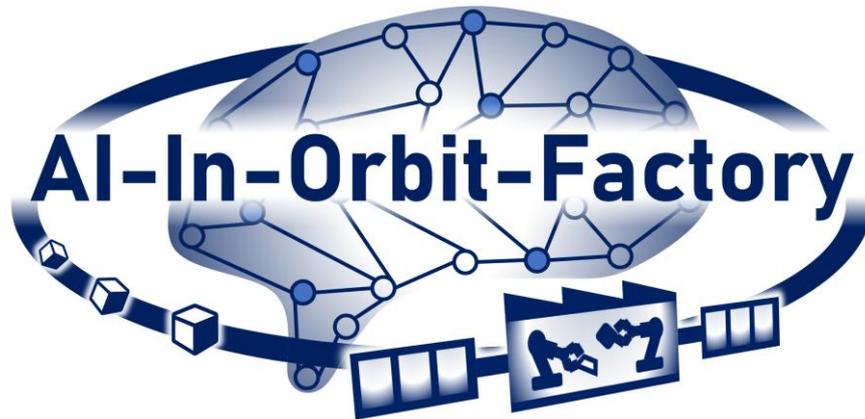


AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory
Teilvorhaben: Teleoperation mit KI Shared Control
Schlussbericht zu Nr. 3.2 nach BNBEST-BMBF 98



Zuwendungsempfänger:	<input type="text" value="TU München"/>	Förderkennzeichen:	<input type="text" value="50RP2030B"/>
Vorhabenbezeichnung:	<input type="text" value="AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory"/>		
Laufzeit des Vorhabens:	<input type="text" value="01.08.2020 - 31.07.2022"/>		
Berichtsdatum:	<input type="text" value="31.12.2022"/>		
Autoren (ORCID):	<input type="text" value="Maximilian Mühlbauer (0000-0002-7635-0248)
Thomas Hulin (0000-0002-3814-075X)
Alessandro Massimo Giordano (0000-0003-2291-7525)
Alin Albu-Schäffer (0000-0001-5343-9074)"/>		

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Inhalt

I. Kurzdarstellung	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
4. Zugrundeliegende Arbeiten wissenschaftlicher und technischer Art	6
5. Zusammenarbeit mit den Projektpartnern.....	7
II. Eingehende Darstellung.....	8
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	8
1.1 Problembeschreibung und Analyse des Teleoperationsszenarios (AP310).....	8
1.2 Analyse und Definition des Zustandsmodells, der erweiterten Telemanipulation und der Schnittstellen (AP320).....	9
1.3 Vorbereitung des Telemanipulations-Reglers mit KI-unterstützten parametrierbaren assistierenden Methoden (AP330)	10
1.4 KI-unterstützte Zustandssteuerung für Telemanipulationsaufgaben (AP340)	12
1.5 Anbindung an den digitalen Prozesszwilling (AP350)	12
1.6 Demonstration und Validierung einer KI-unterstützten Teleoperation (AP360).....	13
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	14
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	14
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	14
5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	15
6. Veröffentlichungen der Ergebnisse	15
Berichtsblatt.....	16

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projektes AI-In-Orbit-Factory ist die Integration von KI-Methoden als Schlüsseltechnologie in die on-demand Montage von Satelliten auf einer In-Orbit Plattform. Der im Rahmen dieses Arbeitspakets entwickelte und evaluierte Teleoperationsansatz erlaubt einen assistierten menschlichen Eingriff in den Montageprozess.

Diese Schnittstelle ist wesentlich für die Montage im Orbit da ein direkter menschlicher Eingriff über den Einsatz von Astronauten prohibitiv teuer wäre. Die Geschicklichkeit des Menschen erlaubt es dabei, Aufgaben auszuführen, welche schwierig bis unmöglich zu automatisieren sind sowie eine fehlgeschlagene automatisierte Integration zu korrigieren.

Allerdings ist die unassistierte Teleoperation bei hochpräzisen Problemen wie dem Zusammenbau von Kleinstsatelliten sehr fordernd für den menschlichen Operator. Im Vorgängerprojekt „Space Factory 4.0“ konnte gezeigt werden, dass mittels assistierenden Virtual Fixtures der Teleoperationsprozess verbessert werden kann. Im Rahmen des „AI-In-Orbit-Factory“-Projekts wurden diese Fixtures entscheidend flexibilisiert, sodass diese nun adaptiv auf veränderte Bedingungen reagieren und entsprechend die Unterstützung optimieren können.

Im Rahmen des Teilvorhabens AP300 „Teleoperation mit KI Shared Control“ war die Aufgabenstellung der TU München die teleoperierte Montage von Kleinstsatelliten mittels kraftsensitiven Robotern sowie der Test des entwickelten Systems im Labordemonstrator.

Dabei wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

1. Problembeschreibung und Analyse des Montageszenarios
2. Analyse und Definition des Zustandsmodells, der erweiterten Telemanipulation und der Schnittstellen
3. Vorbereitung des Telemanipulations-Reglers mit KI-unterstützten parametrierbaren assistierenden Methoden (Virtual Fixtures)
4. KI-unterstützte Zustandssteuerung für Telemanipulationsaufgaben
5. Anbindung an den Digitalen Prozesszwilling
6. Demonstration und Validierung einer KI-unterstützten Teleoperation

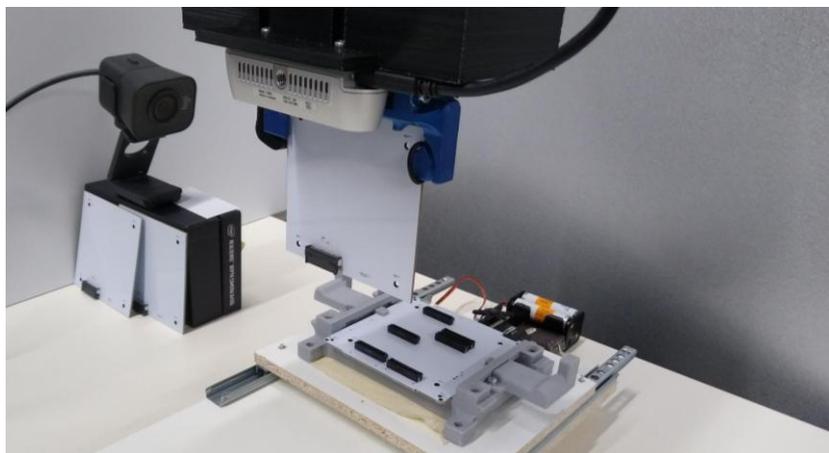


Abbildung 1: Teleoperationsaufgabe.

