G. Hirzinger, B. Rumpe, C. Schulze und A. Wortmann, „A new skill based robot programming language using UML/P Statecharts,” in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013.
- [46] A. Butting, B. Rumpe, C. Schulze, U. Thomas und A. Wortmann, „Modeling reusable, platform-independent robot assembly processes,” *arXiv preprint arXiv:1601.02452*, 2016.

- [47] O. Kodheli, „Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges,” *arXiv preprint arXiv:2002.08811*, 2020.
- [48] Z. Qu, „LEO satellite constellation for Internet of Things,” *IEEE Access*, Bd. 5, pp. 18391-18401, 2017.
- [49] T. D. L. K. C. H. B. a. J. D. S. R. Smits, „iTASC: a tool for multi-sensor integration in robot manipulation,” in *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Seoul, Korea (South), 2008.
- [50] M. Hutter et al., „ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot,” in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016.
- [51] G. Bledt, M. J. Powell, B. Katz, J. Di Carlo, P. M. Wensing und S. Kim, „MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018.
- [52] M. Focchi, A. del Prete, I. Havoutis, R. Featherstone, D. G. Caldwell und C. Semini, „High-slope terrain locomotion for torque-controlled quadruped robots,” *Auton Robot*, Bd. 41, p. 259–272, 2017.
- [53] L. Wellhausen, A. Dosovitskiy, R. Ranftl, K. Walas, C. Cadena und M. Hutter, „Where should i walk? predicting terrain properties from images via self-supervised learning,” 2019.
- [54] L. Wellhausen, R. Ranftl und M. Hutter, „Safe robot navigation via multi-modal anomaly detection,” 2020.
- [55] Velodyne, „HDL-32E LaserScanner,” Velodyne, [Online]. Available: <https://velodynelidar.com/hdl-32e.html>. [Zugriff am 13 08 2019].
- [56] S. Thrun, W. Burgard und D. Fox, „A probabilistic approach to concurrent mapping and localization for mobile robots,” in *Autonomous Robots*, 1998.
- [57] M. Thoma, „A survey of semantic segmentation,” in *preprint arXiv:1602.06541*, 2016.
- [58] Y. Tan, L. Yang, Q. Hu und Z. Du, „Batch Mode Active Learning for Semantic Segmentation Based on Multi-Clue Sample Selection”.
- [59] C. Stachniss, U. Frese und G. Grisetti, „OpenSLAM,” [Online]. Available: <https://openslam-org.github.io/>. [Zugriff am 15 08 2019].
- [60] Space Studies Board und National Research Council, *Safe on Mars: Precursor measurements necessary to support human operations on the Martian surface*, National Academies Press, 2002.
- [61] Y. Siddiqui, J. Valentin und M. Nießner, „ViewAL: Active Learning with Viewpoint Entropy for Semantic Segmentation,” 2019.
- [62] H. S. Seung, M. Opper und H. Sompolinsky, „Query by committee,” 1992.
- [63] B. Settles, „Active Learning Literature Survey,” 2009.
- [64] B. Settles, M. Craven und S. Ray, „Multiple-instance active learning,” 2008.