Abbildung 1 zeigt die Teleoperationsaufgabe, die Integration eines Subsystems in die Backplane eines CubeSat-Satelliten. Die verwendeten Stecker erfordern gleichzeitig eine hohe Präzision und ausreichend Kraft zur Herstellung der Verbindung. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die assistierenden Virtual Fixtures zur Unterstützung des menschlichen Operators. Folgende Fragestellung waren deshalb für den Entwurf der Virtual Fixtures zentral:

1. Welche Art von Unterstützung ist zu welchem Zeitpunkt der Teleoperation notwendig?
2. Welche Eingabemodalitäten liefern die optimalen Inputs sowohl für die Parametrierung der Virtual Fixtures als auch für den menschlichen Operator?
3. Wie kann optimal zwischen den sich daraus ergebenden Fixtures arbitriert werden?
4. Wie ist eine sichere Entwicklung und Test dieser Virtual Fixtures möglich?

Bei der In-Orbit-Teleoperation ergeben sich zwangsläufig hohe Signallaufzeiten von bis zu 600ms (Roundtrip). Um dabei die regelungstechnische Stabilität der Teleoperation mit Kraftfeedback sowohl aus der entfernten Welt als auch von den Virtual Fixtures sicherzustellen, wurde ein passivitätsbasierter Teleoperationsregler integriert.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Für die Durchführung des Vorhabens wurde auf das Robotersystem „HUG“ des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik zurückgegriffen. Dieses System besteht aus zwei kraftsensitiven Leichtbaurobotern, welche sowohl die Interaktion mit dem Menschen mit haptischem Feedback als auch eine sensible Interaktion mit der Umgebung erlauben.

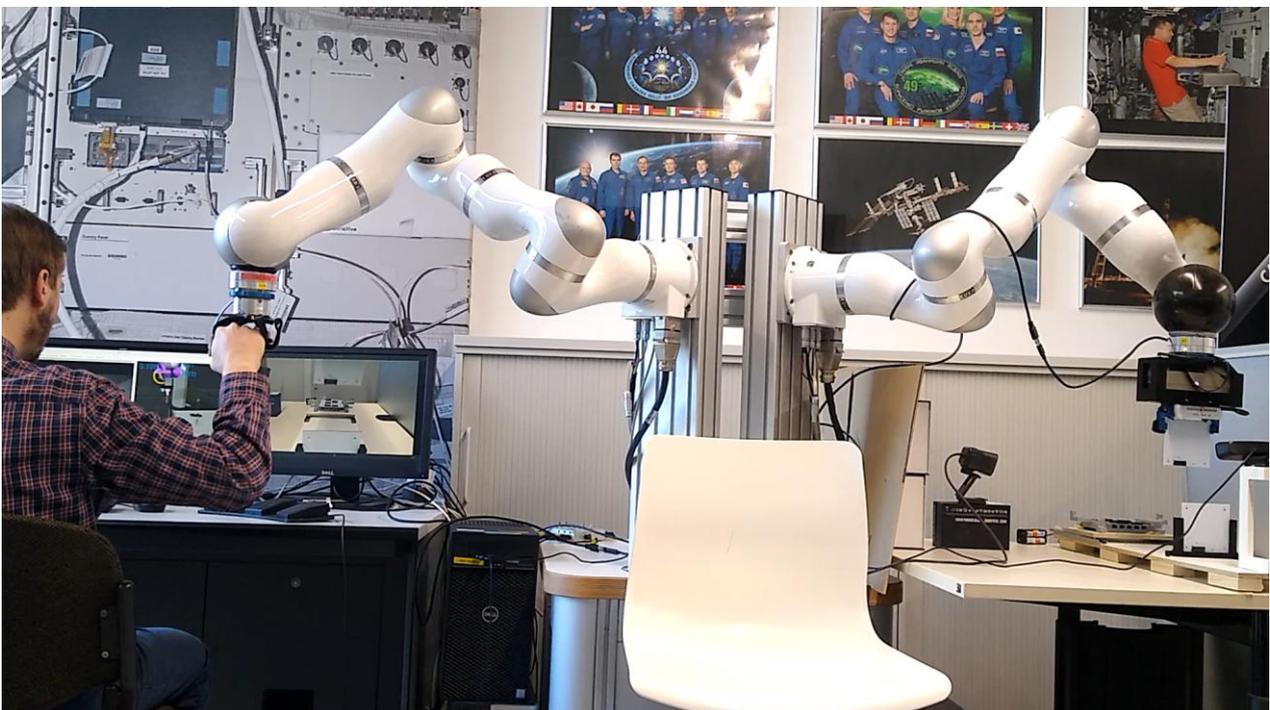


Abbildung 2: Zweiarmiges haptisches Eingabegerät HUG.

Haptische Eingabestation und teleoperierte Roboter

Eingabestation und Roboter müssen kraftsensitiv sein um dem Operator Kraftfeedback geben zu können bzw. feinfühlig mit der Umgebung zu interagieren. Ein ähnlicher Arbeitsraum erleichtert das Mapping von Eingaben auf die Roboterseite. Weiterhin müssen visuelle Signale übertragen werden, damit der Operator auch einen optischen Eindruck der Manipulation gewinnt und entsprechend umsichtig agieren kann.

Greifer

Der teleoperierte Roboter muss mit einem robotischen Greifer ausgestattet sein, der über genügend hohe Greifkraft und Hub verfügt. Auch sollte die Kraft limitiert werden können, damit eine mögliche Beschädigung der manipulierten Objekte vermieden werden kann. Zusätzlich musste der Greifer mit einer Kamera ausgestattet werden um die Fixtures basierend auf visuellen Inputs erstellen zu können.

Virtual Fixtures und Regelung

Die telemanipulierte Satellitenmontage im All ist eine technisch anspruchsvolle Aufgabe welche durch entsprechend performante Virtual Fixtures unterstützt werden muss. Zusätzlich ist ein fortgeschrittener Regelungsansatz notwendig, der unter der zu erwartenden Zeiterzögerung stabil ist und eine hohe Transparenz gewährleistet. Bei der Entwicklung der Regelungskonzepte sollen bereits Raumfahrtrichtlinien, wie das Regulierungsdokument „NASA - Orion Guidance, Navigation and Control standards“, beachtet werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die anspruchsvollen Projektziele wurden in der Vorhabenbeschreibung auf 6 Arbeitspakete aufgeteilt, welche eng mit den Arbeitspaketen der Projektpartner verknüpft sind. Tabelle 1 zeigt die Planung der Arbeitspakete und zugehörige Meilensteine. Durch die verzögerte Einstellung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters wurde AP 310 circa einen Monat länger als ursprünglich geplant bearbeitet. AP 340 wurde etwas vorgezogen um Synergien mit AP 330 zu erzielen. Summa summarum konnten alle Projektziele in der Projektlaufzeit erfolgreich erreicht werden.

Tabelle 1: Gantt-Chart des Arbeitspakets AP300 aus der Vorhabenbeschreibung.

Jahre	1												2											
Monate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP300 Zustandsmodellbasierte Telemanipulation																								
AP310 Problembeschreibung und Analyse des Teleoperationsszenarios	█	█	█																					
AP320 Analyse und Definition des Zustandsmodells, der erweiterten Telemanipulation und der Schnittstellen			█	█	█	█	█	█	█	█	█	█												
AP330 Vorbereitung des Telemanipulations-Reglers mit KI-unterstützten parametrierbaren assistierenden Methoden (virtual fixtures)						█	█	█	█	█	█	█												
AP340 KI-unterstützte Zustandssteuerung für Telemanipulationsaufgaben													█	█	█	█	█	█	█	█				
AP350 Anbindung an den Digitalen Prozesszwilling																			█	█	█	█	█	
AP360 Demonstration und Validierung einer KI-unterstützten Teleoperation																						█	█	█
Meilensteine							M1		M2		M3								M4			M5		

4. Zugrundeliegende Arbeiten wissenschaftlicher und technischer Art

Die im Projekt entwickelten Virtual Fixtures^{1,2,3} (virtuellen Kraftfelder) kombinieren mehrphasige Manipulation mit multimodalem Dateninput und basieren deshalb auf einer Vielzahl von Vorarbeiten. So gibt es eine Vielzahl an Arbeiten welche Kamerainformationen verwenden, um Virtual Fixtures zu positionieren⁴. Weitere Arbeiten erlauben es dem Nutzer, Virtual Fixtures anhand erkannter Geometrien zu erstellen und zu positionieren^{5,6}. Zielbild der im Projekt erstellten Virtual Fixtures war allerdings eine noch höhere Flexibilisierung, weshalb eine auf Visual Servoing basierte Fixture zurückgegriffen wurde⁷. Durch ein kontinuierliches Update der erzeugten Fixture kann hiermit der Benutzer bestmöglich unterstützt werden.

Da nicht zu jedem Zeitpunkt der Manipulation dieselben Anforderungen an die Art und Genauigkeit der Unterstützung gestellt werden, sind Arbeiten zur mehrphasigen Manipulation relevant für den entwickelten Ansatz. Dabei gibt es sowohl mechanische Implementierungen mit Mikromanipulatoren, die am Endeffektor des größeren Roboters montiert werden^{8,9} als auch modernere CNN-Implementierungen welche zwischen verschiedenen Netzwerken für die verschiedenen Manipulationsphasen umschalten^{10,11}.

¹ Rosenberg, Louis B. "Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation." *Proceedings of IEEE virtual reality annual international symposium*. IEEE, 1993.

² Bowyer, Stuart A., Brian L. Davies, and Ferdinando Rodriguez y Baena. "Active constraints/virtual fixtures: A survey." *IEEE Transactions on Robotics* 30.1 (2013): 138-157.

³ Rosenberg, Louis B. "The use of Virtual Fixtures to Enhance Operator Performance in Time Delayed Teleoperation." (1993).

⁴ Selvaggio, Mario, et al. "Enhancing bilateral teleoperation using camera-based online virtual fixtures generation." *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2016.

⁵ Pruks, Vitalii, and Jee-Hwan Ryu. "A Framework for Interactive Virtual Fixture Generation for Shared Teleoperation in Unstructured Environments." *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2020.

⁶ Pruks, Vitalii, and Jee-Hwan Ryu. "Method for generating real-time interactive virtual fixture for shared teleoperation in unknown environments." *The International Journal of Robotics Research* 41.9-10 (2022): 925-951.

⁷ Wu, Liao, Keyu Wu, and Hongliang Ren. "Towards hybrid control of a flexible curvilinear surgical robot with visual/haptic guidance." *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2016.

⁸ Sharon, Andre, and David Hardt. "Enhancement of robot accuracy using endpoint feedback and a macro-micro manipulator system." *1984 American Control Conference*. IEEE, 1984.

⁹ Salcudean, S., and Chae An. "On the control of redundant coarse-fine manipulators." *1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Computer Society, 1989.

¹⁰ Zhuang, Zheyu, Jürgen Leitner, and Robert Mahony. "Learning real-time closed loop robotic reaching from monocular vision by exploiting a control lyapunov function structure." *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2019.

¹¹ Valassakis, Eugene, Norman Di Palo, and Edward Johns. "Coarse-to-fine for sim-to-real: Sub-millimetre precision across wide task spaces." *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2021.

Letzter Ansätze sind für unseren Anwendungsfall relevant, da bei der Subsystemmontage zum Ende deutlich höhere Genauigkeiten erzielt werden müssen.

Die für die telemanipulierte Montage erforderliche haptische Kraftrückkopplung der von den Fixtures und der entfernten Umgebung erzeugten Kräfte unter Kommunikationslatenzzeiten erfordert fortschrittliche Regelungsansätze, um gleichzeitig Transparenz und Stabilität sicherzustellen. Dafür wird ein moderner energiebasierter Regelungsansatz¹², der eine Weiterentwicklung eines seit vielen Jahren auch in Weltraumprojekten¹³ erprobten Ansatzes¹⁴ darstellt verwendet.

Als Telemanipulationssystem werden die bereits veröffentlichten Robotersysteme HUG¹⁵ und LBR¹⁶ und verwendet.

5. Zusammenarbeit mit den Projektpartnern

Die Partner im Projekt AI-In-Orbit-Factory sind

- die Technische Universität Darmstadt (TUDa / DiK), Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl,
- das Zentrum für Telematik Würzburg (ZfT), Prof. Dr. rer. nat. Klaus Schilling und
- die Technische Universität München (TUM), Prof. Dr.-Ing. Alin Albu-Schäffer.

Die in AP300 durchgeführte teleoperierte Montage von Satellitenkomponenten erforderte eine enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern und einen effizienten Austausch von Daten und Informationen. Die Expertise von ZfT war insbesondere bezüglich der Satellitenkomponenten und deren Handhabung mit Robotern nötig. Die TUDa trug mit ihrer einschlägigen Erfahrung in den Bereichen Industrie 4.0 und Digital Twin zu einer erfolgreichen Durchführung des Arbeitspaketes bei.

Ein Austausch fand sowohl über halbjährliche Workshops statt, als auch über virtuelle Meetings alle zwei Wochen. Die Daten und Ergebnisse wurden über die beim ZfT gehostete „Nextcloud“ im Konsortium geteilt.