- [65 B. Settles und M. Craven, „An analysis of active learning strategies for sequencelabeling tasks,” 2008.
- [66 D. Schmidt, Schmidt, Daniel. Safe navigation of a wall-climbing robot-risk assessment and control methods, Doctoral dissertation, University of Kaiserslautern, 2013.
- [67 A. Rönnau, G. Heppner, M. Nowicki und R. Dillmann, „Rönnau, Arne, et al. "LAURON V: A versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 2014.
- [68 C. Robotics, „Husky unmanned ground vehicle,” Clearpath Robotics, [Online]. Available: <https://clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/>. [Zugriff am 13 08 2019].
- [69 A. A. Pereira, J. Binney, G. A. Hollinger und G. S. Sukhatme, „Risk-aware path planning for autonomous underwater vehicles using,” *Journal of Field Robotics*, 2013.
- [70 S. Ozan und S. Savarese, „Active learning for convolutional neural networks: A core-set approach,” 2017.
- [71 M. Ono, T. J. Fuchs, A. Steffy, M. Maimone und J. Yen, „Risk-aware planetary rover operation: Autonomous terrain classification and path planning,” 2015.
- [72 K. Museth, „VDB: High Resolution sparse volumes with dynamic topology,” in *ACM transaction on graphics*, 2013.
- [73 J. Mueller und G. S. Sukhatme, „Risk-aware trajectory generation with,” 2014.
- [74 R. Mackowiak, P. Lenz, O. Ghori, F. Diego, O. Lange und C. Rother, „Cereals-cost-effective region-based active learning for semantic segmentation,” 2018.
- [75 L. Liu, W. Ouyang, X. Wang, P. Fieguth, J. Chen, X. Liu und M. Pietikäinen, „Deep learning for generic object detection: A survey,” in *International Journal of Computer Vision*, 2020.
- [76 T.-L. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hyas, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár und c. L. Zitnick, „Microsoft coco: Common objects in context,” in *European conference on computer vision*, 2014.
- [77 D. Lewis und W. Gale, „A sequential algorithm for training text classifiers,” 1994.
- [78 A. G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand, M. Andreetto und H. Adam, „Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications,” in *arXiv preprint arXiv:1704.04861*, 2017.
- [79 A. Hornung, K. M. Wurm, M. Bennewitz, C. Stachniss und W. Burgard, „OctoMap: An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees,” in *Autonomous Robots*, 2013.
- [80 Hokuyo, „Hokuyo Laserscanner,” Hokuyo, [Online]. Available: <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=223>. [Zugriff am 13 08 2019].
- [81 W. Hess, D. Kohler, H. Rapp und D. Andor , „Real-Time Loop Closure in 2D LIDAR SLAM,” in *Robotics and Automation (ICRA)*, 2016.
- [82 K. He, G. Gkioxari, P. Dollár und R. Girshick, „Mask r-cnn,” in *IEEE internation conference on computer vision*, 2017.

- [83 K. He, X. Zhang, S. Ren und J. Sun, „Deep Residual Learning for Image Recognition,“ arXiv, 2015.
- [84 Flir, „Flir Vue Pro,“ Flir, [Online]. Available: <https://www.flir.com/products/vue-pro/>. [Zugriff am 13.08.2019].
- [85 J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li und L. Fei-Fei, „Imagenet: A large-scale hierarchical image database,“ in *IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2009.
- [86 D. Cohn, L. Atlas und R. Ladner, „Improving generalization with active learning,“ 1994.
- [87 N. S. Altman, „An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression,“ in *The American Statistician*, 1992.
- [88 ISO 14688-1:2017 *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung*.
- [89 DIN 1055-2 *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Bodenkenngrößen*.
- [90 DIN 1054 *Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*.
- [91 L. Puck, T. Schnell, C. Plasberg, T. Büttner, G. Heppner, A. Rönnau und R. Dillmann, „Modular, Risk-aware Mapping and Fusion of Environmental Hazards,“ *Fusion 2020*, 2020.
- [92 R. Simmons und D. Apfelbaum, „A task description language for robot control,“ in *Proceedings of 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1998.
- [93 S. Zander, G. Heppner, G. Neugschwandtner und et al., „A model-driven engineering approach for ros using ontological semantics,“ in *Proceedings of the 6th International Workshop on Domain-Specific Languages and models for ROBotic systems (DSLRob-15) co-located with the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 2015*, 2015.
- [94 F. Tang und L. Parker, „Asymtre: Automated synthesis of multi-robot task solutions through software reconfiguration,“ in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2005.
- aa P. Shiroma und M. Campos, „Comutar: A framework for multi-robot coordination and task allocation,“ in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2009.
- [96 R. Arkin, „Motor schema based navigation for a mobile robot: An approach to programming by behavior,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1987.
- [97 R. Smith, „The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver,“ *IEEE Transactions on computers*, Nr. no. 12, p. 1104–1113, 1980.
- [98 W. Woodall, M. Liebhardt, D. Stonier und et al., „Ros topics: Capabilities [ros topics],“ *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Bd. vol. 21, Nr. no. 4, p. 14–15, 2014.
- [99 C. O'Meara, L. Schlag, L. Faltenbacher und M. Wickler, „ATHMoS: Automated Telemetry Health Monitoring System at GSOC using Outlier Detection and Supervised Machine Learning,“ *14th International Conference on Space Operations*, 2016.