¹² M. Panzirsch, R. Balachandran and J. Artigas, “Cartesian task allocation for cooperative, multilateral teleoperation under time delay”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015.

¹³ R. Riecke et al., “KONTUR-2 Mission: The DLR Force Feedback Joystick for Space Telemanipulation from the ISS”, in *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, 2016

¹⁴ J. Artigas et al., “Time domain passivity control-based telepresence with time delay”, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006.

¹⁵ T. Hulin, K. Hertkorn, P. Kremer, S. Schätzle, J. Artigas, M. Sagardia, F. Zacharias, and C. Preusche, “The DLR bimanual haptic device with optimized workspace”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011.

¹⁶ G. Hirzinger, N. Sporer, M. Schedl, J. Butterfaß, M. Grebenstein, “Torque-controlled lightweight arms and articulated hands: Do we reach technological limits now?”, in *The Int. Journal of Robotics Research*, 23(4-5), 2004.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Das Teilvorhaben AP300 befasste sich mit „Teleoperation mit KI Shared Control“. Im Vorhabenzeitraum wurde auf der Problembeschreibung und Analyse des Teleoperationsszenarios (AP 310), der Analyse und Definition des Zustandsmodells, der erweiterten Telemanipulation und der Schnittstellen (AP 320), der Vorbereitung des Telemanipulations-Reglers mit KI-unterstützten parametrierbaren assistierenden Methoden (Virtual Fixtures) (AP 330), der KI-unterstützten Zustandssteuerung für Telemanipulationsaufgaben (AP 340), der Anbindung an den Digitalen Prozesszwilling (AP 350) sowie auf der Demonstration und Validierung einer KI-unterstützten Teleoperation (AP 360) gearbeitet. Alle Unterarbeitspakete wurden planmäßig abgeschlossen. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse und der Entwicklungsprozesse befindet sich in den Berichten des AP 300. Die gemeinschaftlich erzielten Ergebnisse wurden in einem gemeinsam mit den Projektpartnern verfassten Konferenzbeitrag¹⁷ auf dem IAC (International Astronautical Congress) 2021 vorgestellt. Die entwickelten Virtual Fixtures für die Teleoperation des CubeSat-Zusammenbaus wurde im Paper „Multi-Phase Multi-Modal Haptic Teleoperation“¹⁸ auf der IROS 2022 vorgestellt. Die durgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse sind in diesem Abschnitt beschrieben.

1.1 Problembeschreibung und Analyse des Teleoperationsszenarios (AP310)

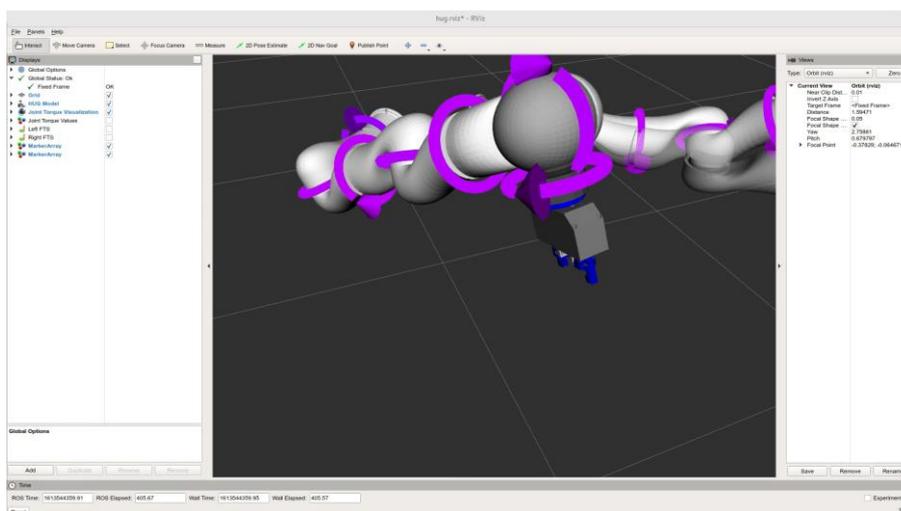


Abbildung 3: Simulation des Teleoperationsszenarios in der Robotervisualisierung „rviz“.

In AP 310 wurde die finale Demo, bestehend aus den teleoperierten Einsetzen mehrere verschiedener Subsysteme in die Backplane des CubeSats erarbeitet. Dabei wurden Hard- und Softwarevoraussetzungen sowie die Evaluation des Ansatzes mittels Benutzerstudien genauer definiert. Dazu wurden die

¹⁷ Kempf, Florian, et al. "AI-In-Orbit-Factory-AI approaches for adaptive robotic in-orbit manufacturing of modular satellites." *Proceedings of the International Astronautical Congress*, IAC. 2021.

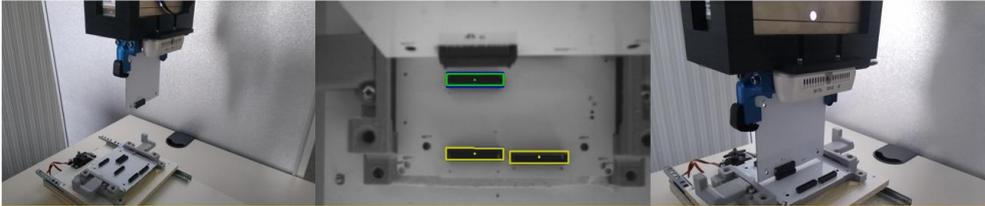
¹⁸ M. Mühlbauer, F. Steinmetz, F. Stulp, T. Hulin, and A. Albu-Schäffer, "Multi-phase multi-modal haptic teleoperation," in *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2022.

notwendige quantitative und qualitative Evaluation des Ansatzes festgelegt. Zusätzlich wurde das Szenario simulativ in der Robotervisualisierung „rviz“ getestet.

1.2 Analyse und Definition des Zustandsmodells, der erweiterten Telemanipulation und der Schnittstellen (AP320)

Der Begriff Teleoperation beschreibt die Steuerung eines Geräts (Remote Robot) in einer entfernten Umgebung durch ein Eingabegerät (Haptic Input Device). Abhängig von den besonderen Eigenschaften eines Anwendungsszenarios, z.B. Verfügbarkeit von Sensoren, Kommunikationsbandbreite, erforderliche Präzision, und die für die Aufgabe erforderliche Geschicklichkeit oder Intelligenz, kann ein mehr oder weniger hohes Maß an Autonomie und Intelligenz von der Steuerung des Remote-Gerätes übernommen oder vom Bediener gefordert werden.

Da bei der In-Orbit Montage von CubeSats sehr hohe Genauigkeitsanforderungen notwendig sind, werden Virtual Fixtures verwendet um die Aufgabe für den menschlichen Operator zu erleichtern. Virtual Fixtures sind Kraft- und Drehmomentfelder, die das Gerät von unerwünschten Zuständen (z.B. einer falschen Ausrichtung oder einem gefährlichen Bereich) wegdrücken oder in Richtung gewünschter Zustände (z.B. um den Endeffektor auf einem gewünschten Weg zu halten) ziehen. Spezieller Fokus für unsere Anwendung liegt dabei auf der optimalen Ausnutzung verfügbarer Sensordaten basierend auf der aktuellen Montagephase.



	Approaching	Positioning	Manipulation
Fixture	Position-Based (static)	Visual Servoing (dynamic)	Force Feedback
Inp. Modality	Cartesian Pose	Camera Images	Cartesian Torques
Accuracy	Low	High	High
Workspace	Everywhere	Near Target	In Contact

Phase Estimation + Fixture Selection

Abbildung 4: Visualisierung des entwickelten multimodalen Ansatzes.

Nach einer umfassenden Literaturrecherche (siehe Abschnitt 4 / Publikationen) wurden vielversprechende Ansätze ausgewählt. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht des daraus entwickelten Ansatzes. Um die höchstmögliche Güte zu erreichen, wurden positions- mit bildbasierten Verfahren kombiniert. Dazu wurde eine weitere Komponente entworfen welche, basierend auf dem aktuellen Montagezustand, die Fixtures gegeneinander gewichtet und somit die jeweils optimale Fixture auswählt.

Kombiniert erzielen diese Fixtures sowohl globale Gültigkeit des Ansatzes als auch die notwendige sehr hohe Genauigkeit nahe des Ziels.

1.3 Vorbereitung des Telemanipulations-Reglers mit KI-unterstützten parametrierbaren assistierenden Methoden (AP330)

In AP 330 wurde die system- und regelungstechnische Umsetzung des Ansatzes bearbeitet. Dazu wurde ein Simulationsmodell aufgebaut welches sowohl den Roboter dynamisch simuliert (in Simulink) als auch die Kameradaten in der Unreal Engine (Abbildung 5) simulieren kann. Mithilfe dieser Simulation ist eine einfachere Entwicklung der Methodik ermöglicht da z.B. ein am realen System nicht mögliches Anhalten der Zeit und die Untersuchung der physikalischen Zustände möglich ist. Durch die Verwendung eines 3D-Eingabegeräts (Space Mouse) anstatt eines haptischen Eingabegeräts ist auch eine realitätsnahe Interaktion mit dem System möglich, die z.B. auch kontaktarm im Home Office durchgeführt wird.

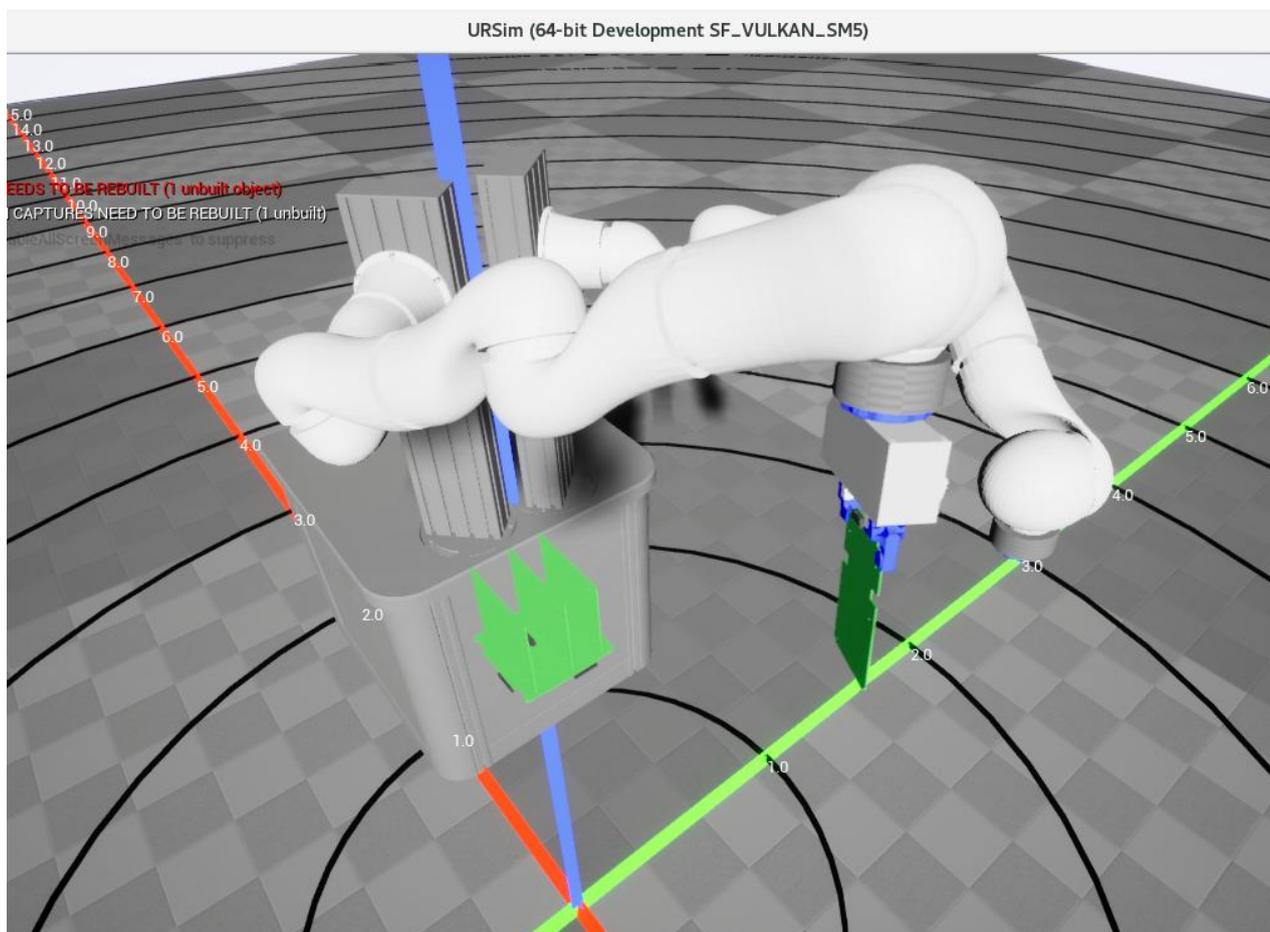


Abbildung 5: Simulation des Robotersystems in der Unreal Engine.