- [10 L. Pfotzer, J. Oberländer, A. Rönnau und R. Dillmann, „Development and calibration of KaRoLa, a compact, high resolution 3D laser scanner,” in *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2009.
- [10 N. Amruthnath und T. Gupta, „A research study on unsupervised machine learning algorithms for early fault detection in predictive maintenance,” in *2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 2018.
- [10 Y. Lei, N. Li, L. Guo, N. Li, T. Yan und J. Lin, „Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018.
- [10 S. Calinon, F. Guenter und A. Billard, „On learning the statistical representation of a task and generalizing it to various contexts,” in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006*, Orlando, Florida, USA, 2006.
- [10 T. Schnell, C. Plasberg, L. Puck, T. Buettner, C. Eichmann, G. Heppner, A. Roennau und R. Dillmann, „Robot Health Estimation through Unsupervised Anomaly Detection using Gaussian Mixture Models,” in *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering*, 2020.
- [10 R. Castano, T. Estlin, R. Anderson, D. Gaines, A. Castano, B. Bornstein, C. Chouinard und M. Judd, „Oasis: Onboard autonomous science investigation system for opportunistic rover science,” *Journal of Field Robotics*, 2007.
- [10 J. C. Albiez, *Verhaltensnetzwerke zur adaptiven Steuerung biologisch motivierter Laufmaschinen*, Karlsruhe, 2007.
- [10 T. Schervan, M. Kortmann, K. Schroder und J. Kreisel, „iBOSS Modular Plug & Play-Standardized Building Block Solutions for Future Space Systems Enhancing Capabilities and Flexibility, Design, Architecture and Operations,” in *68th International Astronautical Congress (IAC)*, 2017.
- [10 A. Flores-Abad, O. Ma, K. Pham und S. Ulrich, *A review of space robotics technologies for on-orbit servicing*, Prog. Aerosp. Sci. , 2014.
- [10 E. Ostergaard, K. Kassov, R. Beck und H. H. Lund, *Design of the ATRON lattice-based self-reconfigurable robot*, DOI 10.1007/s10514-006-8546-1: Springer Science, 2006.
- [11 A. A. Hayat, R. Parween, M. R. Elara, K. Parsuraman und P. S. Kandasamy, *Panthera: Design of a Reconfigurable Pavement Sweeping Robot*, doi:10.1109/ICRA.2019.8794268. ISBN 978-1-5386-6027-0.: 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA): 7346–7352, 2019.
- [11 R. Peck H., J. Timmis und A. Tyrrell M., *Omni-Pi-tent: An Omnidirectional Modular Robot With Genderless Docking*, Springer, 2019.
- [11 M. Yim, K. Roufas, D. Duff, Y. Zhang, C. Eldershaw und S. Homans, *Modular Reconfigurable Robots in Space Applications*, doi = 10.1023/A:1022287820808: Autonomous Robots, 2003.

- [11 R. Thakker, A. Kamat, S. Bharambe, S. Chiddarwar und K. M. Bhurchandi, *ReBiS - Reconfigurable Bipedal Snake robot*, Chicago, IL: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. pp. 309-314.
- [11 K. Stoy, D. Brandt und D. Christensen, *Self-Reconfigurable Robots: An Introduction*, 2010.
- [11 A. Vergara, Y.-s. Lau, R.-F. Mendoza-Garcia und J. C. Zagal, *Soft Modular Robotic Cubes: Toward Replicating Morphogenetic Movements of the Embryo*, Josh Bongard, University of Vermont, UNITED STATES, 2017.
- [11 T. ecker, A. Lüking, T. Meinert, S. Panajotovic und J. C. Arañó Romero, *MoonFibre -Fibres from Lunar Regolith*, doi = 10.13140/RG.2.2.12287.36007, 2019.