Basierend auf diesen Vorarbeiten konnte eine Bibliothek von Virtual Fixtures in Simulink implementiert werden. Diese decken verschiedene geometrische Primitive (u.a. Zylinder, Cone) sowie Trajektorien ab und können impedanzbasiert (= virtuelles Feder-Dämpfer-System) geregelt werden. Die letztlich verwendete Trajektorienfixture ist in Abbildung 6 dargestellt. Weiterhin wurde eine Visual Servoing Virtual Fixture entwickelt, die eine Verwendung von Bilddaten für Virtual Fixtures erlaubt und damit eine kontinuierliche Adaption an genauere Messwerte oder verschiebende Ziele erlaubt.

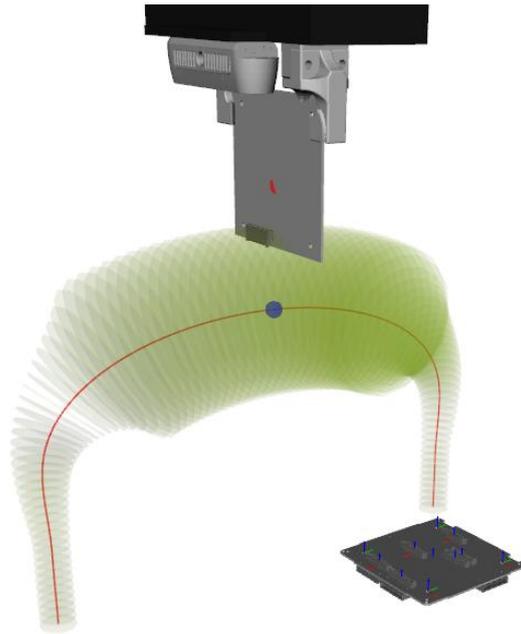


Abbildung 6: Positionsbasierte Virtual Fixture. Diese führt den menschlichen Teleoperator entlang eines vordefinierten Pfades (rote Linie) entsprechend der aktuell durchzuführenden Aufgabe. Die gelben Kreise zeigen die aktuelle Steifigkeit der Fixture an; in Bereichen mit geringerer Genauigkeitsanforderung wurde die Steifigkeit reduziert (größere Kreise) wodurch der Operator mehr Bewegungsspielraum erreicht.

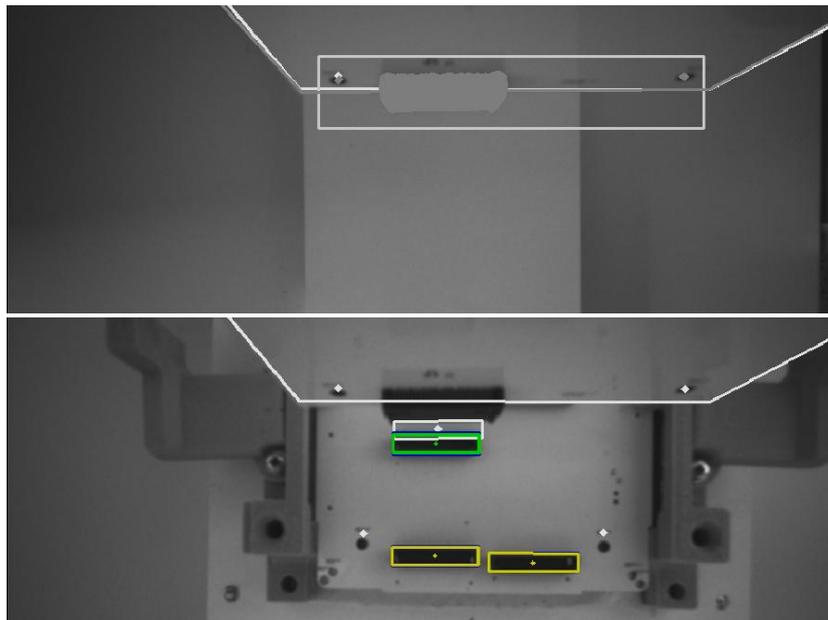


Abbildung 7: Visual-Servoing Virtual Fixture. Diese führt den menschlichen Teleoperator genau zum Steckpunkt. Dafür wird zunächst das gegriffene Subsystem akkurat lokalisiert (oben) und dann kontinuierlich die Steckerpositionen extrahiert (unten).

Diese Fixtures vereinen die aus AP 320 geforderten Anforderungen an globale Gültigkeit der Virtual Fixtures und sehr hohe Genauigkeit nahe des Ziels.

1.4 KI-unterstützte Zustandssteuerung für Telemanipulationsaufgaben (AP340)

Für AP 340 wurde die in AP 320 entwickelte KI-Zustandsschätzung (Abbildung 8) zunächst prototypisch implementiert um die Interaktion von positions- und bildbasierten Fixtures zu testen. Diese wurde zunächst in der Simulation und dann am Roboter mit sehr guten Ergebnissen weiter optimiert. Anschließend wurden sie im Rahmen einer Pilotstudie für einen Beitrag zur namhaften IROS-Konferenz untersucht. Daraufhin wurde die Arbitrierung erweitert, sodass nun die volle Kovarianzschätzung der Fixtures Verwendung finden kann. Damit sind nun auch komplexe Interaktionen der verschiedenen Virtual Fixtures miteinander darstellbar.

Die im Rahmen der Studie gewonnenen Roboterdaten wurden als Datensatz aufbereitet (Abbildung 9), welcher z.B. für die Implementierung dieses probabilitätsbasierten Arbitrierungsverfahrens verwendet wurde.

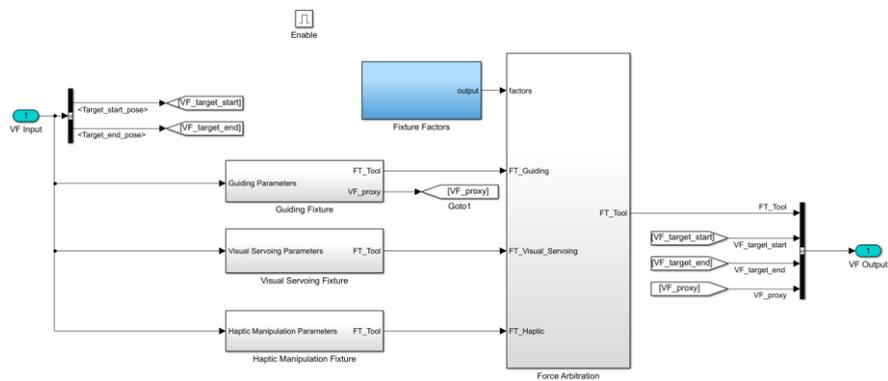


Abbildung 8: Simulink-Implementierung der Zustandssteuerung.



Abbildung 9: Visualisierung des Datensatzes.

1.5 Anbindung an den digitalen Prozesszwilling (AP350)

In AP 350 wurde gemeinsam mit den Projektpartnern auf der Schnittstellendefinition und -umsetzung gearbeitet. Damit können Daten zwischen den Projektpartnern ausgetauscht werden und z.B. die Teleoperation getriggert werden.

Dazu wurde eine Spezifikation von yaml-Dateien entwickelt, welche die CubeSat-Platinen sowie ihren Zusammenbau spezifiziert. Darauf basierend wird die Teleoperation parametrisiert und entsprechende Virtual Fixtures erzeugt. Prozessdaten werden an den Digitalen Prozesszwilling zurückgespielt.

```

{
  "mating": [
    {
      "first": "CSID_BP_ST_CENTER",
      "second": "CSID_BP_ST",
      "offset": [-0.000625, 0, 0, 0.7071068, 0.7071068, 0, 0]
    },
    {
      "first": "CSID_BP_ST",
      "second": "CSID_SUB_RA",
      "offset": [-0.001875, 0, 0.00675, 0, 0.7071068, 0, 0.7071068]
    }
  ],
}

```

Abbildung 10: yaml-Definition von Boardverbindern.

1.6 Demonstration und Validierung einer KI-unterstützten Teleoperation (AP360)

Für AP 360 wurde ein hochperformanter Teleoperationsregler (Time-Domain Passivity Controller) integriert, welcher mit den Zeitverzögerungen, die bei einem Einsatz im Weltraum auftreten, umgehen kann ohne regelungstechnische Instabilitäten zu erzeugen und trotzdem gutes Force-Feedback liefert. Dies erlaubt eine Verwendung der entwickelten Virtual Fixtures auch im tatsächlichen Einsatzszenario. Weiterhin wurde ein Benutzerinterface basierend auf der VR-Brille „HTC Vive“ entwickelt, welche es dem Operator erlaubt immersiv in den Assembly-Prozess einzutauchen und optimal mit den Virtual Fixtures zu interagieren.

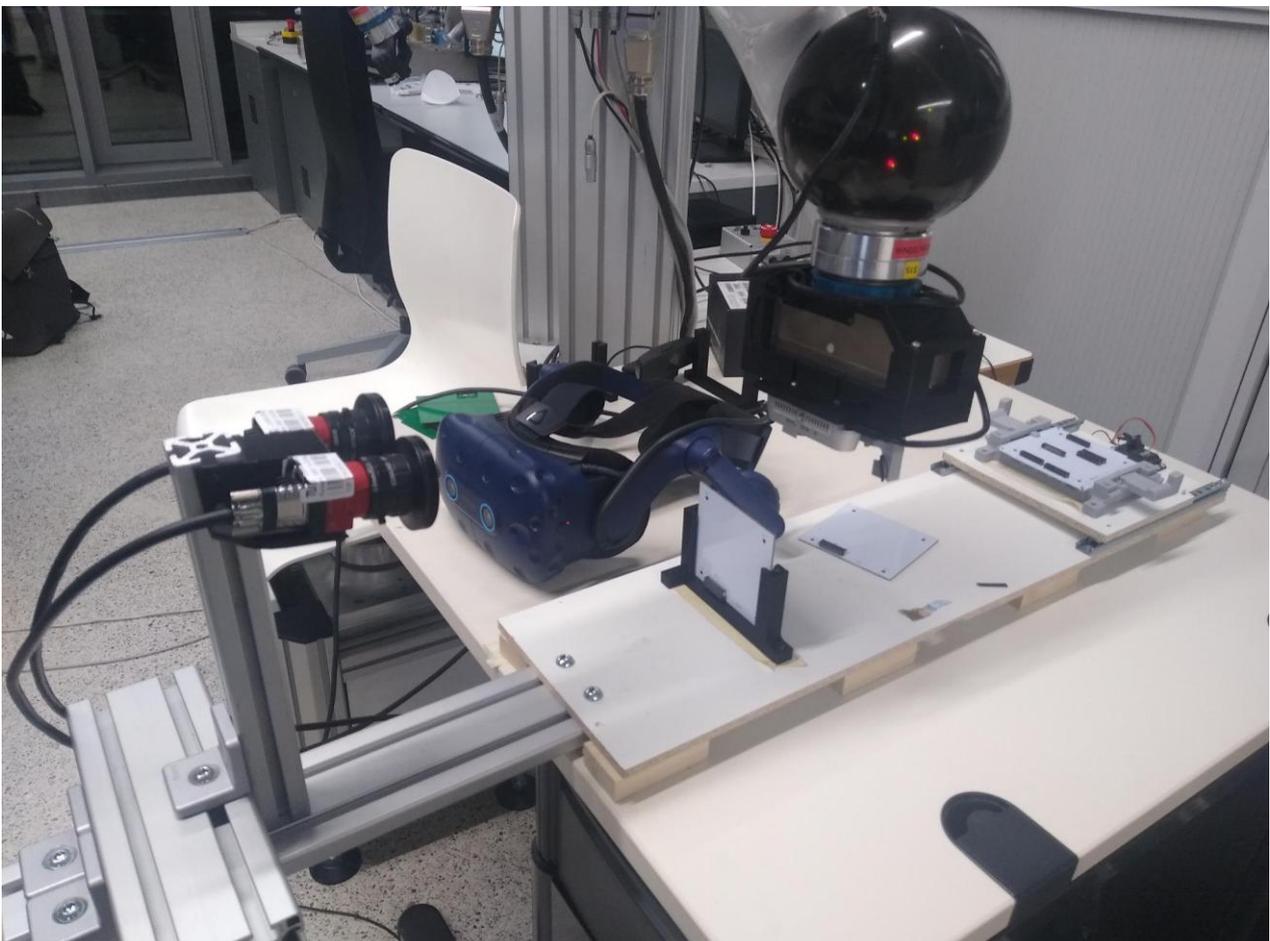


Abbildung 11: Stereokameras und VR-Brille.

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kosten des Teilvorhabens umfassten die Personalkosten für wissenschaftliche Arbeiten, sowie Hardwarekosten. Der Umfang der einzelnen Position sind der zahlenmäßige Nachweis zu entnehmen, der dem Projektträger von der TU München vorgelegt wurde.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Notwendigkeit der Arbeiten des Forschungsvorhabens ist in der Vorhabenbeschreibung dargelegt. Danach ist es unwahrscheinlich, dass ein deutsches oder europäisches Unternehmen die beschriebenen Arbeiten im Alleingang realisieren könnte. Das Ziel, die Endmontage von Satelliten in einer Weltraumfabrik durchzuführen, ist für eine Kommerzialisierung in naher Zukunft noch zu weit entfernt und die Entwicklung von Verfahren hin zu einer solchen Weltraumfabrik ist aufwändig. Nur durch den Austausch von Expertise zwischen Universitäten, Forschungsinstitutionen und Unternehmen können die nötigen Innovationsbrücken zwischen Maschinenbau (z. B. Industrie 4.0) und Raumfahrtindustrie (z. B. Kleinsatellitenbau) geschlossen werden. Speziell die neuartigen KI-Methoden sind noch unzureichend erforscht und noch nicht im industriellen Einsatz angekommen, weshalb hier weitere Forschungsleistungen notwendig sind.

Ohne Unterstützung ist eine solche Kooperation und Kollaboration nicht möglich. Die Antragsteller benötigten Unterstützung in Form einer öffentlichen Förderung, da sie die anfallenden Arbeiten in diesem Umfang im Rahmen der vorhandenen Kapazitäten und die mit ihnen verbundenen Risiken nicht alleine tragen können. Daraus ergab sich die Notwendigkeit der Zuwendung, um das Vorhaben realisieren zu können.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Andere Projekte können direkt von den durchgeführten Arbeiten und deren Ergebnissen profitieren. Eine besondere Relevanz der Ergebnisse besteht aufgrund der Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfelder der Teleoperation sowie im Learning from Demonstration-Bereich, d.h. die Regelungsarchitektur und entwickelten Virtual Fixtures können sowohl für Weltraum- als auch für terrestrische Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen ein hohe Präzision während einer Teleoperation nötig ist. Im Projekt SMiLE2gether könnten virtual Fixtures die Teleoperation eines Roboterarms übernehmen, der an einem Rollstuhl oder an einem mobilen Robotersystem angebracht ist. Auch in Factory of the Future ist die Nutzung von Teleoperation zur Fernwartung und zum Eingriff im Fehlerfall bei automatisierten Fabriken angedacht.

Für das Nachfolgeprojekt „ACOR“ stellen die erzielten Ergebnisse eine unverzichtbare Grundlage dar. In diesem Projekt soll die cyber-physische Fabrik um die notwendige Robustheit erweitert werden, die einen zukünftigen Einsatz im Weltraum erlaubt. Zusätzlich sollen Anknüpfungspunkte für eine mögliche In-Orbit-Demonstration gesucht werden.

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Von dritter Seite sind während der Vorhabendurchführung keine neuen Ergebnisse bekannt geworden, die für die Arbeiten relevant sind. Daher waren diesbezüglich auch keine Änderungen in der Zielsetzung notwendig.

6. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die wissenschaftlich relevanten Ergebnisse im Konsortium wurden innerhalb eines Konferenzbeitrages¹⁹ auf dem IAC veröffentlicht. Die speziellen Ergebnisse des AP 300 wurden in einem eigenen Konferenzbeitrag²⁰ auf der IROS 2022 veröffentlicht. Die Veröffentlichungen beschreiben im Detail den Demonstrator sowie die entwickelten Virtual Fixtures, sowie die Ergebnisse der durchgeführten Tests und Pilotstudie.

Aktuell ist eine Publikation im Journal „Astra Astronautica“ in Vorbereitung, in dem die Ergebnisse des Konsortiums detailliert dargestellt werden.

¹⁹ Kempf, Florian, et al. "AI-In-Orbit-Factory-AI approaches for adaptive robotic in-orbit manufacturing of modular satellites." *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2021.

²⁰ M. Mühlbauer, F. Steinmetz, F. Stulp, T. Hulin, and A. Albu-Schäffer, "Multi-phase multi-modal haptic teleoperation," in *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2022.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory Teilvorhaben: Teleoperation mit KI Shared Control		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Mühlbauer, Maximilian; Hulin, Thomas; Massimo Giordano, Alessandro; Albu-Schäffer, Alin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2022	
	6. Veröffentlichungsdatum	
	7. Form der Publikation Document Control Sheet	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität München - Fakultät für Informatik - Informatik 23 - Lehrstuhl für Sensorbasierte Robotersysteme und intelligente Assistenzsysteme	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 50RP2030B	
	11. Seitenzahl	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Deutsche Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	13. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen	
16. DOI (Digital Object Identifier)		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Dieser Bericht beschreibt die Tätigkeiten und Ergebnisse des Teilvorhabens „Teleoperation mit KI Shared Control“ des Verbundprojekts „AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory“. Das übergeordnete Ziel des Projekts besteht darin, einen Prozess basierend auf KI-Methoden für die Produktion von Kleinsatelliten im Orbit zu etablieren und somit den Weg für eine automatisierte, flexible und schnelle Produktion und Inbetriebnahme von Kleinsatelliten direkt im Orbit zu ebnen. Der Fokus des beschriebenen Teilvorhabens liegt dabei (i) auf der Erforschung neuartiger multimodaler Virtual Fixtures für hochpräzise Teleoperationsaufgaben, (ii) deren Zustandssteuerung / Arbitrierung sowie (iii) der Durchführung von Nutzerstudien.		
19. Schlagwörter Weltraumfabrik, Robotische Montage, Kleinsatelliten, KI, Telerobotik, Telemanipulationsregelung, Krafrückkopplung, Virtual Fixtures		
20. Verlag	21. Preis	

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory Teilvorhaben: Teleoperation mit KI Shared Control		
4. author(s) (family name, first name(s)) Mühlbauer, Maximilian; Hulin, Thomas; Massimo Giordano, Alessandro; Albu-Schäffer, Alin	5. end of project 31.07.2022	6. publication date
	7. form of publication Document Control Sheet	
	8. performing organization(s) name, address Technische Universität München - Fakultät für Informatik - Informatik 23 - Lehrstuhl für Sensorbasierte Robotersysteme und intelligente Assistenzsysteme	
12. sponsoring agency (name, address) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. originators report no.	10. reference no. 50RP2030B
	11. no. of pages	
	13. no. of references	
16. DOI (Digital Object Identifier)		14. no. of tables
17. presented at (title, place, date)		15. no. of figures
18. abstract This report describes the activities and results of the subproject "Teleoperation with AI Shared Control" of the joint project "AI-enabled Cyber-Physical In-Orbit Factory". The overall objective of the project is to establish a process based on AI methods for the production of small satellites in orbit, thus paving the way for automated, flexible and fast production and commissioning of small satellites directly in orbit. The research focus of the described subproject is on (i) novel multimodal virtual fixtures for high-precise teleoperation tasks, (ii) their state control / arbitration and (iii) user studies.		
19. keywords Space factory, robotic assembly, small satellites, AI, telerobotics, telemanipulation control, force feedback, virtual fixtures		
20. publisher	21. price	